



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



VARIABILIDAD HIDRODINÁMICA
EN LOS CANALES DEL SISTEMA
LAGUNAR MAGDALENA-ALMEJAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN
MANEJO DE RECURSOS MARINOS

PRESENTA:

MANUEL SALDÍVAR REYES

LA PAZ, B.C.S, MÉXICO, JUNIO DE 2007



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
 ACTA DE REVISION DE TESIS

SIP-14

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 10:00 horas del día 8 del mes de Junio del 2007 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis de grado titulada:

"VARIABILIDAD HIDRODINÁMICA EN LOS CANALES DEL SISTEMA LAGUNAR MAGDALENA - ALMEJAS"

Presentada por el alumno:

SALDÍVAR
Apellido paterno

REYES
materno

MANUEL
nombre(s)

Con registro:

B	0	5	1	1	9	8
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante al grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis
PRIMER VOCAL


DR. OLEG ZAITSEV VIKTOROVICH

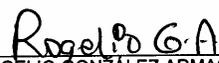
PRESIDENTE


DR. EVGUENI CHOUMILINE NIKOLAYEVICH

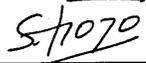
SECRETARIO


DR. SILVERIO LÓPEZ LÓPEZ

SEGUNDO VOCAL

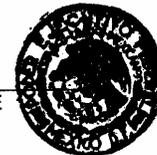

DR. ROGELIO GONZÁLEZ ARMAS

TERCER VOCAL

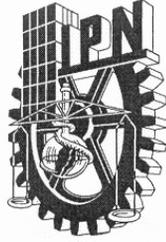

DR. SÉRGIO TROYO DIÉGUEZ

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO


DR. RAFAEL CERVANTES DUARTE



I. P. N.
CICIMAR
DIRECCION



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 11 del mes Junio del año 2007, el (la) que suscribe MANUEL SALDÍVAR REYES alumno(a) del Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS con número de registro B051198 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de: DR. OLEG ZAITSEV VIKTOROVICH y cede los derechos del trabajo titulado: "VARIABILIDAD HIDRODINÁMICA EN LOS CANALES DEL SISTEMA LAGUNAR MAGDALENA – ALMEJAS"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: msaldivarr@ipn.mx ozaytsev@ipn.mx
 Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

MANUEL SALDÍVAR REYES

nombre y firma

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Politécnico Nacional (IPN).

A la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN por el apoyo financiero a los proyectos 20.01, 20031396, 20040172. La información obtenida a través de estos proyectos es la base para la realización de este trabajo.

Al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del IPN (CICIMAR).

Al CONACYT por su apoyo económico.

Al Dr. Oleg Zaitsev por su valiosa aportación como director de este trabajo.

A los miembros del comité de tesis: Dr. Rogelio González Armas, Dr. Eugenio Choumiline, Dr. Silverio López López y Dr. Oscar Holguín Quiñónez por su paciencia en la revisión del trabajo, por sus comentarios y sugerencias para mejorar la calidad de la tesis.

Al Dr. Sergio Troyo Diéguez especialmente por su ayuda y por su amistad.

Al Dr. Orzo Sánchez Montante por su colaboración en los proyectos de la investigación.

Al M. en C. Cuauhtémoc Turrent Thompson por elaboración de los programas en Matlab y elaboración de algunas figuras.

A todos los compañeros y amigos que me brindaron su apoyo para realización de este trabajo.

RESUMEN

Uno de los problemas más importantes de oceanología costera es el comportamiento hidrodinámico en el desarrollo de los ecosistemas costeros, asuntos del transporte de sedimentos y contaminantes. La región que comprende Bahía Magdalena se caracteriza por tener intensos procesos hidrodinámicos que generan cambios sustantivos en la morfología y en los ecosistemas marinos. Este trabajo está orientado a la evaluación experimental de la variabilidad de corto plazo (con periodos de horas a días) de las corrientes en la zona de la boca y canales principales de Bahía Magdalena con el fin de evaluar el comportamiento de marea y los efectos relacionados.

En el periodo de 2000 a 2003 se llevaron a cabo cinco salidas al campo para estimar el rango de las intensidades de las corrientes en la capa del fondo en los canales principales del sistema (las bocas, el Canal San Carlos y el Canal Gaviotas), estudiar la estructura espectral de sus componentes y determinar su variabilidad intermareal. Los objetivos adicionales fueron: (1) estudiar el comportamiento del oleaje en la boca principal y (2) evaluar la intensidad de mezcla turbulenta en los canales principales de Bahía Magdalena, especialmente en el canal Gaviotas.

Los resultados muestran que las velocidades de las corrientes en la boca principal durante la marea viva (hasta 0.6 m/s en flujo/reflujo) fueron 2.5 veces mayores que las corrientes de marea muerta en los máximos de flujo/reflujo. Las intensidades de las corrientes en los canales del interior del sistema alcanzaron en promedio 0.3 m/s con fluctuaciones de hasta 0.15 m/s. Las fluctuaciones registradas en la boca de Bahía Magdalena fueron en magnitud menores respecto de las que se presentaron en los canales del interior.

La estadística básica del oleaje en la boca principal de Bahía Magdalena muestra alturas significantes de 0.6 a 1.1 m., con periodos significantes de 9 a 18 segundos. Las corrientes producidas por el oleaje alcanzaron una velocidad aproximadamente de 0.5 m/s.

ABSTRACT

One of the problems most important in coastal oceanography it is the hydrodynamic behavior in the development of the coastal ecosystems, to explain the transport of sediment and Contaminants. The region of Magdalena Bay is characterized by intense hydrodynamic processes that generate important changes in the morphology and marine ecosystems. This work this guided to the experimental evaluation of the variability of short term (with periods of hours to days) of the currents in the area of the mouth and main channels of Magdalena Bay with the purpose of estimate the tide behavior and the relative effects.

In the period of 2000 at 2003 were carried out five campaigns in the field to evaluate the range of the intensities of the currents in the layer of the bottom in the main channels of the system (the mouth, the channel San Carlos and the channel Gaviotas), to study the spectral structure of their components and to determine their intertidal variability. The additional objectives are (1) to study the behavior of the surf in the main mouth and (2) to evaluate the intensity of turbulent mixture in the mains channels of the Magdalena Bay, especially in cannal Gaviotas.

The results show that the intensities of the currents in the main mouth during spring tide (up to 0.6 m/s in flood/ebb) they were 2.5 times bigger than the currents neap tide in the maxima of flood/ebb. The intensities of the currents in the channels of the interior of the system reached 0.3 m/s on the average with fluctuations of until 0.15 m/s. The fluctuations registered in the mouth were in magnitude minor regarding those that were presented in the channels of the interior.

The basic statistics of waves in the main mouth of Magdalena Bay show significant high of 0.6 at 1.1 m whit significant periods of 9 at 18 seconds. The currents generate for the reached a intensity approximately of 0.5 m/s.

INDICE

Capítulo 1. Introducción

1.1. Justificación.	8
1.2. Descripción del área de estudio.	9
1.3. Objetivos y metas.	11
1.4. Hipótesis.	12
1.5. Estado del arte sobre la hidrodinámica de Bahía Magdalena-Bahía Almejas . . .	12

Capítulo 2. Materiales y métodos de la investigación

2.1. Materiales y equipo.	20
2.2. Tratamiento de los datos hidrodinámicos.	22

Capítulo 3. Resultados del estudio

3.1. Variabilidad temporal de las corrientes en los anclajes de correntímetros	24
3.2. Estructura vertical de las corrientes en los canales (datos de ADCP).	46
3.3. Efectos de turbulencia en el Canal Gaviotas.	53
3.4. Evaluación del oleaje en la boca principal del sistema.	55

Capítulo 4. Discusión. 61

Conclusiones. 67

Recomendaciones. 68

Bibliografía. 70

Lista de tablas. 74

Lista de figuras. 75

Glosario. 80

Capítulo 1. INTRODUCCION

1.1. Justificación.

El sistema lagunar Bahía Magdalena-Bahía Almejas (BM-BA) es uno de los ecosistemas costeros mexicanos, que resulta ser de gran importancia para el desarrollo socioeconómico regional (Mathews, 1975), no sólo por su considerable extensión sino también por la alta productividad que prevalece durante la mayor parte del ciclo anual (Nienhuis y Guerrero, 1985; Garate y Siqueiros, 1998). Un factor primordial de evolución de los ecosistemas costeros es la variación de los flujos de los elementos, que afectan la productividad primaria del sistema, especialmente, de nutrientes y material biológico (plancton, micronecton, etc.). El transporte de estas sustancias, así como de los contaminantes y el material suspendido, depende de las condiciones hidrodinámicas moduladas por el viento y, especialmente, por la marea. En cuerpos de este tipo las características fisicoquímicas y ecológicas son influenciadas por la marea en las bocas y canales que a su vez determinan el balance hidrodinámico entre los elementos del sistema lagunar y la zona oceánica adyacente (Contreras y Casillas, 1992). Debido a la importancia que tienen los procesos del transporte de masa en la determinación de la distribución del material disuelto o en suspensión, tales como la concentración de nutrientes, poblaciones de larvas, parches de fitoplancton entre otros, se tiene interés en el análisis de las corrientes en los canales e intercambio de masa entre los diferentes cuerpos del sistema lagunar BM-BA. La estimación de estos efectos en la circulación hidrodinámica en el interior del sistema lagunar aporta una base física de conocimiento que ayuda al entendimiento de la gran variedad de los estudios interdisciplinarios que se desarrollan actualmente para el mejoramiento del ecosistema y protección del ambiente marino en la región de estudio.

1.2. Descripción del área del estudio.

Bahía Magdalena (BM) se encuentra al NW de La Paz en la costa del Pacífico, entre las coordenadas latitudes Norte 24.3° y 25.3° y longitudes Oeste 111.5° y 112.2° (Fig.1).

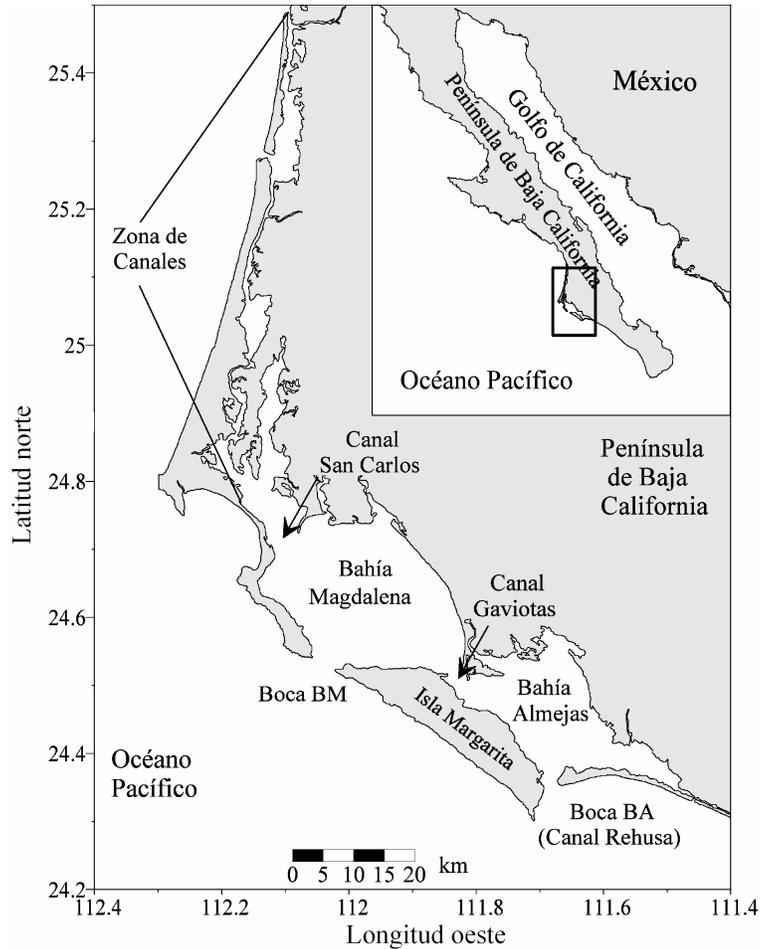


Figura 1. Localización geográfica y la toponimia relativa al sistema lagunar BM-BA.

Se divide en tres zonas perfectamente diferenciadas: a) la zona noroeste, de forma irregular, compuesta por una gran cantidad de esteros, lagunas y canales con profundidades promedio de 3.5 m.; b) la zona central denominada propiamente Bahía Magdalena, comunicada con el océano a través de una boca de 5.8 Km.; y c) la zona sureste, llamada Bahía Almejas, conectada con mar abierto a través de una boca con profundidades muy

someras (Álvarez-Borrego et al., 1975). BM es una laguna costera poco profunda, cerca de la boca que comunica con el Océano Pacífico tiene aproximadamente 40 m de profundidad, y en la parte Norte menos de 5 m.

BM en la parte SE tiene comunicación por medio del canal Gaviotas, con Bahía Almejas (BA), en la parte Oeste de BM se encuentra el Puerto de Magdalena con playas de poca pendiente y arena de grano fino y mediano. En esta área normalmente soplan vientos del NW y esta zona se caracteriza por tener playas arenosas extendidas con aguas tranquilas. En la margen Norte de BM se encuentra el puerto de San Carlos y una zona extensa de manglares, es interesante hacer notar que por medio del Canal San Carlos, las embarcaciones mayores tienen comunicación con el puerto. La diferente morfología que existe se debe a regímenes de energía de mareas, corrientes y oleaje. La batimetría de BM se encuentra en la Figura 2.

BM corresponde a la zona costera de una región de clima desértico semiárido. La precipitación anual es prácticamente despreciable (menos de 14 mm) (Alvarez Borrego et al., 1975) estableciendo al sistema lagunar el carácter de cuerpo costero semicerrado de evaporación.

Los vientos superficiales registrados durante los diferentes cruceros realizados en una región extensa a lo largo de la costa pacífica de la Península de Baja California, muestran 2 áreas con un régimen de viento diferente: una enfrente de Bahía San Hipólito donde el viento sopla entre las direcciones Oeste-Este y Norte-Sur. La segunda zona, comprendida entre BM-BA y Cabo San Lucas, no define un patrón de vientos de frecuencia estable, presentando una alta variación en dirección e intensidad. El patrón principal de los vientos indica que el 67% de la incidencia de los mismos, está localizado en el cuarto cuadrante (del Oeste al Norte) con vientos reinantes de 5 m/s y máximos de 15 m/s (García Escobar, 1992).

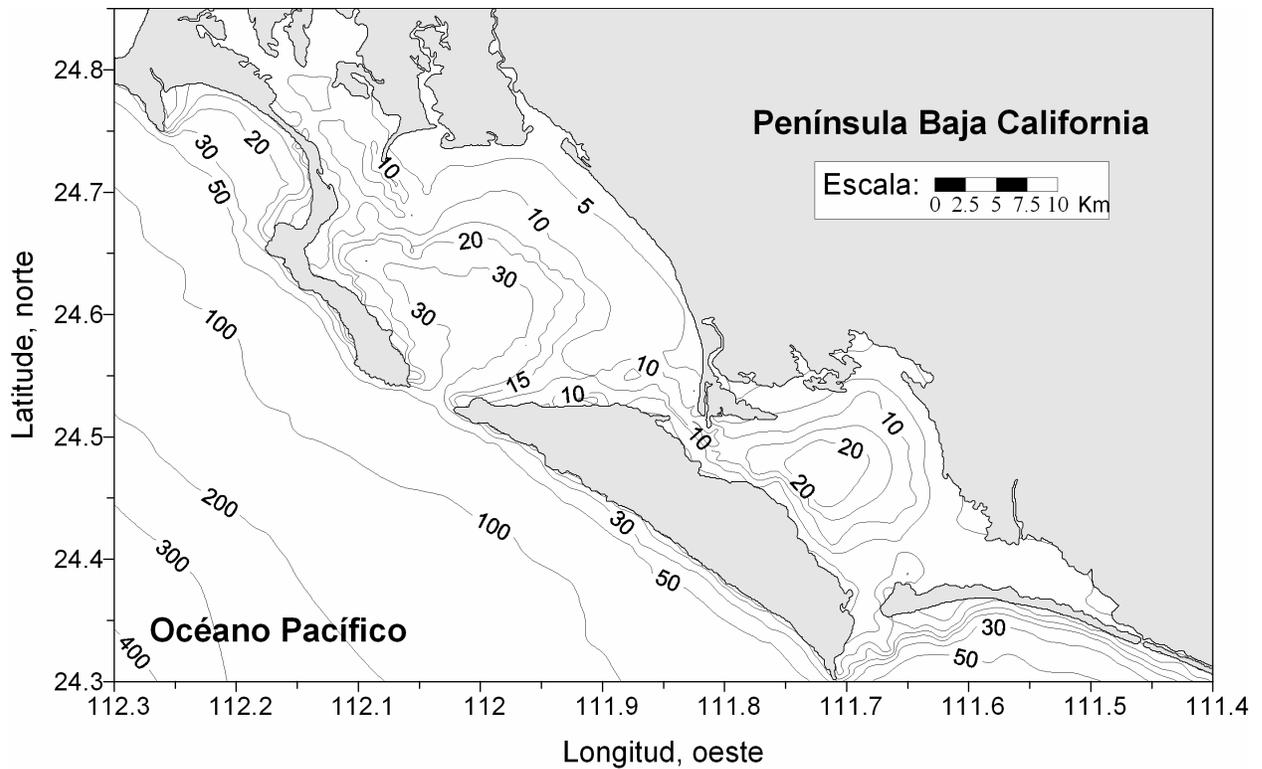


Figura 2. Batimetría de Bahía Magdalena. Datos obtenidos de la Carta de Navegación, US NAVY y de la base de datos ETOPO2.

1.3. Objetivos y metas.

El **objetivo principal** de la investigación fue estudiar experimentalmente la variabilidad a corto plazo (con periodos de horas a días) de las corrientes y parámetros del oleaje en la zona de la boca y canales principales de Bahía Magdalena con el fin de cuantificar el comportamiento de marea y oleaje.

Las metas del estudio fueron:

1. Evaluar el intervalo de las intensidades de las corrientes de marea en la capa del fondo de los canales principales de Bahía Magdalena (boca principal, canal San Carlos y canal Gaviotas).

2. Estudiar la estructura espectral de las componentes de las corrientes para determinar su energía y variabilidad intermareal.
3. Estudiar el comportamiento del oleaje en la boca principal, su variabilidad y componentes espectrales.
4. Evaluar la intensidad de mezcla en los canales principales de Bahía Magdalena.

1.4. Hipótesis.

Como se ha mencionado, la región que comprende BM se caracteriza por tener intensos procesos hidrodinámicos que generan cambios en la morfología y en los ecosistemas marinos.

Las hipótesis que consideramos relevantes para el desarrollo de un estudio de este tipo son:

1. El transporte de material disuelto y en suspensión en el agua de mar, en los cuales se incluyen nutrientes y contaminantes, depende de los procesos hidrodinámicos de corto plazo (con periodos menores de un día). Estos procesos pueden formar no solamente el transporte advectivo de material, sino también, aumentar la mezcla turbulenta por la fricción del fondo.

2. El comportamiento del oleaje en la boca principal de la Bahía Magdalena por su carácter no lineal genera corrientes del oleaje (transporte de Stokes) y provoca mezcla vertical intensa la cual elimina la estratificación de las aguas superficiales que entran a la bahía durante el flujo de marea.

1.5. Estado del arte sobre la hidrodinámica de la BM-BA.

Base física del estudio de las corrientes.

Durante las últimas décadas la comunidad científica ha trabajado en el problema de comprender el comportamiento hidrodinámico de los ecosistemas costeros, problemas del

transporte de sedimentos y contaminantes. En relación a su estudio, los procesos hidrodinámicos se caracterizan por las dos formas de presentación del movimiento del agua: la horizontal y la vertical (variaciones del nivel del mar, surgencias y hundimientos). Por su escala espacio temporal las corrientes tienen un rango muy amplio, desde las corrientes generales, que forman la circulación oceánica, hasta las locales, que afectan a una zona muy pequeña.

Por su mecanismo energético las corrientes se clasifican en: corrientes inducidas por el viento, corrientes de marea, corrientes de densidad y corrientes producidas por oleaje. Las corrientes costeras son más complejas porque se forman con la superposición de las anteriormente mencionadas (Dietrich et al.,1980). Aunque las corrientes también pueden analizarse por las condiciones termohalinas del agua que se mueve, si tomamos en cuenta la temperatura, se clasifican en corrientes calientes y frías; en relación a la salinidad tienen su propia variabilidad, esto es de gran importancia para el comportamiento biológico.

Las causas que originan las corrientes oceánicas de gran escala son esencialmente tres: el viento, el gradiente de la superficie del mar y distribución de masa (estructura termohalina) (Drake & Knauss,1978). El viento es el principal causante generador de la corriente porque provoca el arrastre del agua superficial del mar, la cual involucra el movimiento de las capas más profundas por un efecto de viscosidad interna y la fuerza de Coriolis según de la teoría clásica de Ekman (Phillips, 1977).

El gradiente de la superficie se forma por las divergencias y convergencias de las corrientes superficiales de viento y por la no uniformidad de la presión atmosférica (Knauss, 1978). Las corrientes de densidad están determinadas por las diferencias espaciales de los

parámetros termohalinos de las masas de agua, los cuales son su temperatura y salinidad. Algunas corrientes presentan componentes en el plano vertical.

Las corrientes provocadas por la marea no juegan un papel importante en la formación de la circulación global oceánica, pero son muy importantes en la zona costera, especialmente en los cuerpos semicerrados de agua, como el sistema lagunar Magdalena-Almejas, en donde la comunicación con el mar abierto está relativamente restringida. Las corrientes de mareas en estas áreas pueden ocasionar problemas de diversa índole, como puede ser el transporte de sedimentos, transporte de contaminantes, etc. (Abbot y Price, 1994).

Un proceso hidrodinámico muy importante en la zona costera es el del oleaje y las corrientes producidas por oleaje, como un efecto no lineal en la teoría de las ondas, llamado el transporte de Stokes (Dean y Dalrymple, 1993). La importancia de las corrientes producidas por el oleaje es fundamental ya que son las que originan y regulan, en su mayor parte, el movimiento de los sedimentos costeros. En función de la dirección de su movimiento estas corrientes se subdividen en corrientes normales a la costa y corrientes paralelas a la costa.

Las corrientes normales a la costa pueden tomar dos formas. La primera se denomina resaca y se manifiesta como un flujo difuso que inicia en la cara de la playa desplazándose próximo al fondo hacia mar adentro a lo largo de casi toda la playa, y la segunda forma se denomina corriente de retorno y se presenta en forma de chorro concentrado, atravesando la línea de rompientes para expandirse luego. Las corrientes de retorno presentan gran dificultad para su análisis, dada su movilidad y los múltiples parámetros que en ella intervienen, como son: la topografía del fondo, la interacción entre las olas y las corrientes, etc. (Frias y Moreno, 1988).

Las corrientes paralelas a la costa ocurren cuando el oleaje incide formando un cierto ángulo con ella, es decir oblicuamente, bien sea debido a la refracción que sufre en su acercamiento o por la dirección con que fue generado; debido a ello se formará una corriente paralela a la costa. Se considera que esta corriente es la principal responsable de transportar a los sedimentos a lo largo de la costa, una vez que el sedimento ha sido puesto en suspensión por el rompimiento de la ola.

Todos los tipos antes mencionados de las corrientes costeras tienen el rango pequeño de períodos (como los de marea), pero afectan en forma casi permanente. Este trabajo está orientado a la evaluación euleriana (marco de referencia fijo) de la variabilidad temporal de las corrientes de este rango y el comportamiento del oleaje en BM.

Antecedentes del estudio hidrodinámico del sistema BM-BA.

Se encuentran relativamente pocos estudios del ambiente hidrofísico e hidroquímico en la literatura de BM. Álvarez-Borrego et al. (1975) registraron en el periodo de octubre de 1973 hasta agosto de 1974, temperaturas y salinidades más elevadas que en el mar abierto adyacente, mostrando una estructura del campo termohalino cuyos gradientes están relacionados con la batimetría. Adicionalmente, Acosta y Lara (1978) observaron un ciclo de variación diurna de los parámetros termohalinos, durante la primavera de 1976 en la boca principal de BM, encontrando que la salinidad muestra una fuerte correlación con el ciclo de marea, registrando los valores máximos durante el reflujó y los mínimos durante el flujo. Y dado que las zonas Noroeste y Sureste de la Bahía dejan al descubierto una buena cantidad de espacios durante las mareas bajas, se presenta un comportamiento local antiestuarino durante todo el año (Álvarez-Borrego et al. 1975), por lo que la dinámica de las mareas influye

significativamente en el comportamiento termodinámico en la región. Hernández Trujillo et al. (1997) mediante un análisis estadístico mostraron una correlación significativa de la marea con la temperatura superficial.

Por lo que respecta a la hidroquímica de la región, Álvarez-Borrego et al. (1975) mencionan que los procesos de advección hidrodinámica y la intensa actividad fotosintética afectan la distribución superficial de oxígeno (sobresaturación) disuelto de la zona cercana a la boca de BM. Por su parte, los nutrientes por lo general se presentan en altas concentraciones en las aguas de fondo y cercanas a la costa, y las mas bajas en las aguas superficiales alejadas de la costa. De hecho, el comportamiento de los nutrientes está determinado principalmente por la intensidad de las corrientes presentes a lo largo de la costa occidental de Baja California Sur y por las surgencias que en su temporada de mayor intensidad aumentan considerablemente su contenido. Particularmente, se ha observado en el caso de los fosfatos y silicatos, sus concentraciones tienen una relación inversamente proporcional con la temperatura (Bernal, 1979).

Lluch-Belda et al. (2000) analizaron la variabilidad espacial y temporal de la temperatura superficial en el interior del sistema lagunar a partir de las mediciones obtenidas durante el periodo 1981-1998 añadiendo los datos publicados con anterioridad. Los autores incluyen una descripción del escenario térmico que prevaleció durante el evento climático de El Niño de 1998.

Los diferentes autores mencionan que el régimen de mareas en Bahía Magdalena es mixto semidiurno. Los valores estadísticos de la marea (UNAM, 1985) indican que el nivel de la pleamar media superior es de 0.83 m, mientras que el nivel de la bajamar media inferior es de -0.87 m; la pleamar máxima registrada es de 1.56 m mientras que la bajamar mínima es de

-2 m. La amplitud de cada una de las componentes armónicas principales se enlista en la Tabla 1.

Tabla 1. Amplitud de las componentes armónicas principales de la mareas resueltas con base en las mediciones del mareógrafo en el puerto San Carlos BCS, (112.12°W, 24.79°N), durante el periodo Enero 1974-Diciembre 1976

Componente armónica de la marea		Periodo [hrs]	Amplitud [m]	Varianza explicada, %
Lunar Semidiurna	(M2)	12.42	0.55	37
Solar Semidiurna	(S2)	12.00	0.32	21.5
Lunar Diurna Decl.	(K1)	23.94	0.27	18.1
Lunar Diurna Decl.	(O1)	25.82	0.16	10.7
Lunar Semidiurna	(N2)	12.66	0.11	7.4
Rango de Marea			2.82	

En la literatura existen tan solo unos cuantos estudios publicados sobre la hidrodinámica y las corrientes en BM. (Obeso et al.1999) realizaron una simulación numérica de la circulación de las mareas utilizando un modelo numérico hidrodinámico barotrópico, realizado en diferencias finitas y comparado con mediciones de campo de variaciones de nivel del mar y velocidades de corrientes en un punto cerca de la boca principal. Encontraron que el rango, la forma y secuencia de la marea registrada y la modelada en el sistema lagunar producen corrientes de refluo más intensas que las de flujo; esta característica permite que los canales del sistema lagunar permanezcan profundos y estables.

Morales et al. (2006) describen la circulación en las inmediaciones del sistema lagunar BM-BA mediante un modelo hidrodinámico forzado por mareas, viento y el efecto de la Corriente de California. Realizaron dos experimentos importantes, uno enfocado a detectar zonas de retención en el interior del sistema lagunar y el otro para investigar el intercambio de

partículas entre el sistema y el océano abierto adyacente. Se encontró que las partículas sembradas en el sistema por lo general se quedan dentro y se concentran en regiones particulares que corresponden con la distribución real de bancos pesqueros de recursos bentónicos.

Sanchez Montante (2004) como parte de su tesis doctoral realizó durante los años 2001-2004 el estudio experimental de la estructura termohalina y sus variaciones en el sistema lagunar BM-BA y en la región adyacente del Océano Pacífico. Como parte de modelación numérica, utilizó el modelo hidrodinámico tridimensional ECOM 3D, desarrollado por el grupo DYNALYSIS de la Universidad de Princeton (Blumberg and Mellor, 1987). Los diferentes resultados, experimentales y numéricos, encontrados en esta tesis caracterizan al sistema lagunar BM-BA como un cuerpo de agua costero semicerrado cuya circulación está principalmente modulada por la interacción que mantiene con el mar abierto a través de la dinámica de las mareas. Este mecanismo es el primer factor energético importante para la región. Otro mecanismo energético, que anteriormente no había sido evaluado cuantitativamente en la literatura, es el forzamiento superficial del viento. El forzamiento hidrodinámico a través de las bocas fue evaluado en esta tesis mediante dos maneras: por el registro de las variaciones de nivel en las bocas con un sensor de presión y por las mediciones directas de las corrientes con un ADCP. Adicionalmente, el modelo numérico ECOM-3D fue utilizado como una herramienta principal para investigar las características de la circulación y el transporte de masa en el interior del sistema lagunar BM-BA. Mientras que este trabajo alcanzó un buen progreso en el entendimiento de los procesos energéticos que pueden forzar la circulación hidrodinámica dentro del sistema lagunar, faltó el análisis estadístico en relación a

las mediciones Eulerianas de las corrientes mediante los anclajes de correntímetros en los canales del sistema lagunar, y mediciones del oleaje en la zona de la boca principal.

Los últimos problemas forman el objetivo de la presente tesis.

Capítulo 2. MATERIALES Y MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN.

2.1. Materiales y equipo.

En la presente tesis se analizaron los datos oceanográficos obtenidos por medio de las mediciones directas de corrientes en el campo, variaciones de nivel del mar y parámetros termohalinos (temperatura y conductividad) con el uso de los corrientímetros anclados; perfiladores acústicos ADCP por sus siglas en inglés (Acoustic Doppler Current Profiler) y CTD. Los datos de batimetría y de línea de costa fueron obtenidos de la base de datos ETOPO2 (está disponible en Internet: www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html) y mapas de navegación (Centro Hidrográfico/Topográfico de U.S.A. NAVY, Mapa de Bahía Magdalena, No.21121, 1971).

Mediciones directas en el campo. Con el propósito de evaluar las corrientes en los canales principales del sistema lagunar BM-BA las mediciones de las variables hidrodinámicas (velocidad y dirección de corrientes, temperatura y salinidad), se llevaron a cabo durante 5 campañas en el periodo de 2000 a 2003. Las fechas en que estas salidas se realizaron son las siguientes:

- 1) 4-7 de Abril del 2000 con ADCP y corrientímetro;
- 2) 20-23 de Febrero del 2001 con ADCP y corrientímetro;
- 3) 13-16 de Noviembre del 2001 con ADCP y corrientímetro;
- 4) 21-23 de Mayo del 2002 con ADCP y corrientímetro;
- 5) 19-23 de Marzo del 2003 con ADCP y corrientímetro.

En cada campaña se realizaron anclajes de corrientímetros, olografos y sondeos acústicos con ADCP SonTek de 1.5 MHz en los canales del sistema. La cantidad de estaciones de medición por instrumento que fue considerada en cada campaña oceanográfica se enlistan en la tabla 2.

Tabla 2. Número de estaciones de medición realizada en cada campaña oceanográfica.

CAMPAÑA	Correntímetros, instalados	ADCP, perfiles	Embarcaciones
Abril 2000	4	7 (boca)	1 panga
Febrero 2001	3	5 (boca)	2 pangas
Noviembre 2001	3	5 (boca)	2 pangas
Mayo 2002	3	3 (boca)	2 pangas
Marzo 2003	3	14 series de perfiles	B/O “El Puma” y 1 panga

En las bocas del sistema y canales fueron instalados correntímetros “Interocean” S4 y ológrafos duales “Interocean” S4 ADW de 20Mb, con una frecuencia de muestreo máxima de 2 Hz. Estos instrumentos se anclaron en la capa del fondo mediante una base de plomo con los sensores a 0.4 m encima del fondo, por un periodo de tiempo de 3-4 días. La colocación de los anclajes se muestra en la fig. 3. Los tiempos de registro fueron 1 dato cada 5 minutos para los correntímetros y 2 datos por segundo durante 20 minutos de cada hora para los ológrafos. En algunos anclajes, los correntímetros tenían sensores de temperatura y conductividad. Se realizaron dos instalaciones de un correntímetro anclado en la boca de BM durante un periodo mayor a 30 días estos fueron en mayo del 2002 y marzo del 2003.

En las campañas de muestreo en abril del 2000, febrero del 2001 y noviembre del 2001 se realizaron mediciones de las corrientes en la columna de agua con un intervalo de 1 metro, con un perfilador acústico a bordo de una lancha (anclada) en las bocas y canales del sistema. En el marzo del 2003 se midieron las corrientes en un transecto a través de la boca de BM con un perfilador acústico “SonTek” 0.2 MHz instalado a bordo del B/O “El Puma”, de la UNAM.

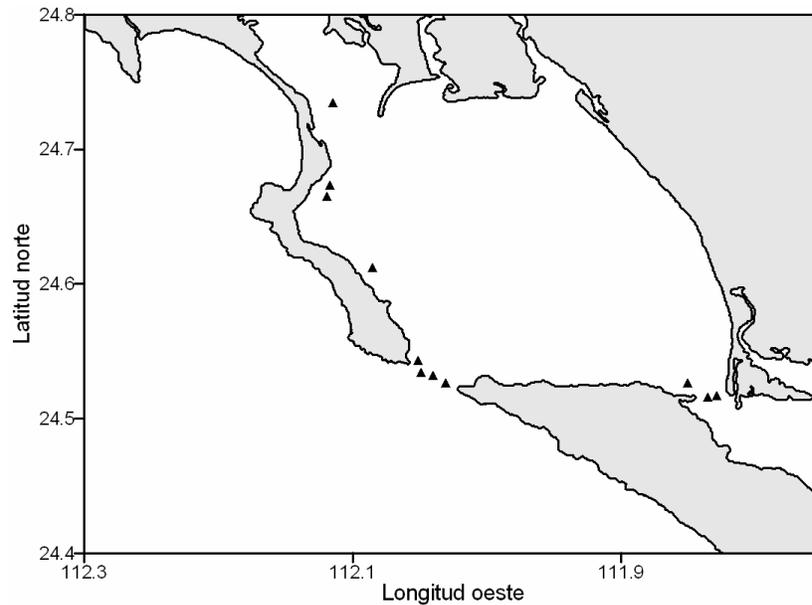


Figura 3. Localización de los anclajes de correntímetros , realizados en 2000-2003.

2.2. Tratamiento de los datos hidrodinámicos.

Las técnicas de análisis utilizadas para el tratamiento de las series de tiempo obtenidas por medio de los correntímetros y ológrafos anclados fueron la descomposición de las series de tiempo en armónicos y tendencia, elipses de marea, descomposición espectral y estimación de la excursión de la marea (Emery and Thomson, 1997). A todas las series obtenidas se le aplicó el análisis espectral (Vettering et al., 1992). Antes de calcular los espectros de energía, a todas las series se les aplicó un filtro numérico de paso alto para eliminar las tendencias y las componentes no estacionarias en las mismas (Otnes and Enochson, 1978). Para calcular los espectros con base en periodogramas se usó el filtro de Parzen. Todas las transformaciones y cálculos se efectuaron con los paquetes “Mesosaur” y “StatGraphics”.

A partir de las series de tiempo largas en las campañas de mayo del 2002 y marzo 2003 en la boca BM fue posible señalar en términos medios las fases de cuadratura (marea muerta) y de sicigia (marea viva) del forzamiento de marea.

Figuras y gráficos del presente estudio fueron desarrollados por medio de los paquetes “Surfer” (versión 8), “Grapher” (versión 4) y “MatLab” (versión 6).

A partir de la experimentación en campo realizada en el sistema lagunar BM-BA y la serie de proyectos desarrollados por el grupo de Oceanología del CICIMAR-IPN durante los años 2000-2003, se determinó:

- a) Una caracterización dinámica de la marea (cambios de nivel de la superficie del mar y corrientes asociadas) en los puntos de muestreo;
- b) Una estructura vertical de las corrientes en las bocas y canales del sistema BM-BA;
- c) Una variabilidad de corto plazo de las corrientes en el Canal Gaviotas, relacionada con la mezcla turbulenta intensa;
- d) Una estimación del rango del oleaje en la boca principal de BM.

Capítulo 3. RESULTADOS DEL ESTUDIO.

3.1. Variabilidad temporal de las corrientes en los anclajes de correntímetros.

Los correntímetros fueron instalados en el canal San Carlos, canal Gaviotas y las bocas de BM y BA.

Canal San Carlos. En febrero del 2001 y mayo del 2002 la localización del punto de muestreo fue ubicada cerca de la boya 4 del canal de navegación (Fig.4). En abril del 2000 el aparato fue colocado enfrente a puerto San Carlos.

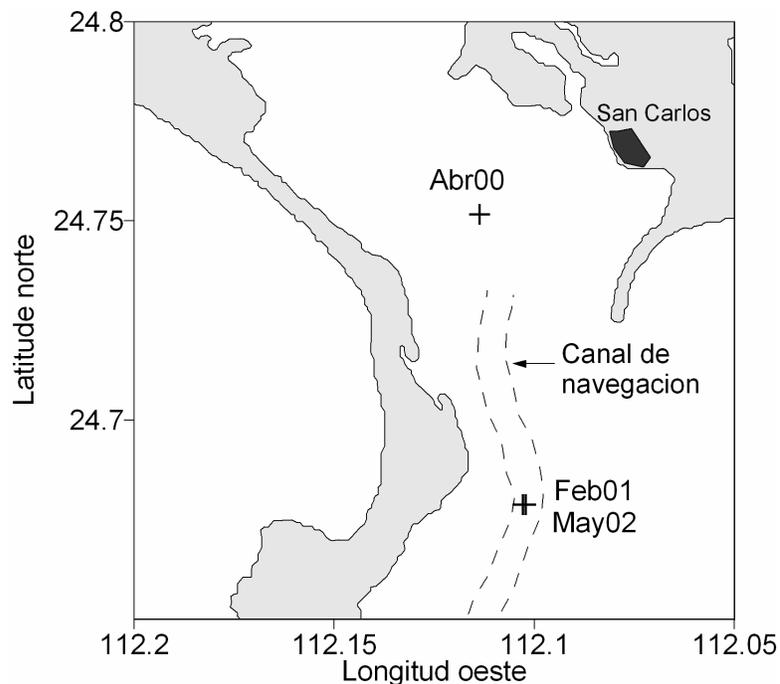


Figura 4. Localización de los correntímetros en la zona del canal San Carlos.

En el 2000 el aparato fue instalado en el periodo del 4 al 7 de Abril en la profundidad de 11 metros en el canal enfrente a puerto San Carlos en la fase de marea viva (Fig. 6a). Este correntímetro fue equipado con sensores de temperatura (T) y salinidad (S).

Las variaciones del nivel del mar y las corrientes se presentan en la Fig. 5.

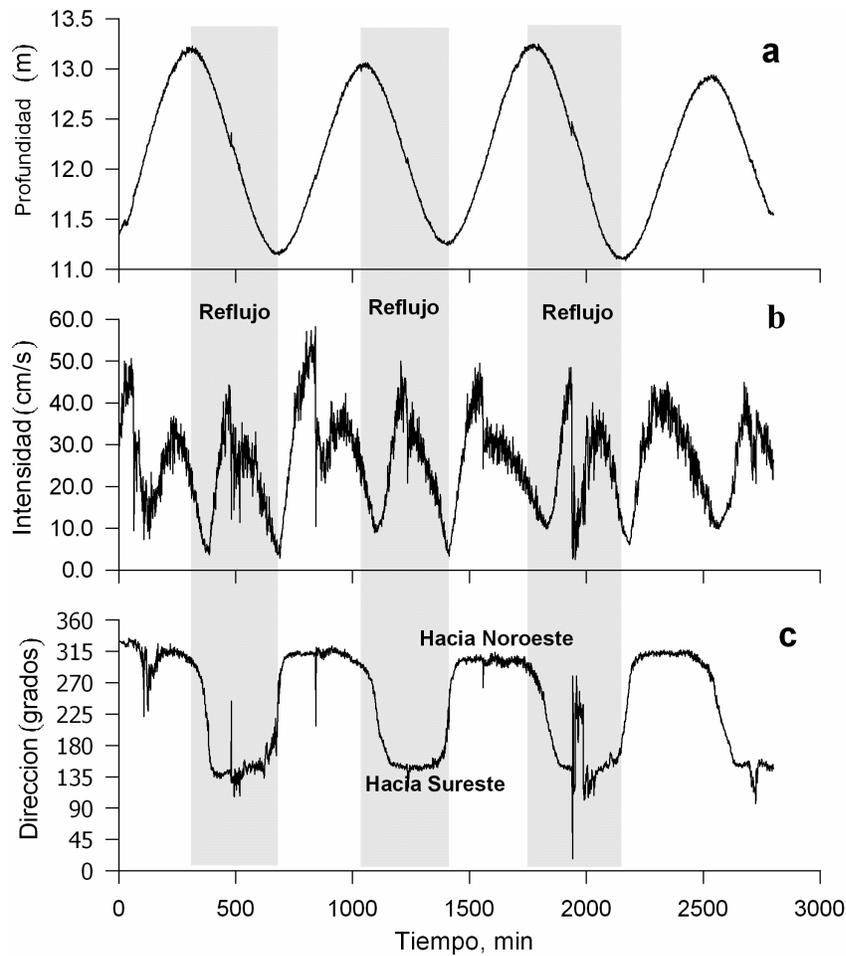


Figura 5. Variaciones de las corrientes enfrente a puerto San Carlos en abril del 2000: (a) variaciones del nivel; (b) la intensidad de las corrientes; (c) la dirección. Las áreas sombreadas indican el reflujo

Las variaciones del nivel del mar y las corrientes en la profundidad de alrededor de 12 metros se presentan en la fig. 5. El panel (a) muestra el comportamiento de marea, el (b) muestra la intensidad de las corrientes, y el (c) presenta la dirección de la corriente. El rango de marea durante las mediciones excedió 2 metros, la intensidad promedio de la corriente fue aproximadamente 35 cm/s (en los picos alcanza 50 cm/s), y la dirección muestra que durante la fase de flujo de marea las corrientes se dirigen al rumbo de 315 ° (hacia el Noroeste), y durante el reflujo de marea en la dirección contraria.

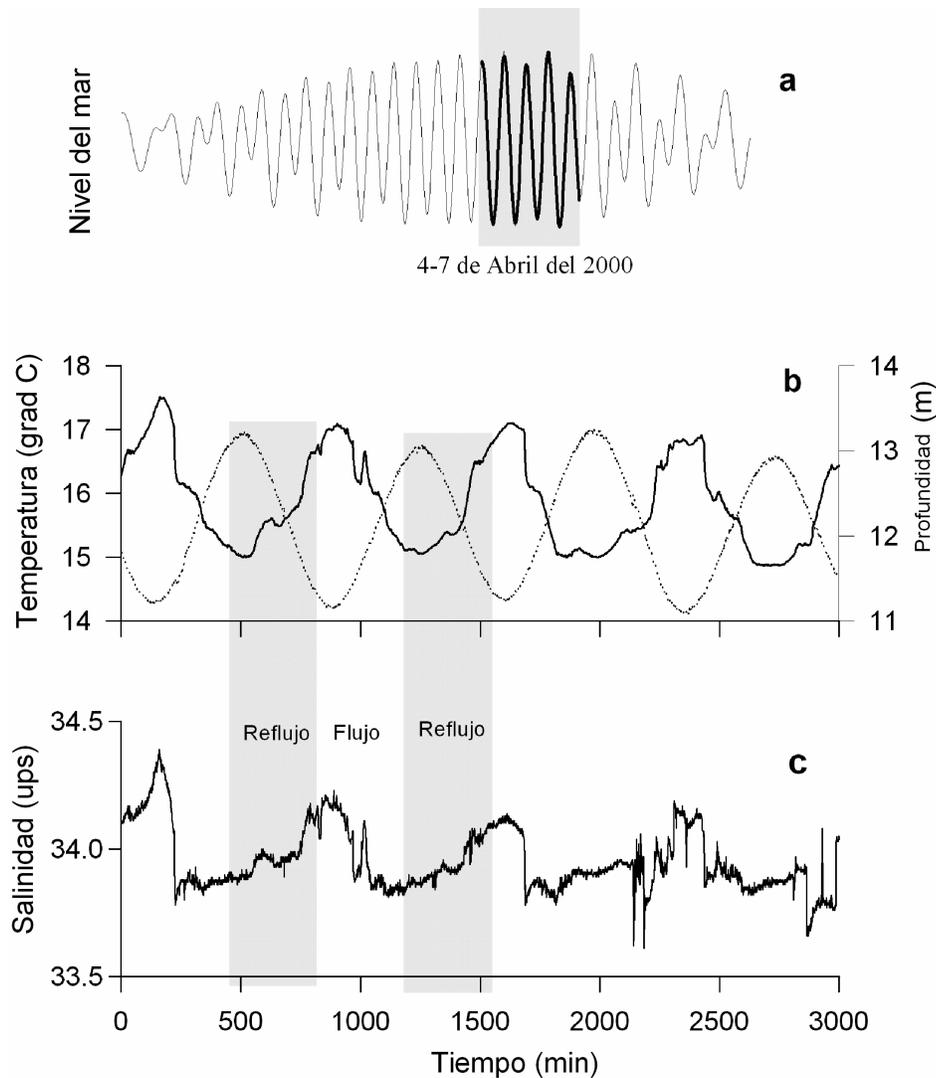


Figura 6. Parámetros de temperatura y salinidad en la zona de San Carlos en abril del 2000: (a) variaciones del nivel del mar; (b) variaciones del nivel del mar (línea punteada) y de la temperatura y (c) variaciones de salinidad.

Las Figs. 6b y 6c muestran las variaciones de temperatura y salinidad, respectivamente. Durante el reflujo de marea la temperatura y salinidad aumentan sus valores, que está relacionado con la salida de las aguas más calientes y de más alta salinidad de la zona de los canales del Norte. Por el contrario, durante el flujo de marea, las aguas con las características más oceánicas entran a esta zona.

En la Fig.7 se presentan el espectro de las variaciones del nivel del mar (a) y la elipse de marea (b). En el espectro de marea se observó un pico relativamente ancho de energía que corresponde al grupo de las constituyentes semidiurnas de marea. Las componentes semidiurnas principales de marea (M_2 , S_2 , K_2 , entre otras) no se resuelven bien por la duración corta de la serie de tiempo.

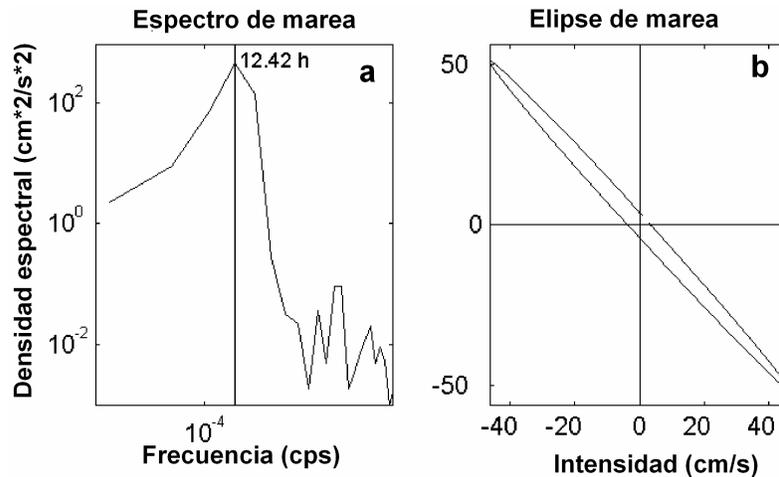


Figura 7. Espectro de energía de las variaciones del nivel del mar (a) y la elipse de marea (b) en abril del 2000, enfrente a puerto San Carlos.

La elipse de marea es muy angosta y muestra un carácter reversivo de las corrientes, que dirigen hacia el Noroeste (flujo de marea) y al Sureste (reflujo). La inclinación del eje mayor de la elipse depende de la orientación del canal de navegación en el punto de medición.

El mismo correntímetro con los sensores de T y S fue instalado en el canal de navegación cerca de la boya 4 (Fig. 4) en el periodo del 21 al 23 de febrero del 2001 que corresponde al periodo de marea viva. Los resultados de las mediciones de corrientes se presentan en la Fig. 8 en forma de vectores, para la dirección e intensidad. Durante el flujo de marea las corrientes fueron dirigidas hacia el Noroeste que corresponde a la orientación del canal de navegación en este lugar.

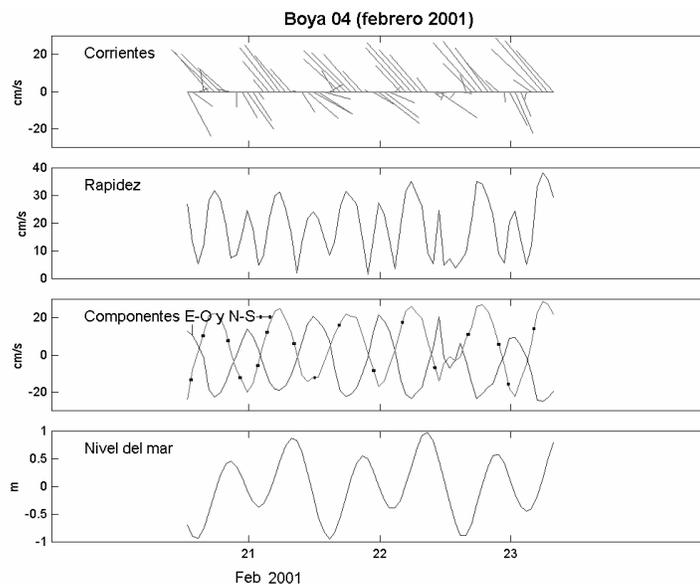


Figura 8. Mediciones de las corrientes en la boya 4 (Canal San Carlos) en febrero del 2001.

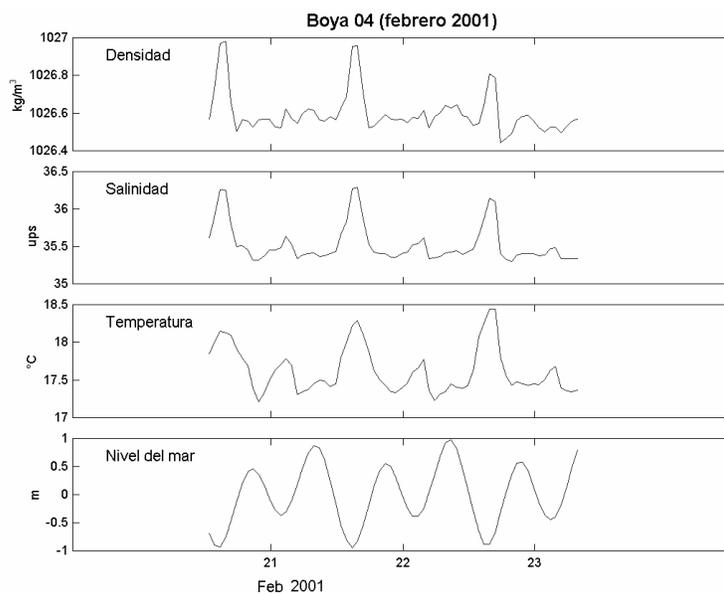


Figura 9. Variabilidad de las componentes termohalinas en la boya 4 (canal San Carlos) en febrero del 2001.

Los máximos valores de T, S y densidad se observan durante los instantes de marea baja, muy parecido a lo que pasó en abril del 2000.

En el periodo del 21 al 23 de mayo del 2002 mediante un ológrafo direccional colocado cerca de la boya No. 4 se obtuvieron los siguientes resultados presentados en la Fig. 10. la intensidad máxima de las corrientes alcanzó el valor de 40 cm/s, la dirección fue al Norte durante el flujo y al Sur durante el reflujo.

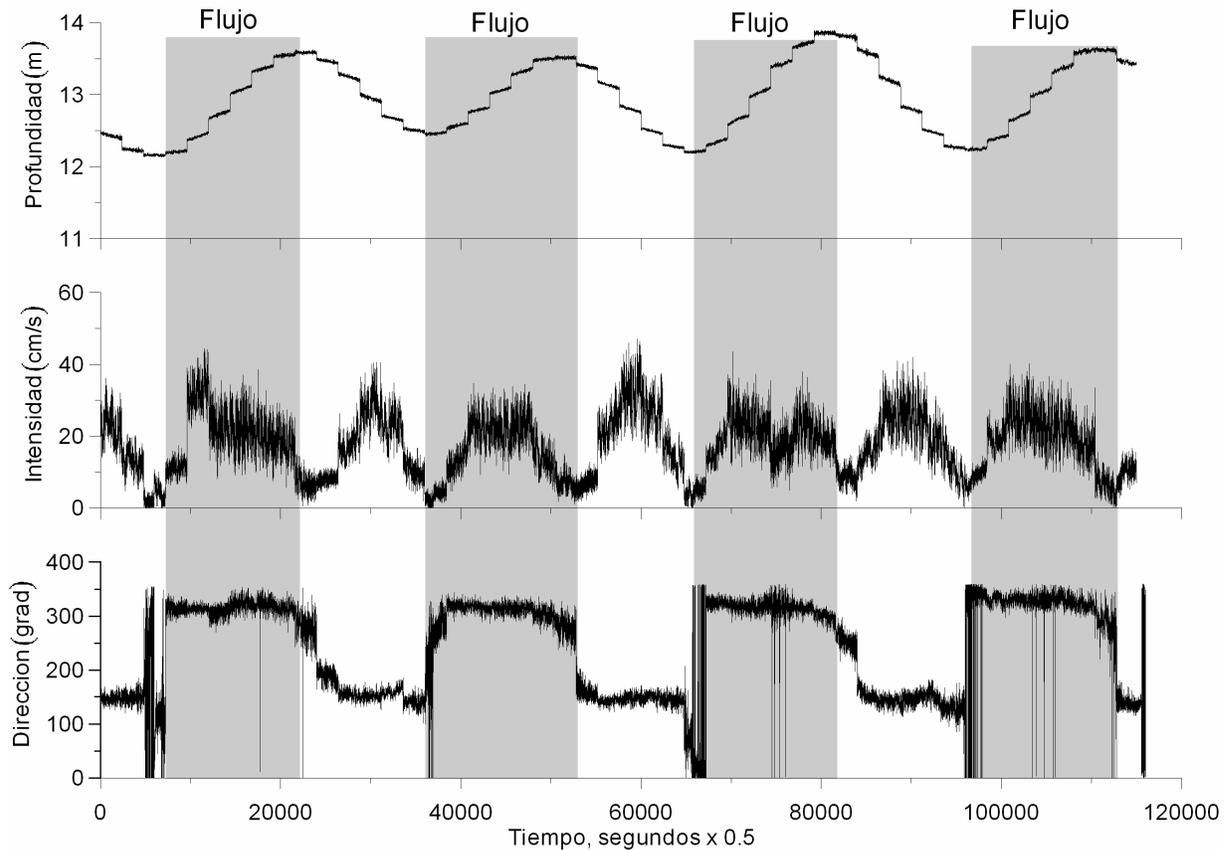


Figura 10. Las corrientes en el Canal San Carlos (boya 4) en mayo del 2002.

Boca principal de Bahía Magdalena.

Se llevaron a cabo cinco instalaciones de los correntímetros autónomos en la boca principal de Bahía Magdalena. La localización de los puntos de muestreo se presenta en la Fig.11.

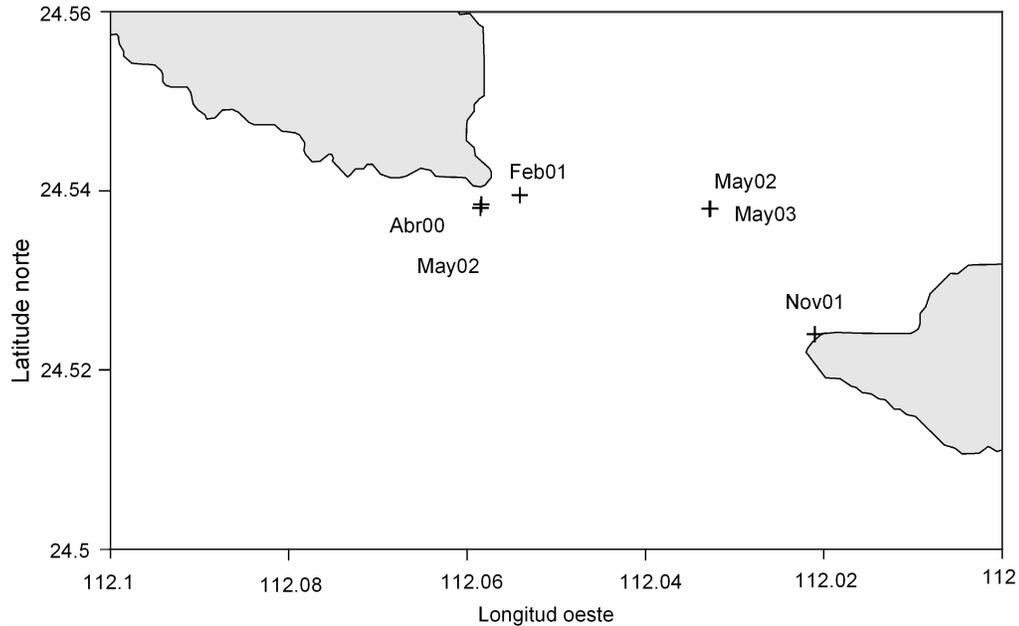


Figura 11. Localización de los puntos de instalación de los anclajes de los equipos en la boca principal de la Bahía Magdalena.

En el periodo del 4 al 7 de abril del 2000 un ológrafo direccional fue instalado en la boca principal de BM en la vecindad de la punta Norte. En este punto de muestreo no se observan las corrientes intensas de marea por efecto de la fricción de fondo y la poca distancia a la costa, y la variabilidad de la intensidad y de la dirección no es tan periódica como en el centro de la boca principal. Las intensidades de las corrientes varían de 0.12 a 0.42 m/s. y la dirección de la corriente no está muy bien definida, tiene un intervalo entre 45° a 300°.

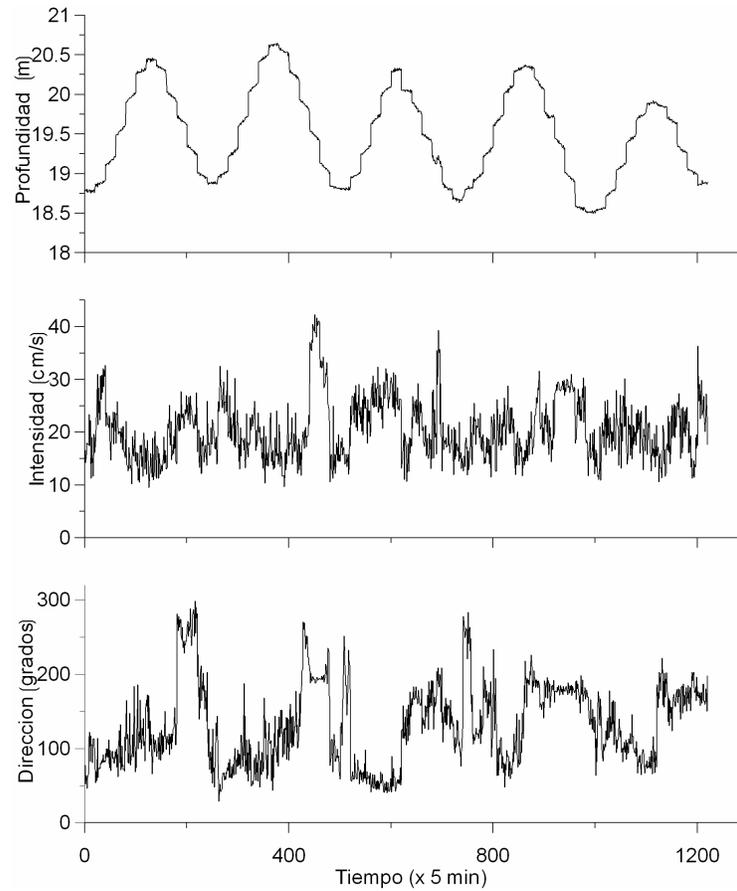


Figura 12. Las corrientes en la parte Norte de la boca principal de Bahía Magdalena en abril de 2000.

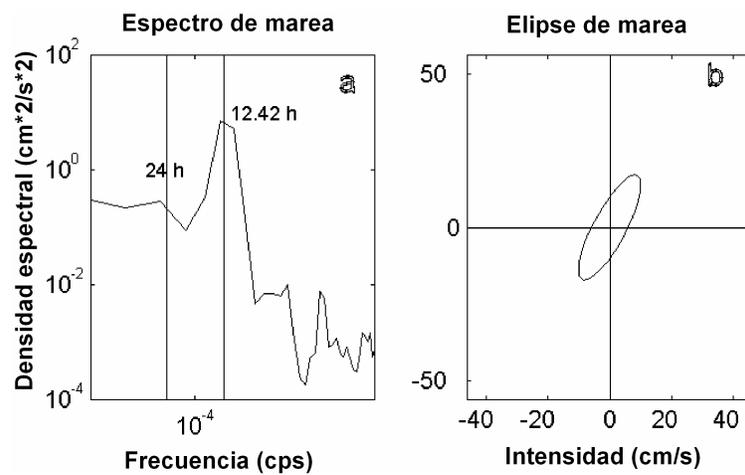


Figura 13. El espectro de energía de las variaciones del nivel del mar (a) y la elipse de la marea (b), en abril de 2000 en la boca de BM.

En febrero del 2001 en la parte Sur de la boca de BM, cerca de Isla Margarita, en la profundidad de 36 metros obtuvimos variaciones de nivel del mar, intensidad y dirección de las corrientes, así como la variabilidad de las T y S que se muestran en la Fig.14.

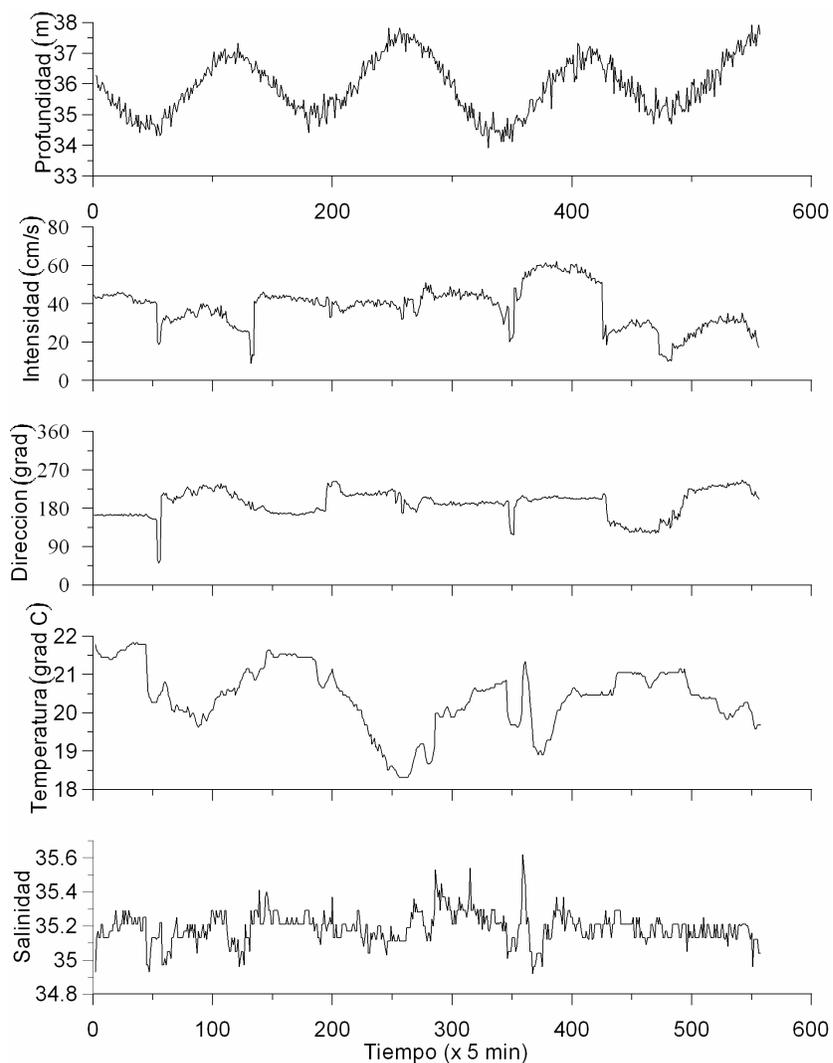


Figura 14. Las corrientes, temperatura y salinidad en la parte Sur de la boca principal de Bahía Magdalena en febrero del 2001.

Es importante constar que en la parte Sur de la boca cerca de la costa de Isla Margarita prácticamente no se encuentra la modulación de las corrientes por el efecto de marea. La única razón que puede explicar esto, es un comportamiento de las corrientes provocadas por el

efecto de viento: durante las mediciones se observó la intensidad del viento del Noroeste de alrededor de 7-8 m/s.

En noviembre del 2001 un correntímetro fue instalado en la parte central de la boca de BM, en la profundidad de 35 metros. Las variaciones de nivel del mar y la presentación vectorial de las corrientes en éste punto se muestran en la Fig.15.

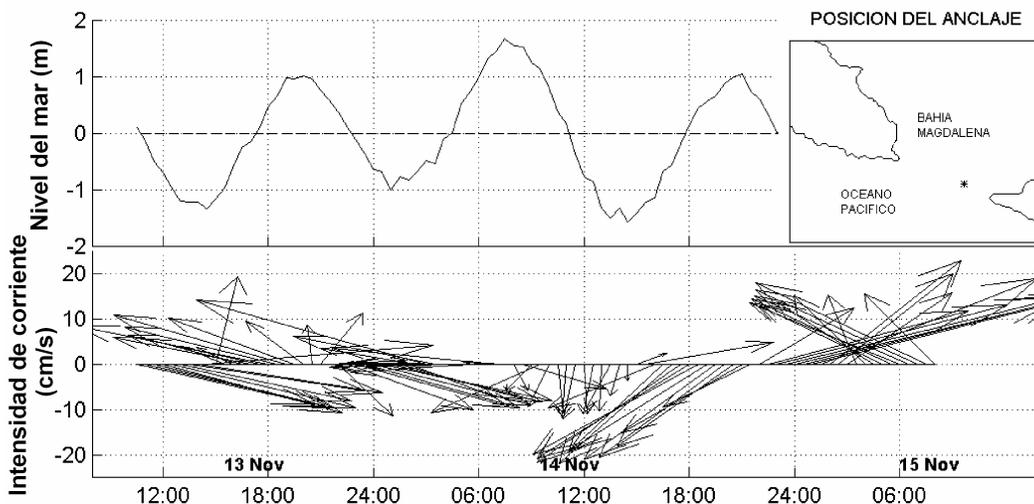


Figura 15. Las variaciones de nivel del mar y los vectores promedio de las corrientes en un anclaje en el centro de la boca principal de Bahía Magdalena en noviembre del 2001.

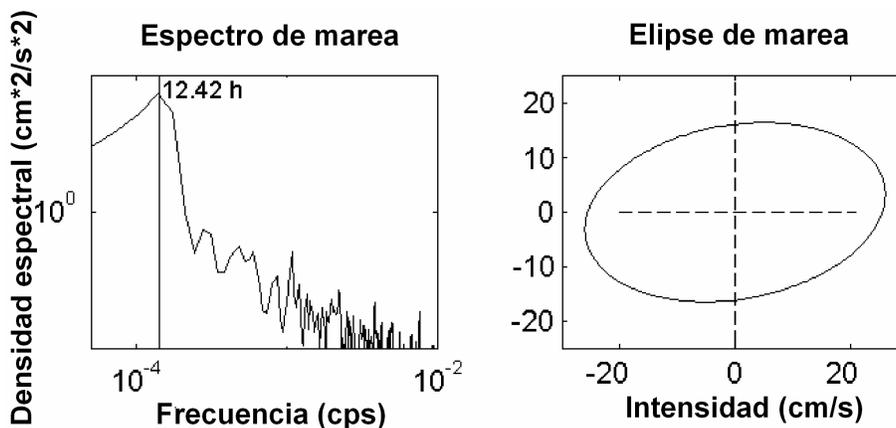


Figura 16. La elipse marea y el espectro energía de las variaciones del nivel del mar en noviembre del 2001 en la boca de BM.

La Fig. 17 nos presenta las variaciones del nivel del mar con un rango de aproximadamente 2 m durante las mareas vivas, temperaturas entre 12.5 y 14.5 °C, salinidades entre 33.7 a 34.4 ups y corrientes con intensidades máximas de 0.5 m/s.

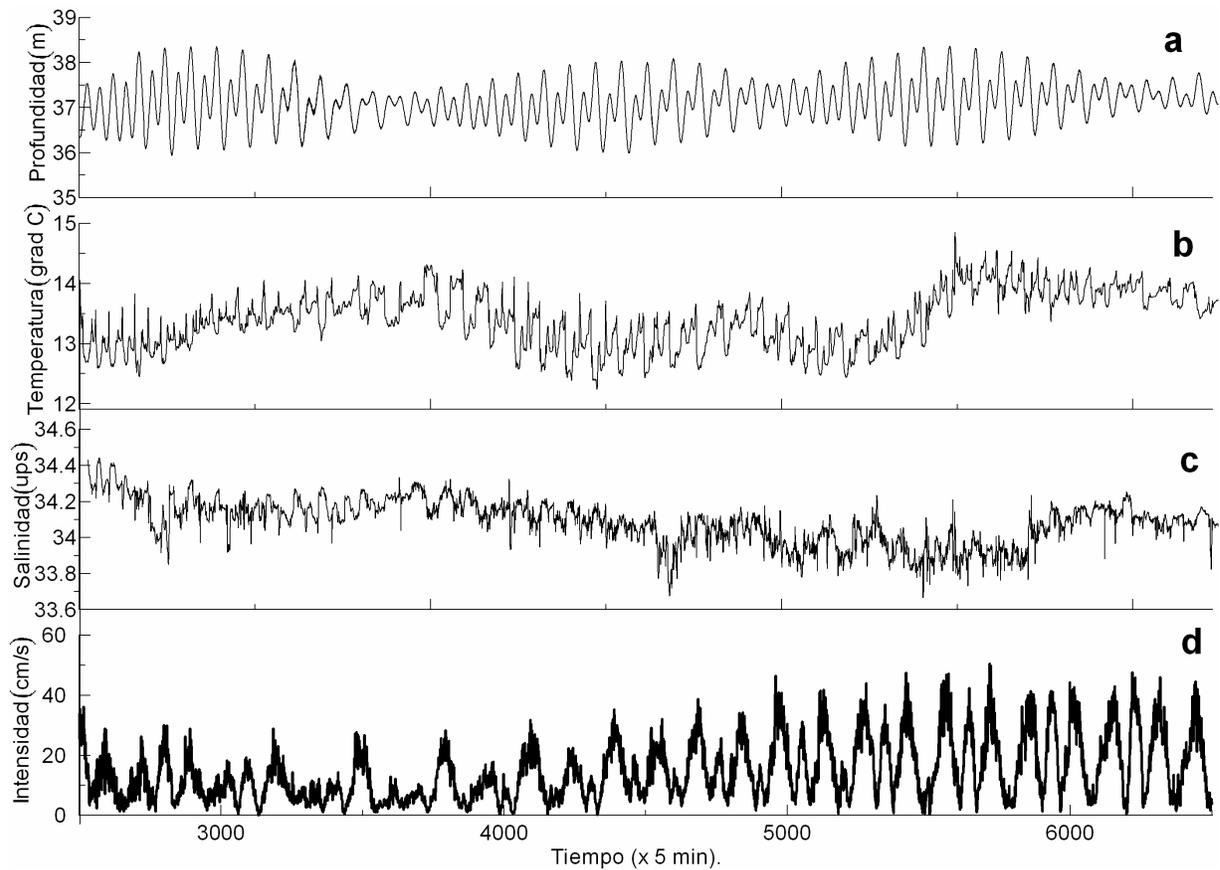


Figura 17. Las variaciones de nivel del mar (a), temperatura (b), salinidad (c) e intensidad de las corrientes (d) en un anclaje de largo plazo, instalado en el centro de la boca de BM en el periodo 21 de mayo - 5 de julio de 2000

Es interesante mencionar que el valor promedio de la temperatura tiene periodicidad del ciclo lunar: durante mareas vivas los valores de la temperatura disminuyen y durante la marea muerta la temperatura aumenta. Parece, que este efecto está relacionado con el intercambio de agua y la mezcla de las aguas del interior y de las oceánicas que son más intensas durante la marea viva.

El espectro energético de la serie de tiempo de las variaciones de nivel del mar (Fig.18) tiene dos picos grandes que relacionan a dos grupos de las constituyentes de marea, diurnas y semidiurnas. La longitud de la serie permite resolver los componentes principales dentro de éstos dos grupos.

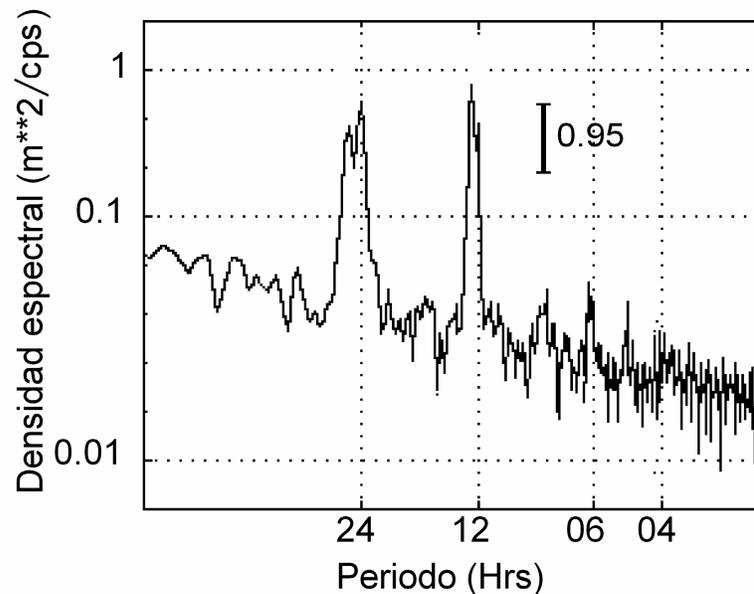


Figura 18. Espectro de energía de las variaciones de nivel del mar para el anclaje de largo plazo, instalado en el centro de la boca de BM en el periodo del 21 mayo al 5 de julio del 2002. La barra vertical muestra un intervalo de confianza para nivel de probabilidad de 0.95.

Para evaluar la variabilidad de los parámetros hidrodinámicos y termohalinos durante un ciclo lunar de marea se compararon dos cortes de la serie de tiempo mostrada en la Fig. 17, un corte durante la fase de marea viva (Fig.19) y otro durante la fase de marea muerta (Fig.20). La comparación de estas figuras muestra que durante la marea viva las corrientes alcanzan 0.5 m/s, mientras que durante la marea muerta alcanzan solamente 0.25 m/s.

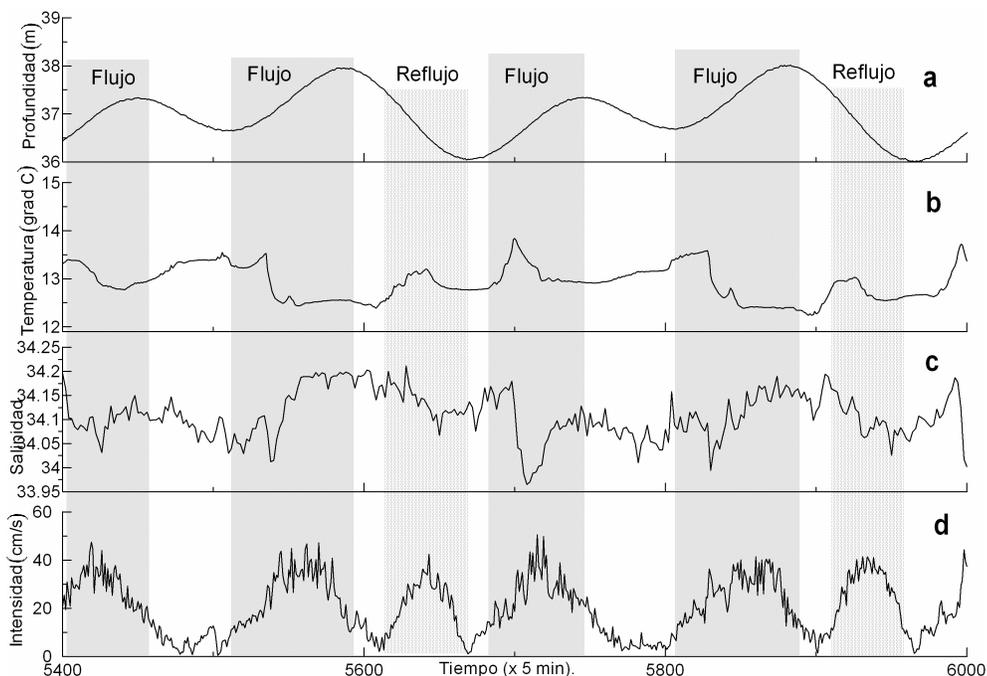


Figura 19. Las variaciones de nivel del mar (a), temperatura (b), salinidad (c) y (d) intensidades de las corrientes en un anclaje de largo plazo durante **la fase de marea viva** en el centro de la boca de BM en el 2002.

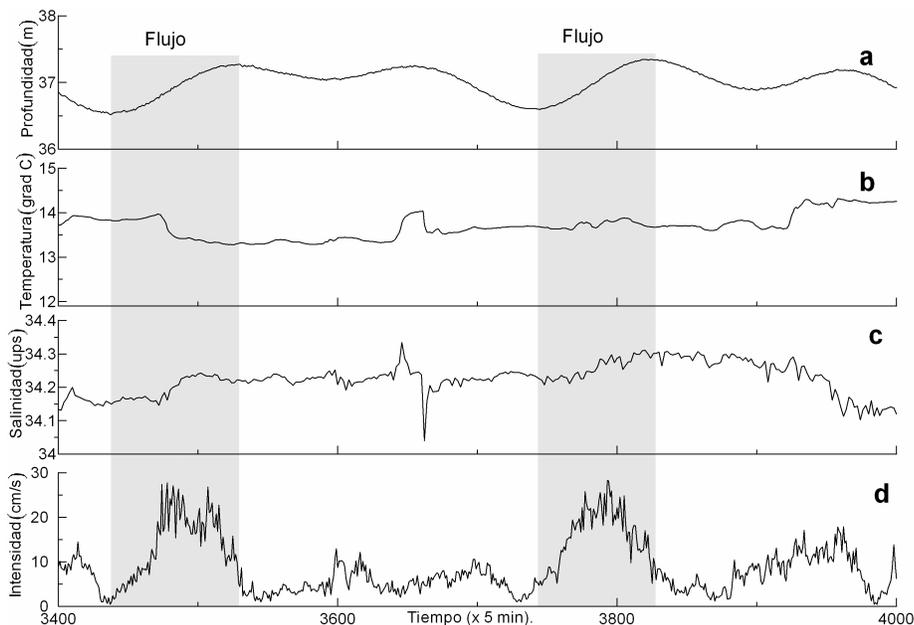


Figura 20. Las variaciones de nivel del mar (a), temperatura (b), salinidad (c) y (d) intensidad de las corrientes en un anclaje de largo plazo durante **la fase de marea muerta** en el centro de la boca de BM en el 2002.

La Fig. 21 muestra los resultados de la instalación del correntímetro equipado con los sensores de T y S en el mismo punto de la boca durante el periodo del 18 de marzo al 7 de mayo del 2003 en una profundidad de aproximadamente 30 metros con la misma frecuencia de muestreo de un dato por 5 minutos. En el grafico de las variaciones de nivel del mar se observan perfectamente los ciclos lunares de marea con amplitud máxima durante la marea viva hasta de 2.8 m, y durante la marea muerta hasta 1.2 m. Las intensidades de las corrientes (Fig. 21b) varían en la forma correspondiente, alcanzando valores mayores de 0.6 m/s en las mareas vivas.

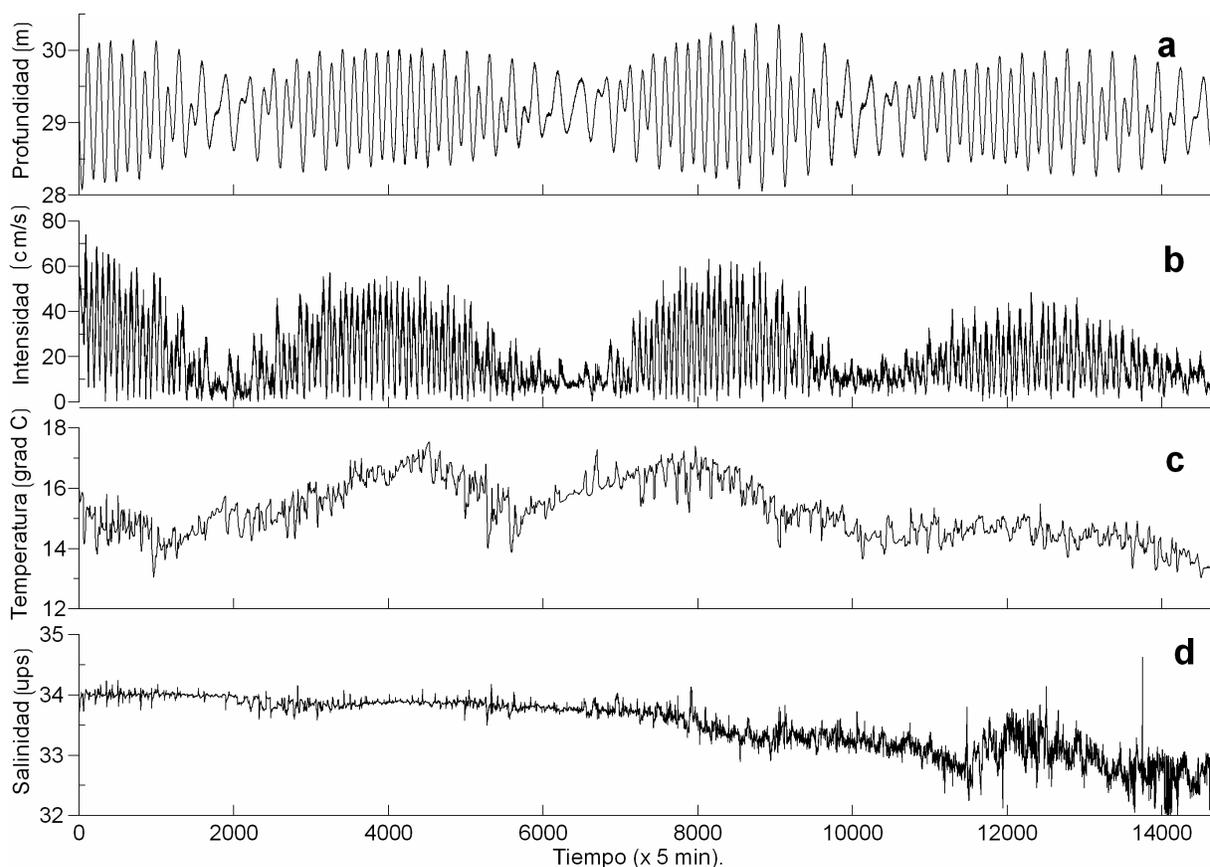


Figura 21. Las variaciones de nivel del mar (a), intensidad de las corrientes (b), temperatura (c) y salinidad (d) en un anclaje de largo plazo, instalado en el centro de la boca de BM en el periodo del 18 marzo al 7 de mayo del 2003.

Los espectros de la variación de nivel del mar y de las corrientes, así como la elipse de marea para la serie larga en 2003 se muestran en la Fig. 22. En el espectro de las variaciones del nivel se resuelven dos grupos de los constituyentes de marea, semidiurna y diurna. En el grupo semidiurno se observan dos armónicos principales M2 y S2. En el espectro de las corrientes el pico mayor tiene la frecuencia de 6 hrs. que coincide con la teoría común de mareas y corresponde a frecuencia de las variaciones de nivel del mar de 12 hrs. La elipse de marea es angosta y esta orientada de manera prácticamente perpendicular a la sección de la boca de BM y tiene el carácter reversivo de las corrientes de marea.

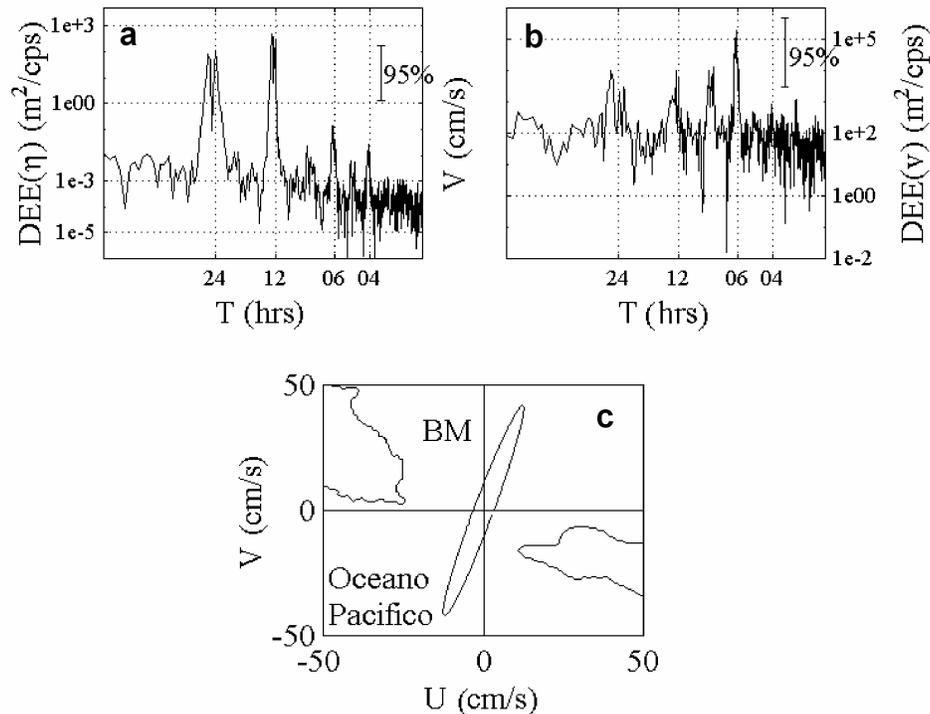


Figura 22. Espectros de energía de las variaciones de nivel del mar (a) y de la intensidad de corrientes (b) para el anclaje de largo plazo, instalado en el centro de la boca de BM en el periodo del 18 de marzo al 7 de mayo del 2003. Las barras verticales muestran el intervalo de confianza para nivel de probabilidad de 0.95. $DEE(\eta)$ y $DEE(v)$ son densidades espectrales para las variaciones del nivel y para corrientes, correspondiente. El panel (c) muestra la elipse de marea.

Los datos de la serie larga de tiempo de 2003 fueron analizados empleando el método de Godin (1972), determinando las constantes armónicas de las componentes de marea en la boca principal de BM (Tabla 3). La comparación de esta tabla con la tabla 1 para Puerto San Carlos muestra que las componentes S2, N2 y O1 tienen las amplitudes muy parecidas, pero las componentes M2 y K1 en puerto San Carlos tienen amplitudes mayores que las de la boca de BM. Este efecto está relacionado con la interacción de la onda de marea con la topografía de Bahía Magdalena

Tabla 3. Amplitud de las componentes armónicas principales de las mareas resueltas con base en las mediciones de las variaciones de nivel en el anclaje en la boca de BM, durante el periodo 19 de marzo al 8 de mayo del 2003.

Componente armónica de la marea		Periodo [hrs]	Amplitud [m]	Varianza explicada, %
Lunar Semidiurna	(M2)	12.42	0.48	36
Solar Semidiurna	(S2)	12.00	0.34	25
Lunar Diurna Decl.	(K1)	23.94	0.21	16
Lunar Diurna Decl.	(O1)	25.82	0.17	12
Lunar Semidiurna	(N2)	12.66	0.13	10
Restantes	(M4, S4, MF, etc.)	-	< 0.1	
Rango de Marea			2.66±0.11	

Para analizar en detalles la variabilidad de las corrientes y variaciones de las variables termohalinas la Fig. 23 presenta un corte de la serie larga que corresponde al periodo de 19 a 21 de marzo del 2003 durante la marea viva. Las corrientes en los instantes máximos de flujo

y reflujos alcanzan 0.6 m/s en la capa del fondo (Fig. 23b). Pero las variaciones de T y S no muestran la misma periodicidad, mostrando solamente los picos cortos, en los mismos instantes de marea. Este efecto está relacionado, probablemente, con el frente de marea (se menciona la frontera entre las aguas marinas relativamente frías y con menor salinidad y las aguas de los canales del norte, calientes y con mayor salinidad) se localiza bastante alejada de la boca de BM y alcanza la boca solamente en la fase de alrededor de marea baja.

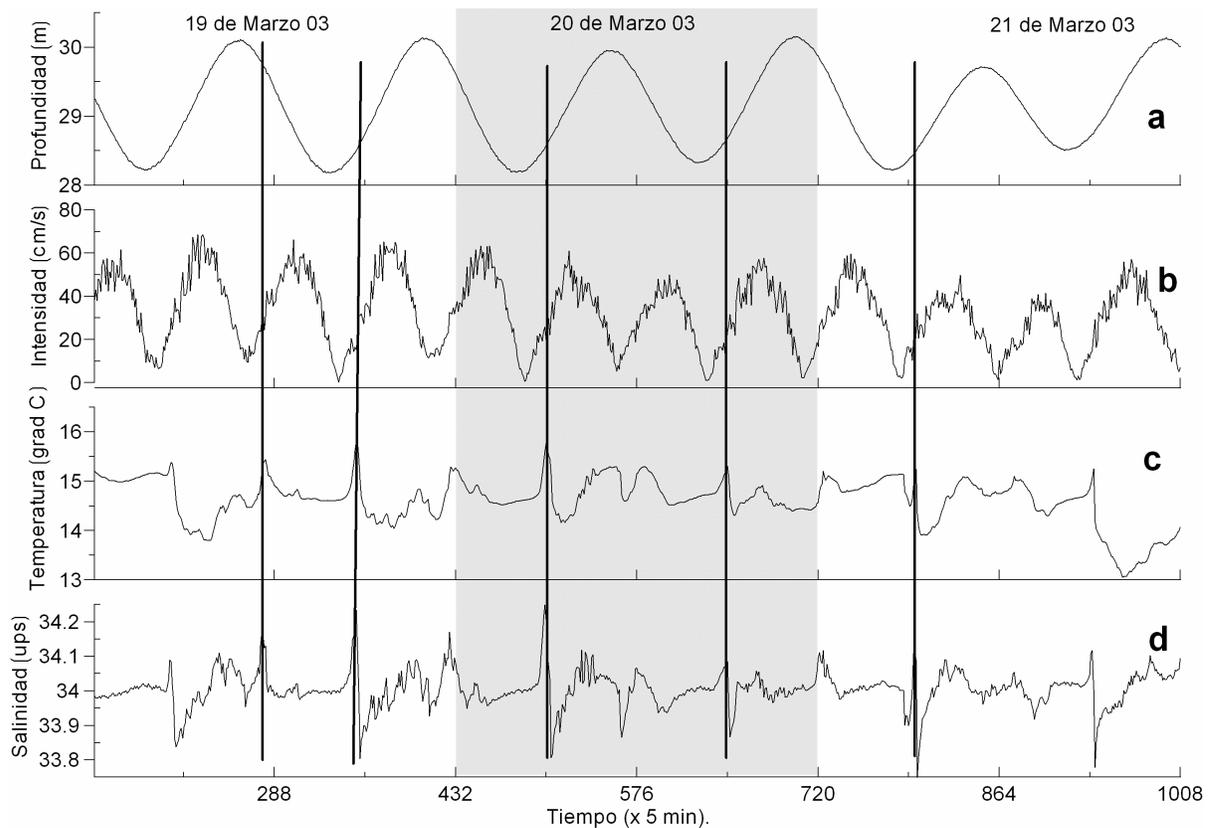


Figura 23. Un corte de 3 días de las series de tiempo de las variaciones de nivel del mar (a), intensidad de las corrientes (b), temperatura (c) y salinidad (d) en un anclaje de largo plazo, instalado en el centro de la boca de BM en el 2003.

Canal Gaviotas.

En la Figura 24 se indica las fechas y localización de las instalaciones de los correntímetros autónomos a profundidad aproximada de 14 m.

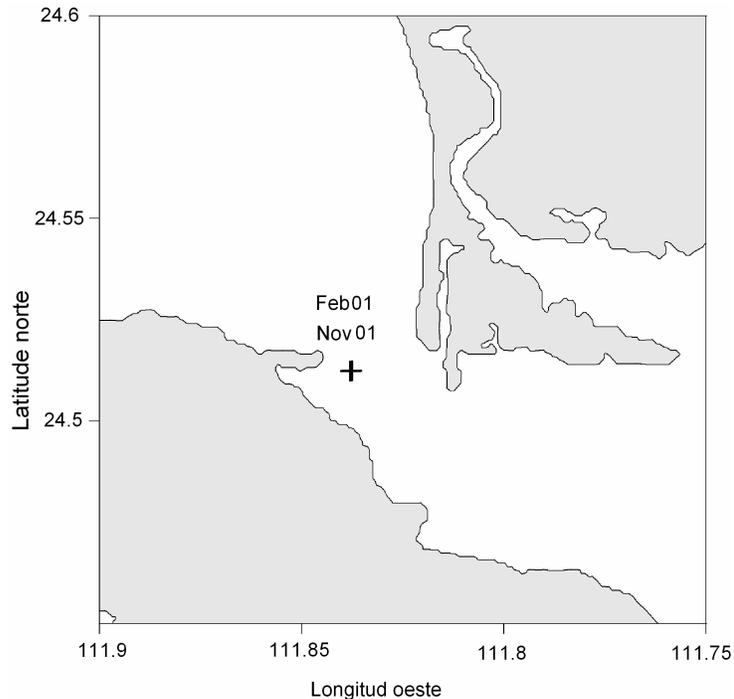


Figura 24. Localización de los puntos de instalación de los anclajes de los equipos en el Canal Gaviotas.

La Fig. 25 presenta las corrientes en el punto de medición en la forma vectorial, la intensidad de las corrientes, variación de las componentes zonal y meridional y variaciones del nivel del mar. Los vectores de las corrientes promedio por hora muestran que durante el flujo de marea, las corrientes hacia Bahía Almejas (valores negativos) alcanzaron valores de 0.4 m/s y fueron mayores que las corrientes dirigidas hacia Bahía Magdalena durante el refluo de marea (valores positivos hasta de 0.2 m/s). El rango de variaciones de la componente meridional es mayor de la componente zonal. La dirección de las corrientes (orientación de los vectores en la

Fig. 25a) muestra un efecto topográfico del canal de comunicación entre estos dos cuerpos de agua.

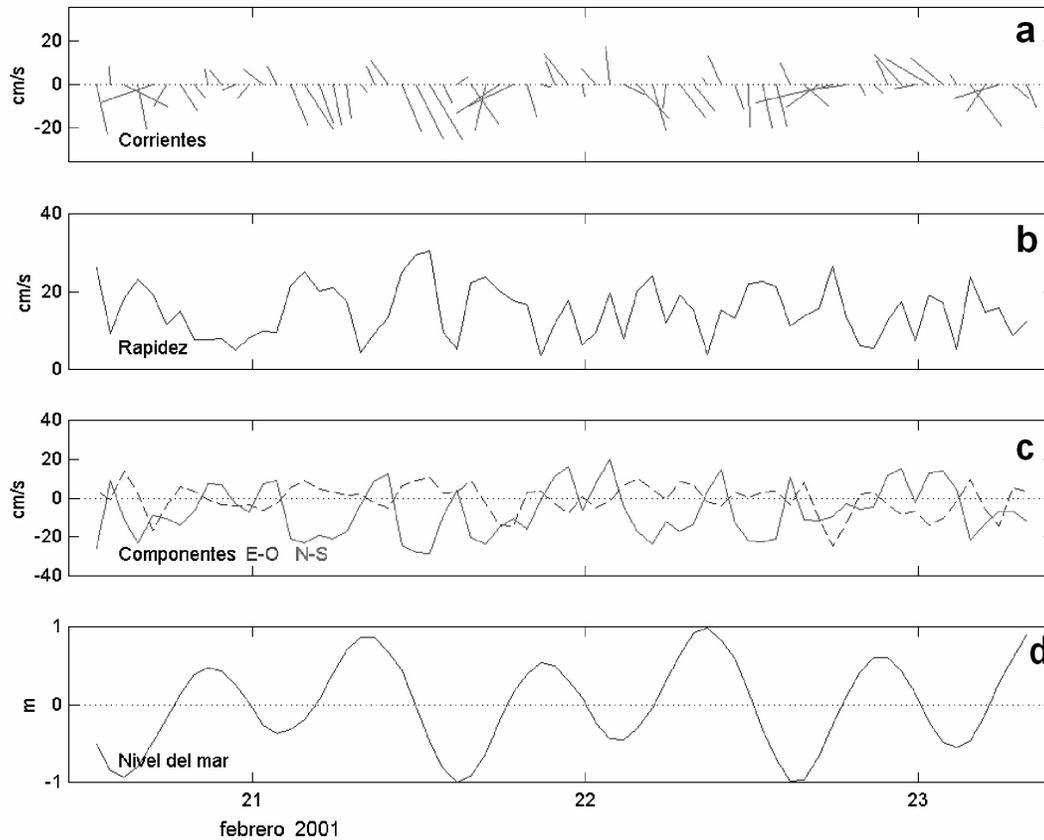


Figura 25. Los vectores promedio en hora (a), la intensidad (b), las componentes de las corrientes (meridional línea continúa; zonal – línea discontinúa) (c) y variaciones de nivel del mar (d) en un anclaje en el Canal Gaviotas en el periodo del 20 al 23 de febrero del 2001.

Las variaciones de nivel del mar y la presentación vectorial de las corrientes obtenidas en noviembre del 2001 en este punto se muestran en la Fig.26. La variabilidad direccional de las corrientes (vectores en la Fig. 26b) tiene un rango mayor que el de febrero, mostrando los procesos hidrodinámicos más intensos, que provocan la mezcla turbulenta en este lugar. El rango de mareas durante estas mediciones excedió 2 m, que corresponde a la fase de marea viva.

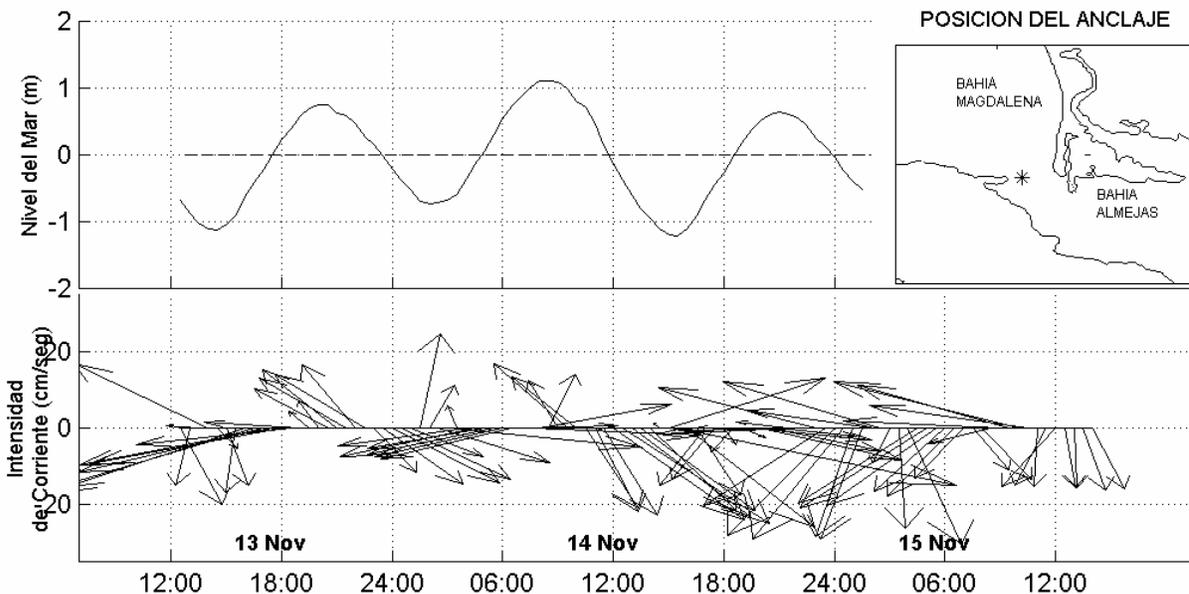


Figura 26. Las variaciones de nivel del mar y los vectores promedio de las corrientes en un anclaje en el Canal Gaviotas en noviembre del 2001.

La elipse de marea y el espectro energético de las variaciones de nivel del mar se presentan en la Fig. 27. En el espectro dominan las frecuencias del grupo semidiurno de las componentes de marea. El eje mayor de la elipse de marea esta orientada paralelamente al eje principal del Canal Gaviotas.

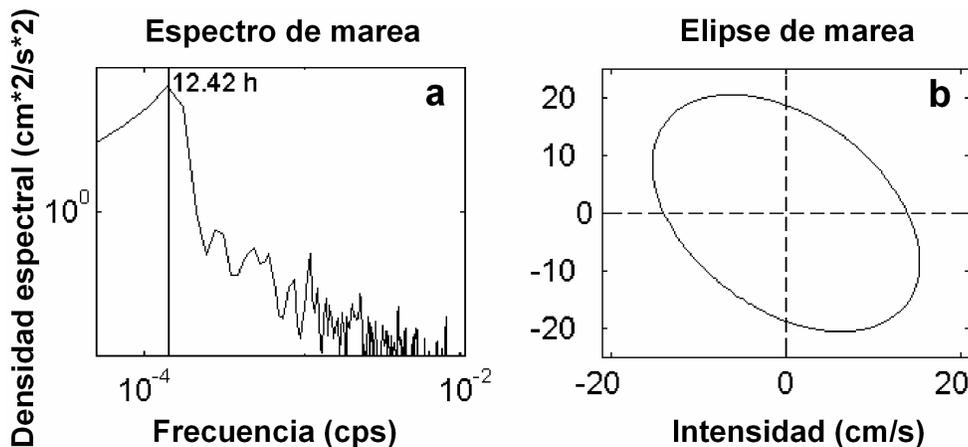


Figura 27. El espectro de las variaciones del nivel del mar (en m^2/Hz) y la elipse de marea (en cm/s) en noviembre del 2001 en el Canal Gaviotas.

La Fig. 28 muestra los resultados de la instalación del correntímetro en el mismo punto del Canal Gaviotas el periodo del 20 al 22 de marzo del 2003.

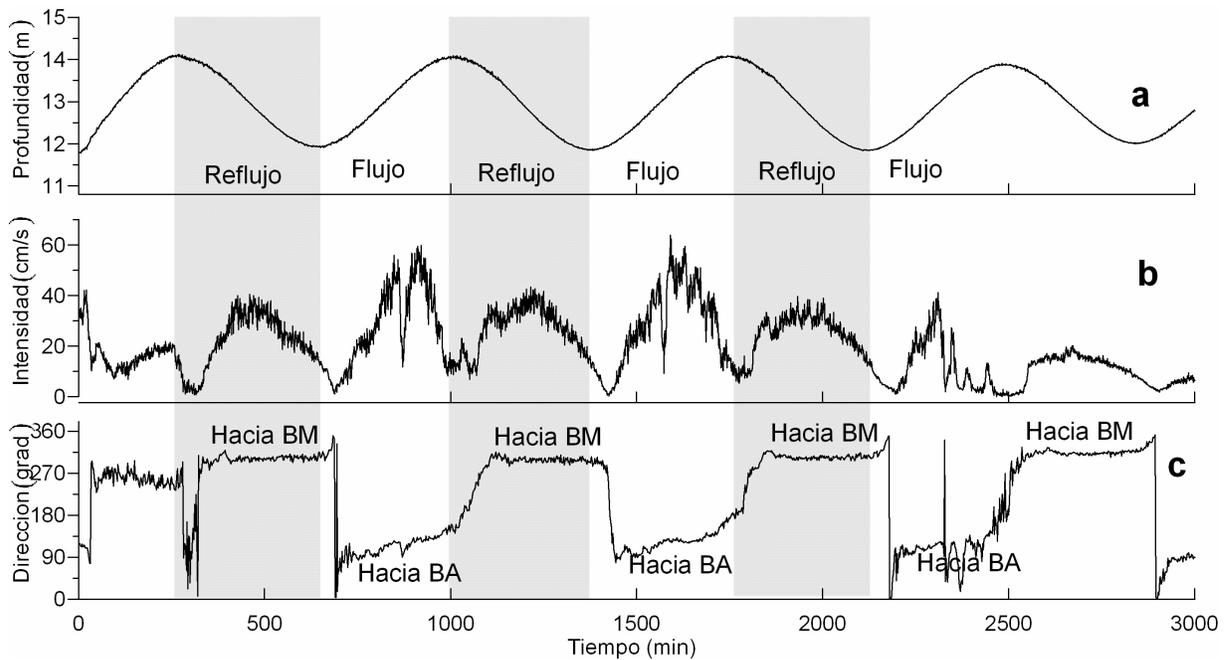


Figura 28. Las variaciones de nivel del mar (a), la intensidad (b) y la dirección de las corrientes (c), en el anclaje de un correntímetro en el Canal Gaviotas en marzo del 2003.

El gráfico de la intensidad (Fig. 28b) muestra que las corrientes, dirigidas durante el flujo de marea hacia BA (Fig. 28c), fueron mayores que las del reflujo, dirigidas hacia BM, pero más cortas en tiempo. Esta asimetría en las corrientes puede afectar al flujo de los sedimentos de BM hacia BA, formando un flujo neto de los sedimentos finos hacia BA.

Boca de Bahía Almejas.

La Fig. 29 muestra el lugar en que se ancló un correntímetro autónomo en la boca de Bahía Almejas en una profundidad de alrededor de 5 m.

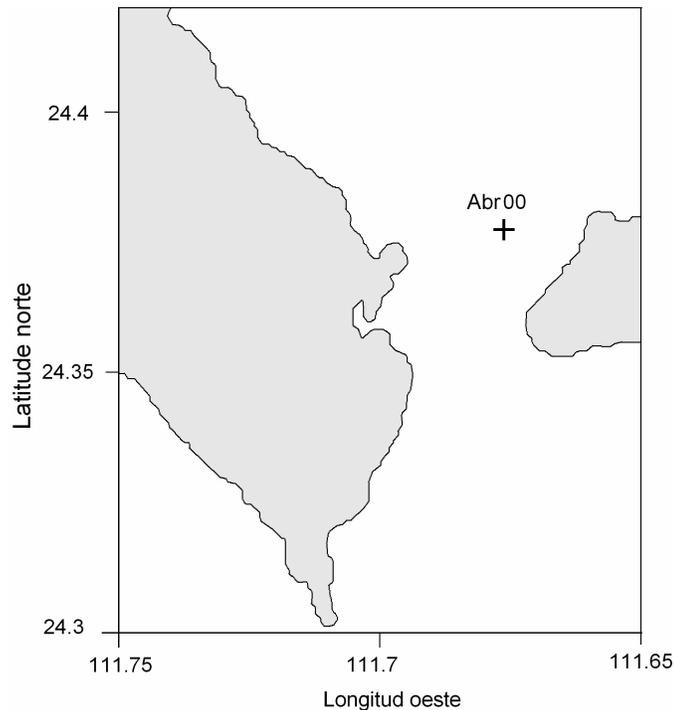


Figura 29. Localización del punto de instalación del anclaje del correntímetro en la boca de Bahía Almeja.

Las variaciones de nivel del mar y los parámetros de las corrientes (la intensidad y la dirección) obtenidas en abril del 2000 en la boca de BA se muestran en la Fig.30. Las corrientes durante el flujo de marea fueron mayores que las de reflujó y alcanzaron 50 cm/s. A pesar de las intensidades suficientemente altas, el intercambio de agua a través de esta boca, prácticamente no afecta a la circulación en el interior de Bahía Almejas por tener un canal poco profundo y relativamente protegido. Las corrientes en la boca tienen carácter reversible, mostrando dos direcciones dominantes de las corrientes: hacia el norte durante el flujo de marea (entrada de agua a BA), y hacia el sur (salida del agua).

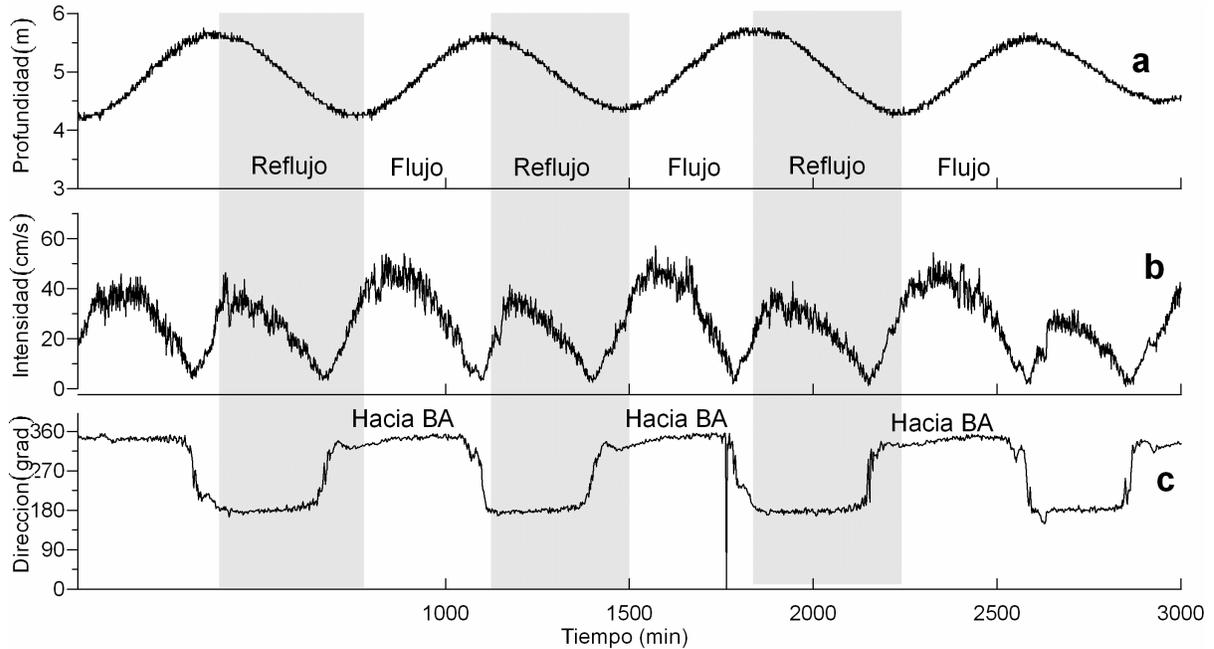


Figura 30. Las variaciones de nivel del mar (a), la intensidad (b) y la dirección de corrientes (c) en el anclaje de un correntímetro en la boca de Bahía Almejas en abril del 2000.

3.2. Estructura vertical de las corrientes en los canales (datos de ADCP).

Para analizar la distribución vertical de las corrientes en los canales del sistema lagunar BM-BA se llevaron a cabo mediciones de las corrientes con los equipos de ADCP. Los resultados obtenidos en el Canal San Carlos enfrente del puerto del mismo nombre se presentan en la Fig. 31.

En ésta gráfica se encuentra una uniformidad vertical de las corrientes en toda la columna del agua, el flujo de agua esta dirigido al noroeste con una intensidad promedio alrededor de 0.3 m/s.

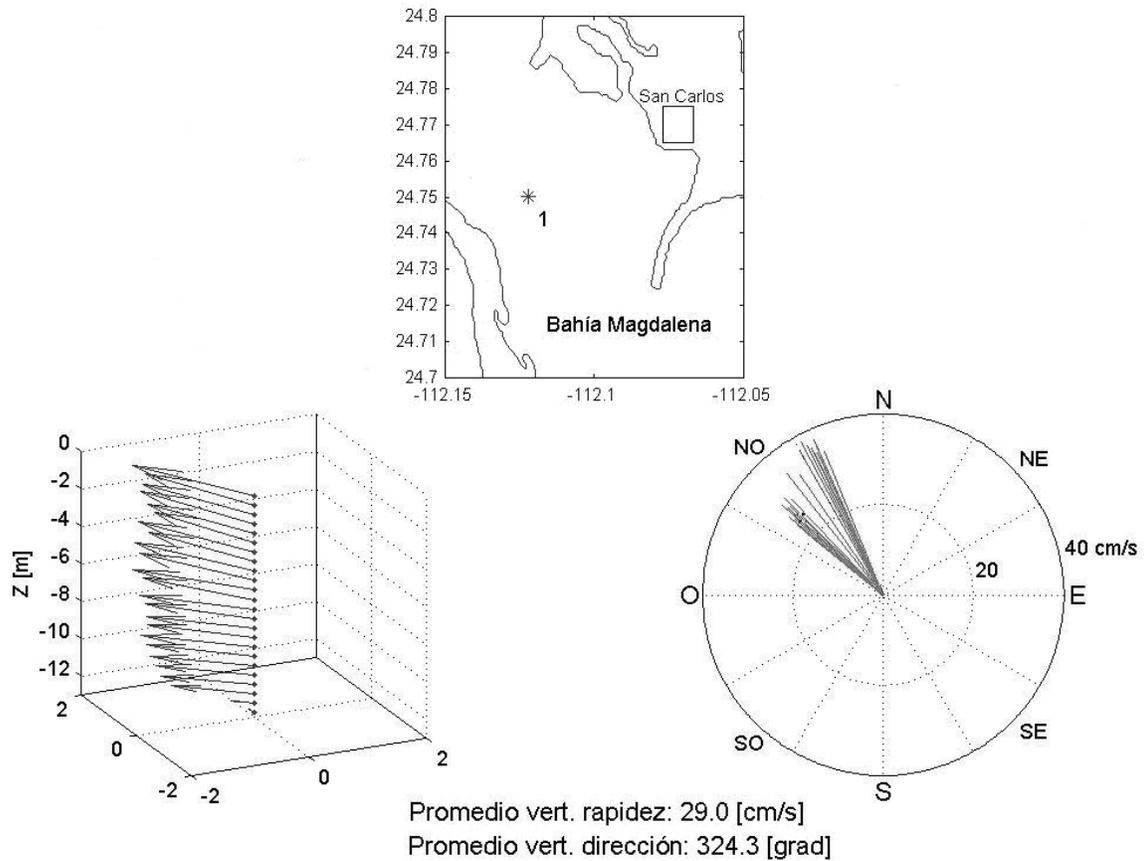


Figura 31. Perfil de las corrientes en el Canal San Carlos obtenido el 4 de Abril del 2000 durante el máximo flujo de marea.

En la boca principal de BM durante el refluo de marea fueron realizados 7 perfiles con ADCP para evaluar la no uniformidad horizontal y vertical de las corrientes. El esquema de las estaciones y los resultados de las mediciones en las estaciones 3 y 5 se muestran en la Fig. 32. En el centro de la boca (Est.3) las corrientes en la capa superficial alcanzaron 0.9 m/s, disminuyendo hasta 0.3 m/s en la capa de fondo. En la Estación 5 las corrientes superficiales fueron alrededor de 0.7 m/s. En ambos casos se observa la disminución significativa de las corrientes con la profundidad.

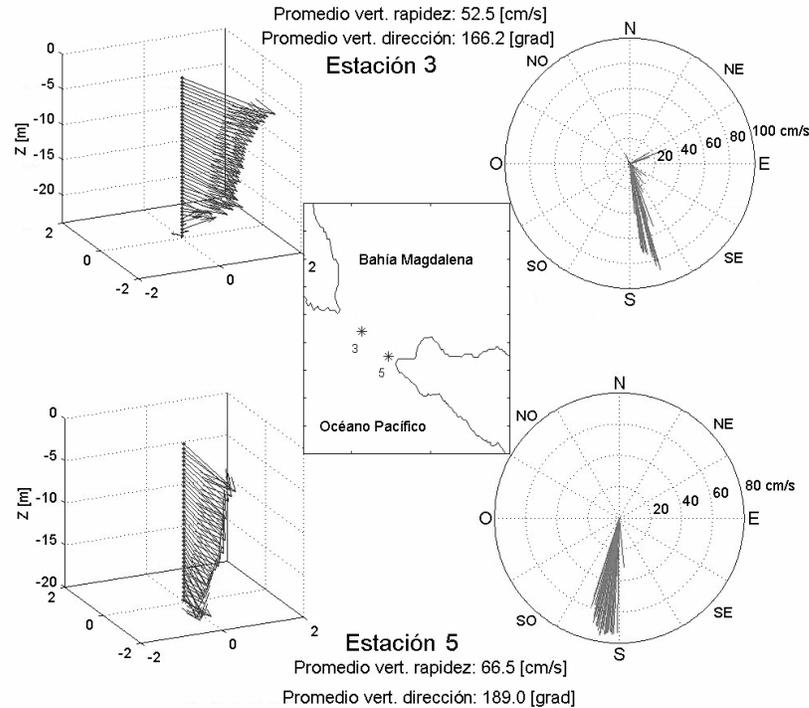


Figura 32. Perfiles de las corrientes obtenidos con un ADCP en la boca de BM en Abril del 2000 durante el refluo de marea (estaciones 3 y 5).

En la Fig. 33 se muestran los perfiles 6 y 7 tomadas en la vecindad interior de la boca de BM cerca de la Isla Margarita. En estas estaciones las corrientes durante el refluo de marea fueron dirigidas hacia el mar abierto con intensidades mayores de 1.0 m/s mostrando uniformidad en la vertical.

Los perfiles de ADCP en el Canal Gaviotas durante el refluo de marea y en la boca de BA durante el refluo de marea en abril del 2000 se muestran en las Figs. 34 y 35, respectivamente. En el Canal Gaviotas se observa ligera disminución de las corrientes con la profundidad. El perfil cerca de la boca de BA fue ubicado en el canal con la profundidad de 11 m, el cual tenía una curva hacia el Este, afectando la dirección de las corrientes de marea en este punto.

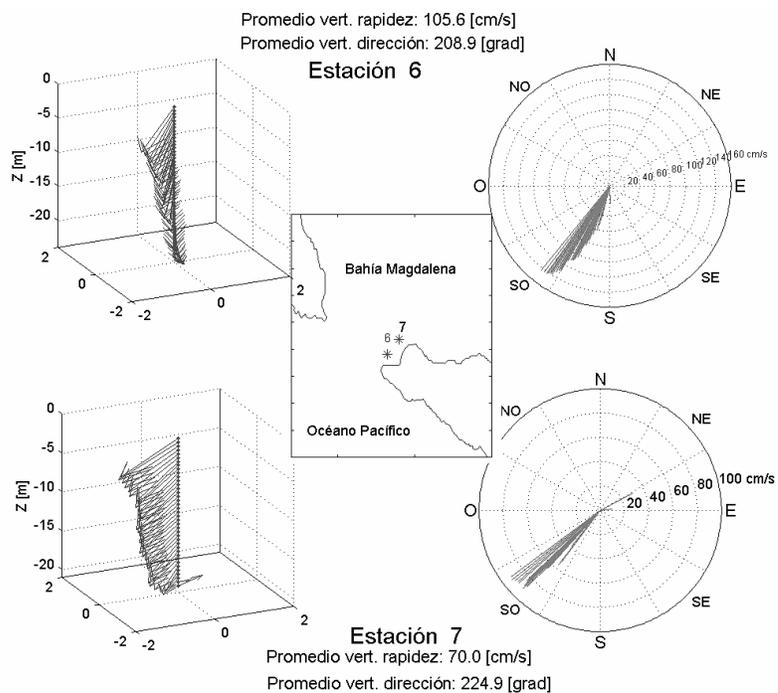


Figura 33. Perfiles de las corrientes obtenidos con un ADCP en la boca de BM en Abril del 2000 durante el reflujó de marea (estaciones 6 y 7).

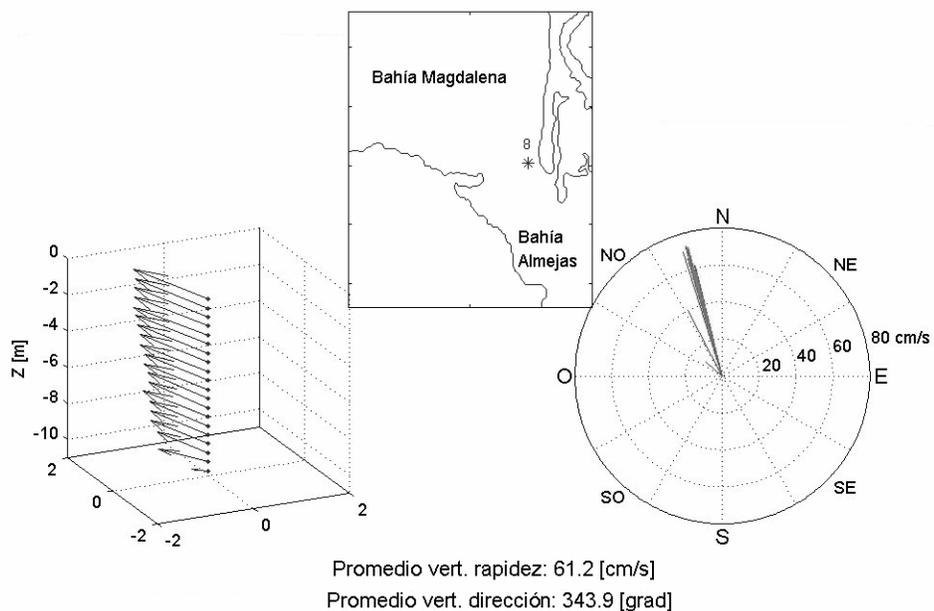


Figura 34. Perfil de la corriente obtenido con un ADCP en el Canal Gaviotas en Abril del 2000 durante el reflujó de marea.

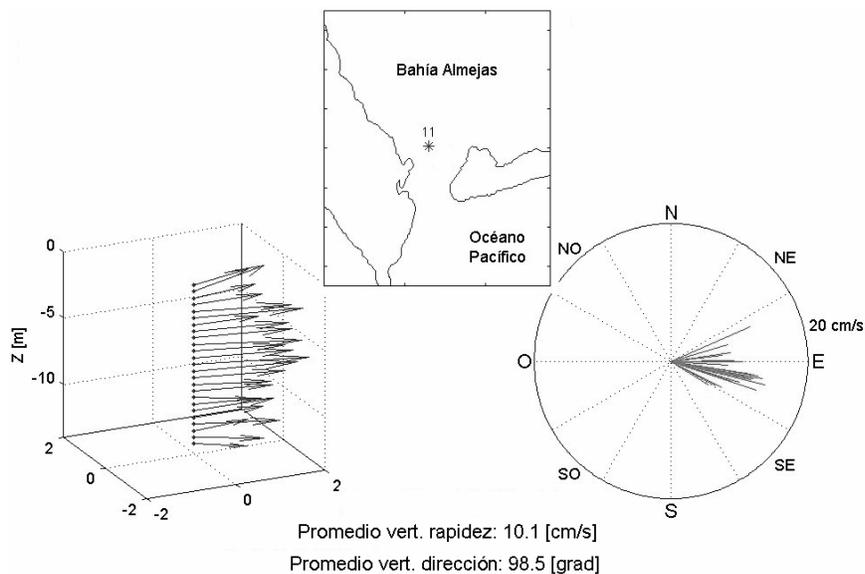


Figura 35. Perfil de la corriente obtenido con un ADCP en la boca de BA en Abril del 2000 durante el reflujo de marea (estación 11).

La Fig. 36 presenta los resultados promedios en la vertical de las mediciones con ADCP realizadas en Abril del 2000.

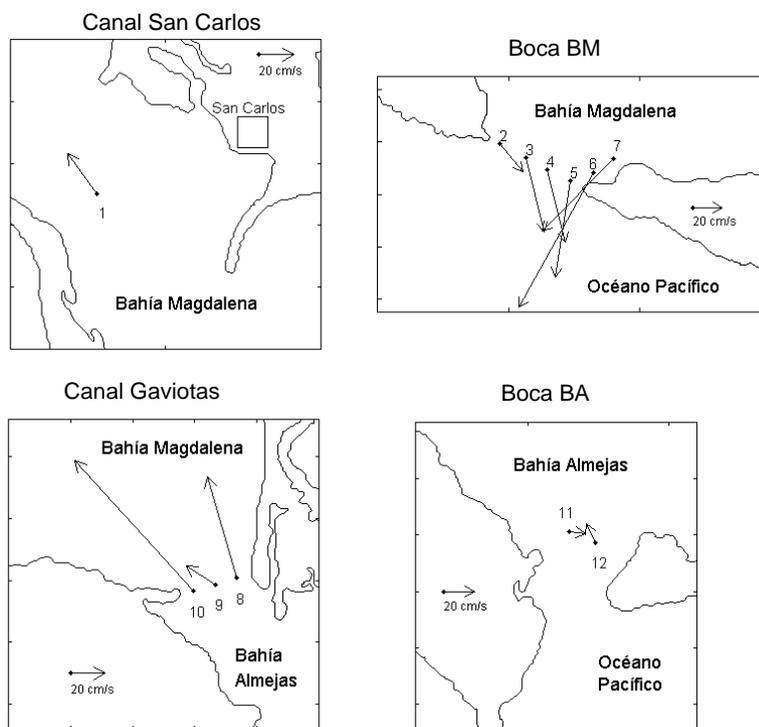


Figura 36. Perfiles de ADCP en los canales del sistema lagunar en abril del 2000. (estaciones de la 1 a la 12).

En marzo del 2003 se llevó a cabo una serie de mediciones con ADCP equipado con un “bottom track” en los transectos a través de la boca principal de BM. Las mediciones fueron realizadas en distintas fases de la marea en movimiento a bordo de B/O “El Puma” dentro del proyecto dirigido por el Dr. C. Robinson del Instituto de Ciencias Marinas y Limnología de la UNAM. El cronograma de las mediciones del nivel del mar y de las intensidades de las corrientes medidas con un correntímetro anclado en la boca se presentan en la Fig.37.

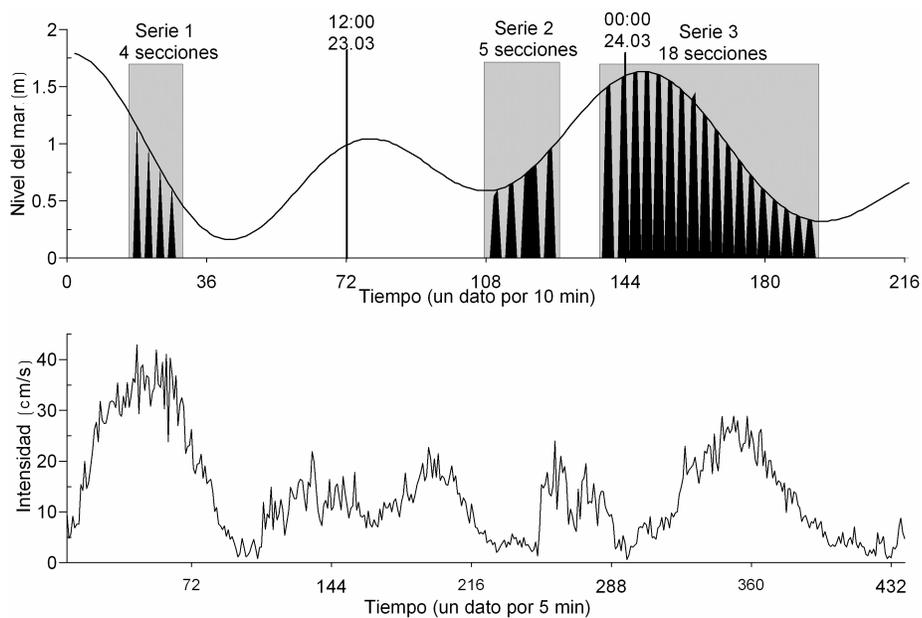


Figura 37. Variaciones del nivel del mar y cronograma de las mediciones con un ADCP en el transecto a través de la boca BM en marzo del 2003.

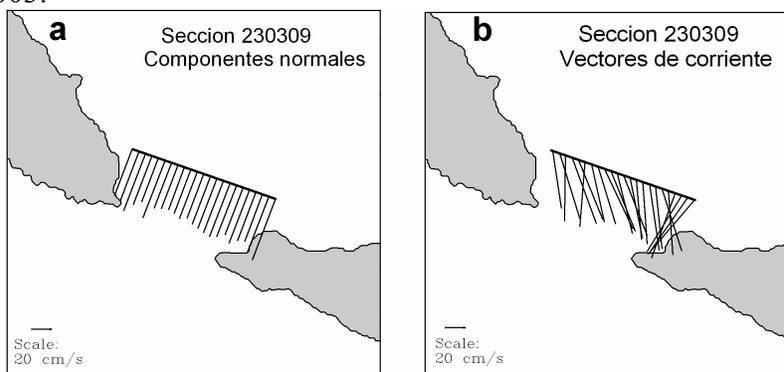


Figura 38. Componentes normales (a) y los vectores en sistema polar (b) en el transecto a través de la boca BM en marzo del 2003 durante el reflujó de marea.

Los resultados de mediciones se muestran en la Fig. 38 para el reflujó de marea y en la Fig.39 durante el flujo.

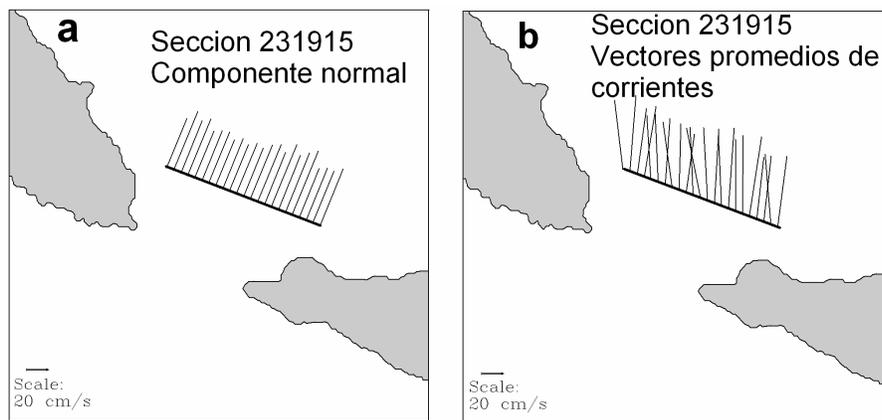


Figura 39. Componentes normales (a) y los vectores en sistema polar (b) en el transecto a través de la boca BM en marzo del 2003 durante el flujo de marea.

Las distribuciones de la componente normal de las corrientes en la sección de la boca de BM se muestran en las Figs. 40 y 41, para el reflujó y flujo de marea

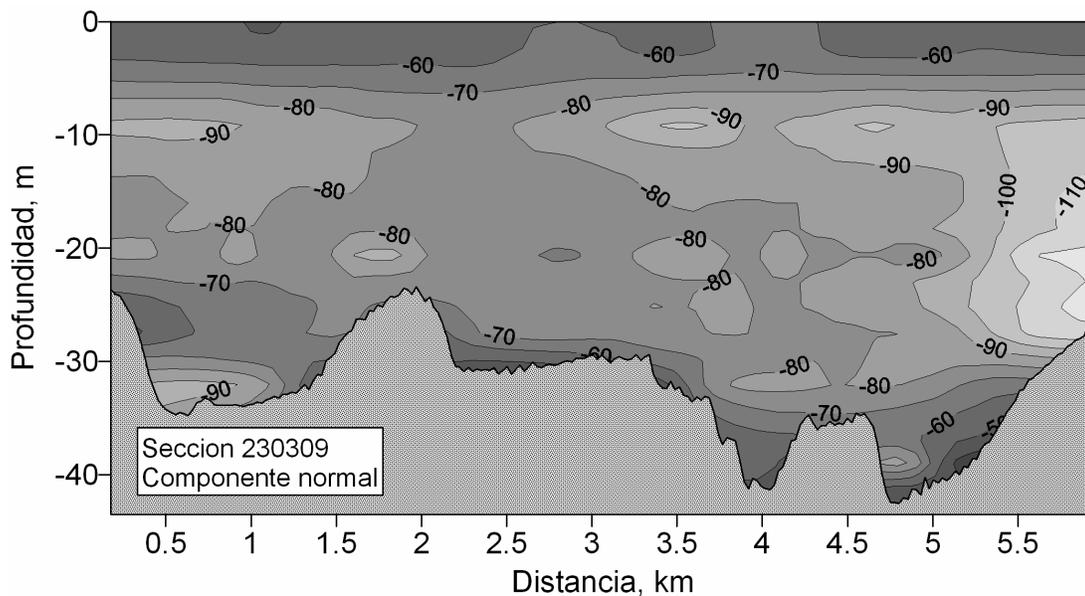


Figura 40. La distribución de las corrientes en la sección de la boca para la fase de reflujó de marea en marzo del 2003.

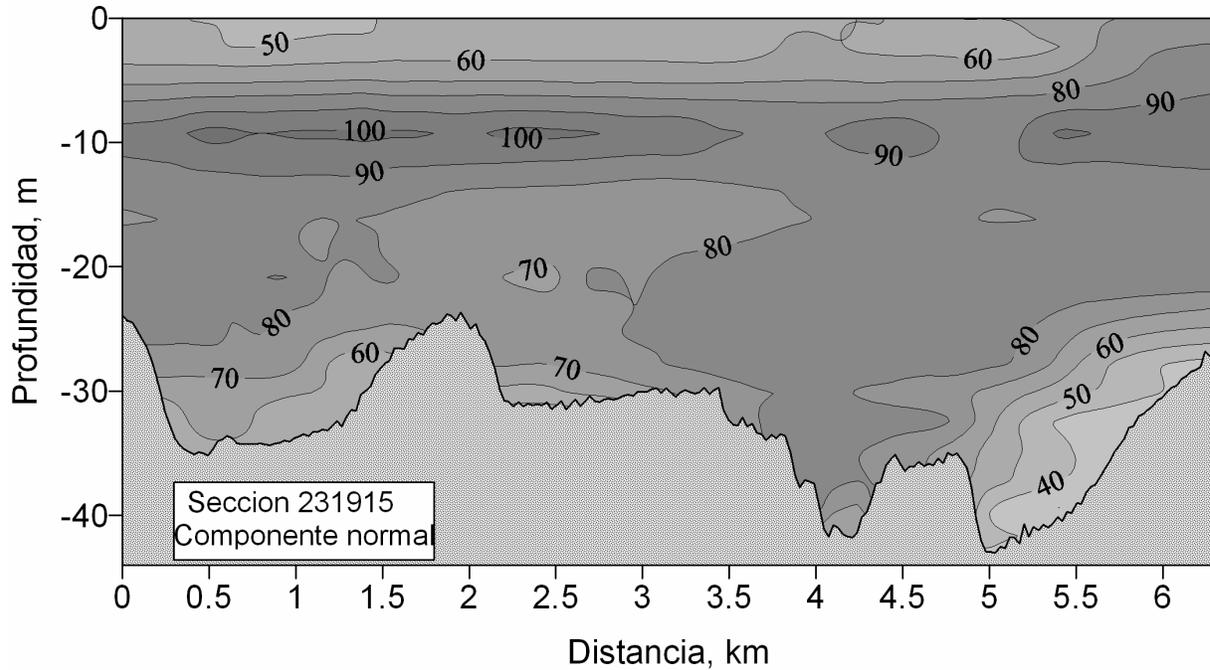


Figura 41. La distribución de las corrientes en la sección de la boca para la fase de flujo de marea en marzo del 2003

El análisis de las Figs. 40 y 41 muestra que la distribución del flujo de agua es más uniforme durante el flujo de marea (Fig. 41), las intensidades máximas de las corrientes se observan en la capa subsuperficial alrededor de 10 metros de profundidad. En la capa del fondo la intensidad disminuye por el efecto de fricción del fondo. Durante el reflujó las corrientes se intensifican en la parte sur de la boca (Fig. 40).

3.3. Efectos de turbulencia en el Canal Gaviotas.

En noviembre del 2001 en el Canal Gaviotas se llevó cabo una serie de las mediciones de las corrientes por medio de un equipo de ADCP para evaluar la variabilidad de corto plazo de las corrientes y los efectos de mezcla turbulenta relacionados. Los perfiles de ADCP se tomaron durante 5 segundos por cada 24 segundos durante el reflujó de marea, formando una secuencia de datos. Los resultados de los primeros 11 perfiles se encuentran en la Fig.42

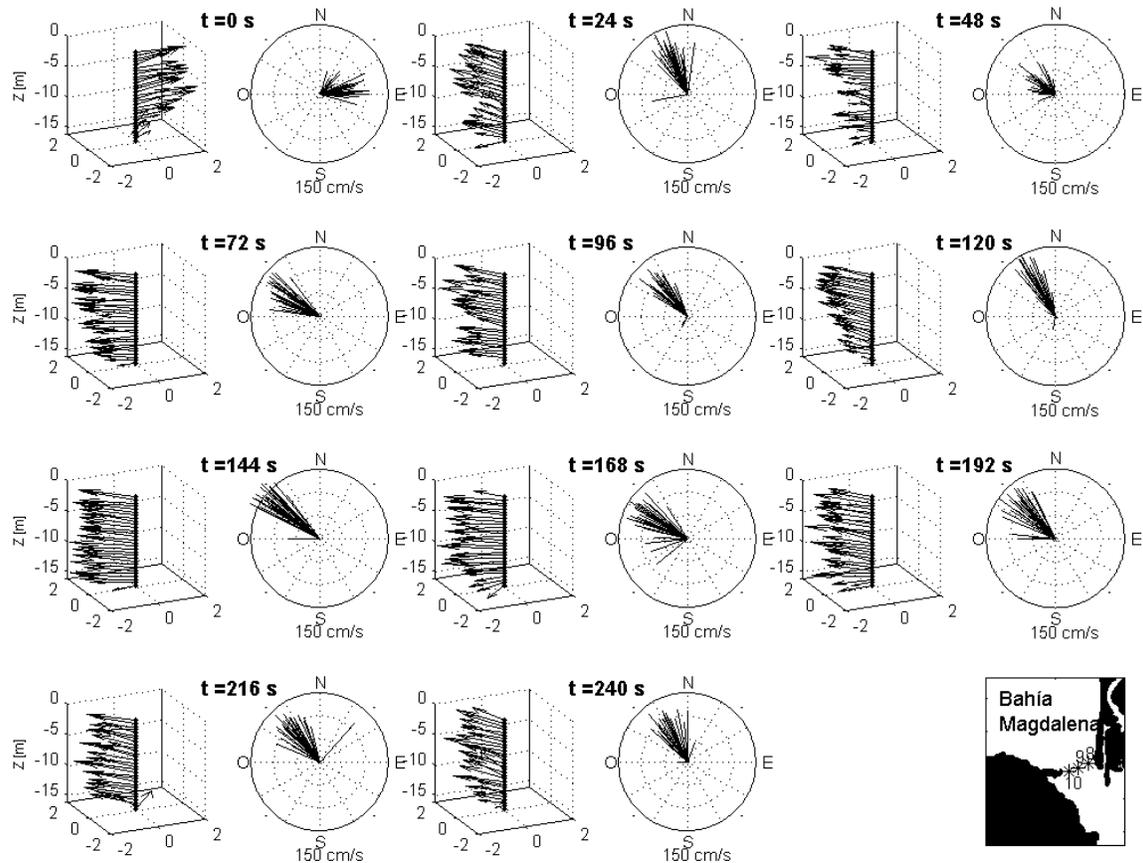


Figura 42. Los perfiles de ADCP tomados en el Canal Gaviotas en noviembre del 2001 para evaluar la variabilidad de corrientes en micro escala temporal.

El análisis de estos perfiles promediados en un periodo de 5 seg. muestra que la intensidad de las corrientes y su dirección varían en un amplio rango, mostrando también, una no uniformidad en la vertical. Es un efecto de mezcla turbulenta forzada por la interacción de las corrientes intensas con la topografía del fondo. Este efecto puede provocar resuspensión de los sedimentos en la zona del Canal Gaviotas y su transporte hacia BM durante el reflujó de marea y hacia BA durante el flujo de marea. El carácter estocástico de la turbulencia permite analizar este proceso solamente en los términos estadísticos de los promedios y de varianza de las componentes U y V de las corrientes (Tabla 4).

Tabla 4. Promedio y desviación estándar de la variaciones de las corrientes por capas de 5 metros durante la serie de mediciones con ADCP en el Canal Gaviotas en noviembre del 2001, fase de reflujó máximo de marea.

	Comp. U (zonal), m/s	%	Comp.V (merid.), m/s	%	Intensidad, m/s	Dirección promedio °	Rango de dirección °
Capa 0 - 5 m	0.98 ± 0.41	42	0.83 ± 0.42	51	1.29 ± 0.57	277	257-294
Capa 5 - 10 m	0.91 ± 0.42	46	0.75 ± 0.47	62	1.18 ± 0.63	269	240-282
Capa 10 - 14 m	0.77 ± 0.29	37	0.59 ± 0.24	41	0.97 ± 0.37	229	198-248

La intensidad de las corrientes durante el experimento con ADCP en el Canal Gaviotas excedió a más de 1 m/s. Un valor significativo de desviación estándar en relación al promedio (coeficiente de variación) muestra un comportamiento importante de la turbulencia en este lugar, forzando la intensa mezcla horizontal y vertical.

3.4. Evaluación del oleaje en la boca principal del sistema.

La Fig. 43 muestra un ejemplo de las variaciones de nivel del mar y de las elipses de oleaje.

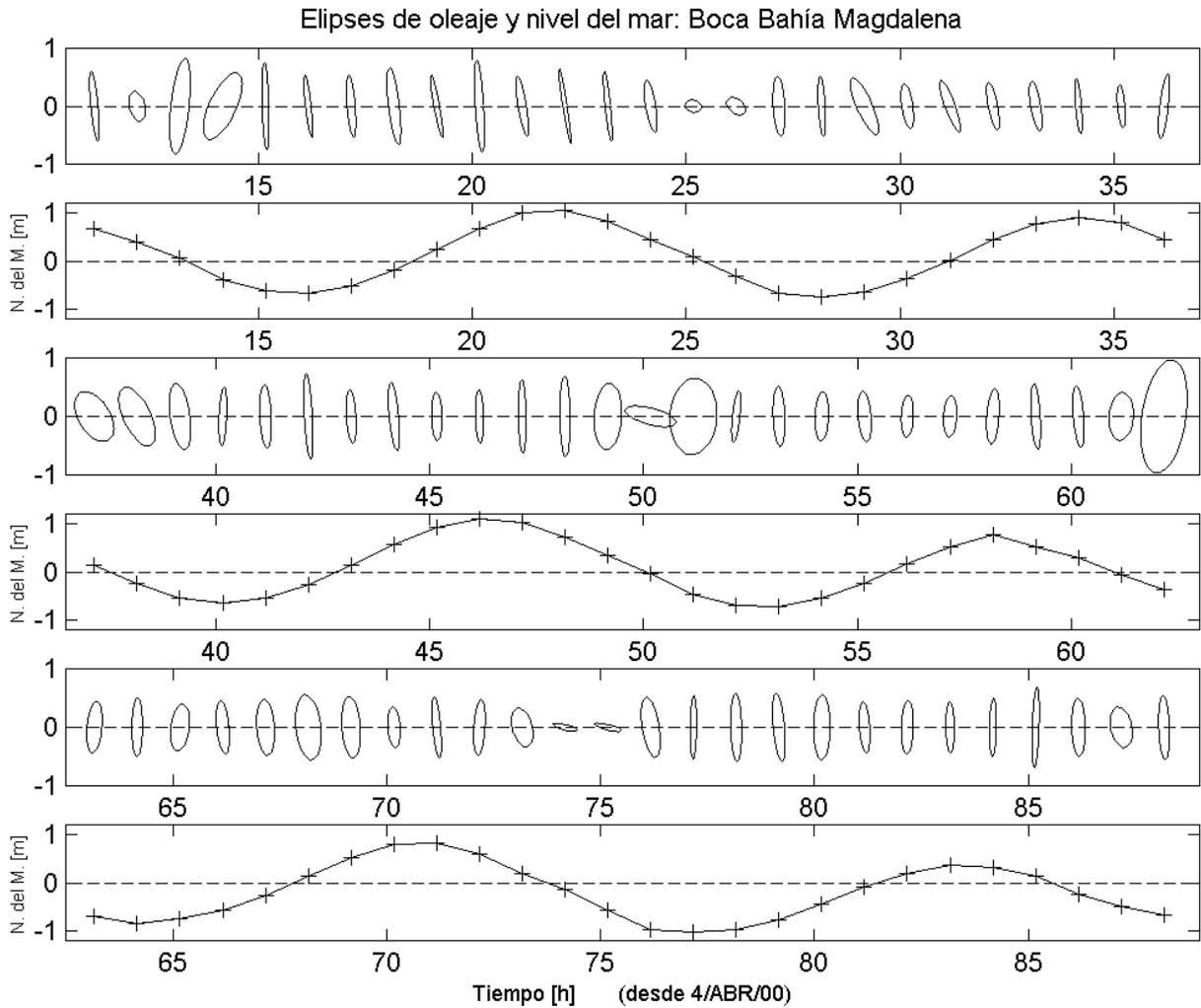


Figura 43. Las variaciones del nivel del mar y las elipses de oleaje en la boca de BM en abril del 2000.

Las variaciones de nivel del mar por oleaje, los espectros del oleaje y las elipses de los movimientos horizontales de agua relacionados a los efectos de topografía local para diferentes series de tiempo obtenidas en abril del 2000 se muestran en las Figs. 44 y 45.

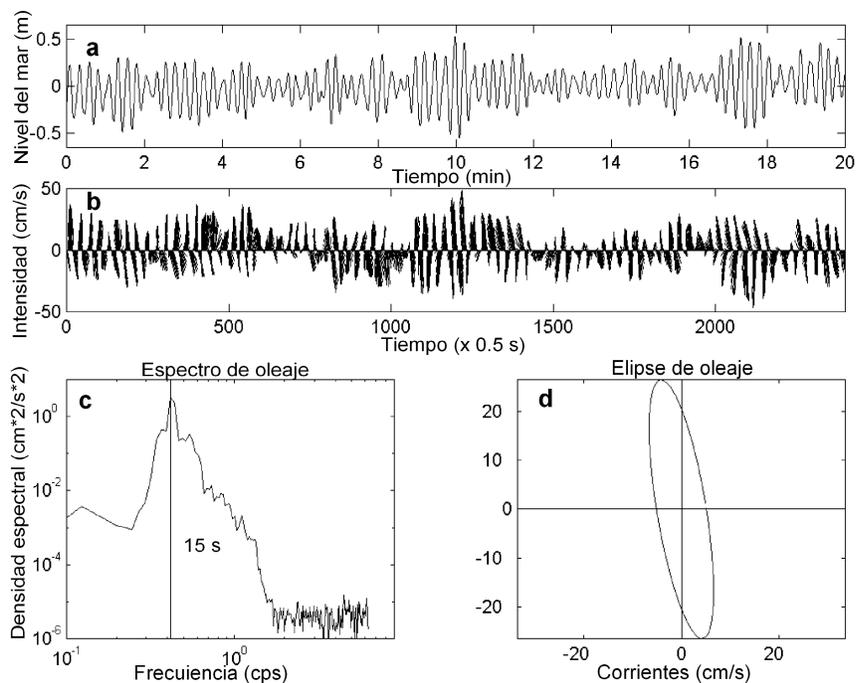


Figura 44. Las variaciones de nivel del mar (a), la intensidad de la corriente (b) el espectro de oleaje (c) y la elipse de los movimientos horizontales (d) en una serie del 4 de abril del 2000, a las 18:00 hrs. bajo la

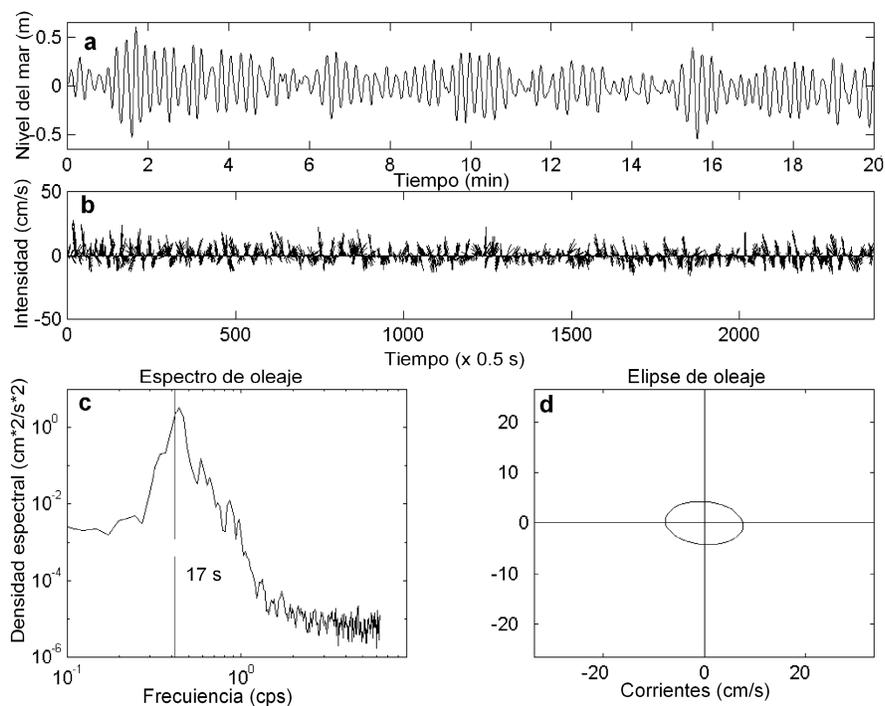


Figura 45. Las variaciones de nivel del mar (a), la intensidad de la corriente (b), el espectro (c) y la elipse de los movimientos horizontales bajo la ola (d) en la serie del 5 de abril del 2000 a las 01:00 hrs.

La Fig. 46 muestra la ubicación de los ológrafos instalados en abril de 2000 y febrero de 2001 cerca de la boca principal de Bahía Magdalena y los parámetros básicos (estadísticos) de oleaje obtenidos en estas estaciones. Este lugar caracteriza el comportamiento de oleaje en la boca principal de Bahía Magdalena.

Las alturas significantes están en el rango de 0.8 a 1.0 m para abril y de 0.6 a 0.9 m en febrero (Fig. 46, gráficos interiores) y periodos significantes en el rango de 11 a 15 s para abril y de 10 a 12 s, para febrero (gráficos en el centro). La dirección de propagación de oleaje varió alrededor de 180° .

Los espectros típicos para éstos registros en abril del 2000 y febrero del 2001 se muestran en la Fig. 47 (gráficos interiores). En ambos casos el oleaje distante de mayor amplitud es más monocromático, los picos principales en los espectros son más angostos. Los gráficos en el centro presentan la distribución direccional de oleaje durante las mediciones (3 hrs.).

Los gráficos inferiores de la Fig.47 presentan la distribución de energía entre los tipos de oleaje calculado por medio de la integración del espectro en las bandas de frecuencias correspondientes: para el oleaje local de viento el rango de periodos es de 3 a 10 s, para el swell (oleaje distante) el rango de periodos es de 10 a 20 s, y para ondas largas (ondas de infragravedad) todos los periodos mayores de 30 s. El análisis del comportamiento de estos tipos de oleajes se muestra en la Fig.47, en los datos de abril el porcentaje de swell fue aproximadamente de 95% y el resto de oleaje de viento local, en febrero la relación fue de aproximadamente 80% de swell y 20% de oleaje de viento local.

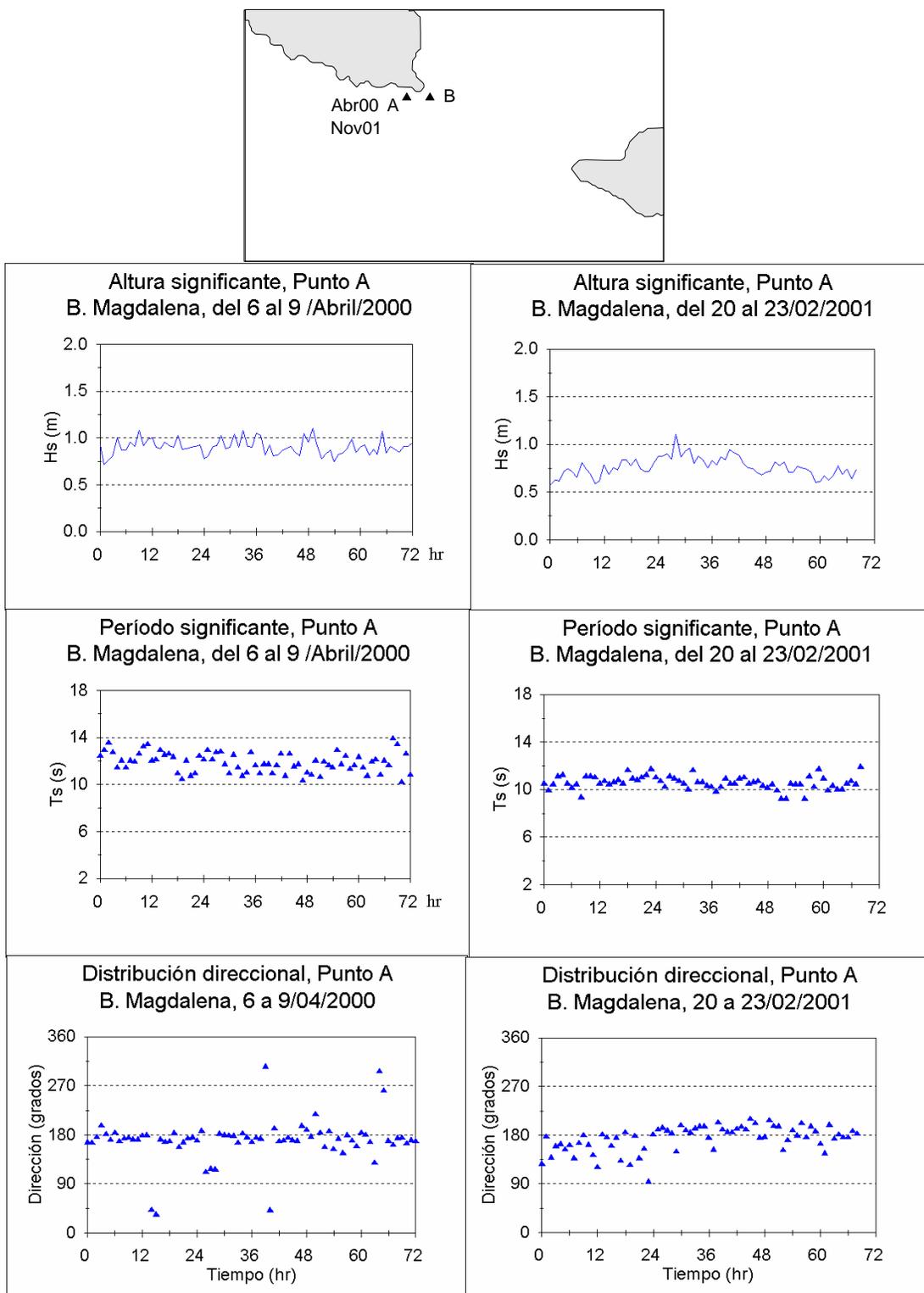


Figura 46. Estadística básica del oleaje, Bahía Magdalena, del 6 al 9 de abril del 2000 y del 20 al 23 de febrero del 2001.

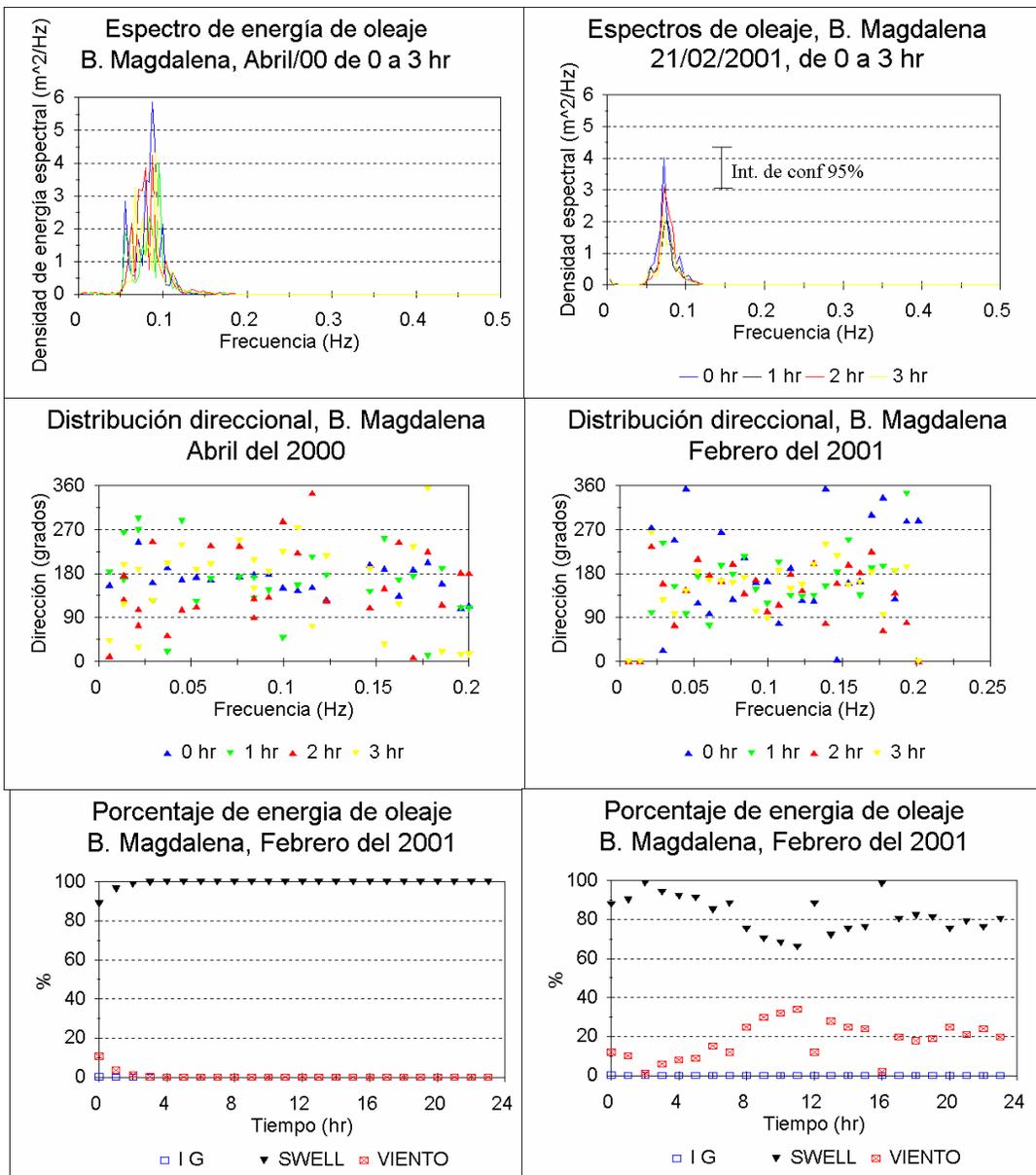


Figura 47. Espectros de energía de oleaje, distribución direccional y porcentajes de energía, Bahía Magdalena, 4 de abril del 2000 y 21 de febrero del 2001.

Capítulo 4. DISCUSIÓN

Bahía Magdalena responde a las variaciones del sistema de la Corriente de California en su parte meridional y de los procesos locales presentes en el interior de la Bahía. Entre estos procesos dinámicos que afectan a la circulación en el interior del sistema lagunar BM-BA y al intercambio hidrodinámico entre los elementos del sistema, las mareas y el viento son los más importantes (Sánchez Montante, 2004).

Estos mecanismos fueron discutidos por Eguiluz & Wong (2005).

La caracterización de la marea por medio de los anclajes de correntímetros permitió analizar las condiciones hidrodinámicas del intercambio de masa a través de los canales del sistema.

La marea en el sistema lagunar resultó ser de carácter mixto con dominancia de las componentes armónicas semidiurnas M2 y S2, las cuales constituyeron aproximadamente el 65% de la variación de la marea mientras que las diurnas K1 y O1 constituyeron un 34% adicional. Por otra parte Gómez Gutiérrez y Robinson, 2006, comentan que en Bahía Magdalena la marea tiene un patrón semidiurno con un rango máximo de 2.5 m, mientras que para otros autores el régimen de marea es mixto semidiurno (Anónimo, UNAM, 1985).

La temperatura, salinidad y sigma-t registrada en el fondo tienen correlación significativa con la marea. (Rodríguez Mata, 2006). La concentración de nutrientes depende directamente de las corrientes de marea en la boca de Bahía Magdalena. Se encontraron grandes concentraciones de nutrientes durante el flujo y mínimas durante el refluo (Guerrero et al., 1988). De otro lado Rosales Villa (2004) no encontró la correlación directa entre la fase de marea y concentración de nutrientes, posiblemente por estadística insuficiente.

Los resultados procesados de los correntímetros instalados con mayor duración de tiempo en la boca BM en los periodos del 21 de mayo al 7 de julio del 2002 (Fig.17) y del 19 de marzo al 8 de mayo del 2003 (Fig. 21) muestran que la amplitud varió de 0.8 m. durante la marea muerta a 2.5 m para la marea viva en el 2002, y de 0.7 m a 2.3 m en el 2003. El rango de la amplitud durante la marea viva fue de aproximadamente 3 veces mayor que el de la marea muerta.

Las series de tiempo de las corrientes en la boca BM fueron medidas a 0.4 m por encima del fondo. Las intensidades máximas se presentaron durante las fases de flujo y reflujos en las mareas vivas, cuando la tangente a la curva de la amplitud de marea fue máxima, velocidades mínimas se presentan durante los instantes de la marea parada. El eje mayor de la elipse de marea está orientado casi perpendicular a la longitud transversal de la boca de BM (Fig.22). La excentricidad de la elipse es de 0.05, indicando un comportamiento regresivo de las corrientes a través de la boca.

Las intensidades de las corrientes en los canales del interior del sistema (Fig. 48) alcanzaron en promedio 0.3 m/s con fluctuaciones de hasta 0.15 m/s. Mientras que Obeso Nieblas et al. (1999) mencionan que la corriente máxima registrada en Canal Gaviota durante la campaña fue de 0.52 m/s con una dirección Noroeste-Sureste con viento promedio de 4.0 m/s con dirección Noroeste.

Desafortunadamente, los resultados de los anclajes instalados a 0.4 m por encima del fondo marino en los canales relativamente someros de interconexión (Canal San Carlos y Canal Gaviotas) no siempre representan la intensidad y dirección media de las corrientes en toda la columna del agua. Esto es debido a un efecto de la topografía local en el punto de la instalación del anclaje. Particularmente, los equipos colocados en febrero del 2001 y mayo del

2002 (Fig.48b y 48d) en la boca de BM a una distancia menor que 0.5 km de la punta ubicada al noroeste de la boca, no presentaron valores medios de las corrientes en toda la sección de la boca.

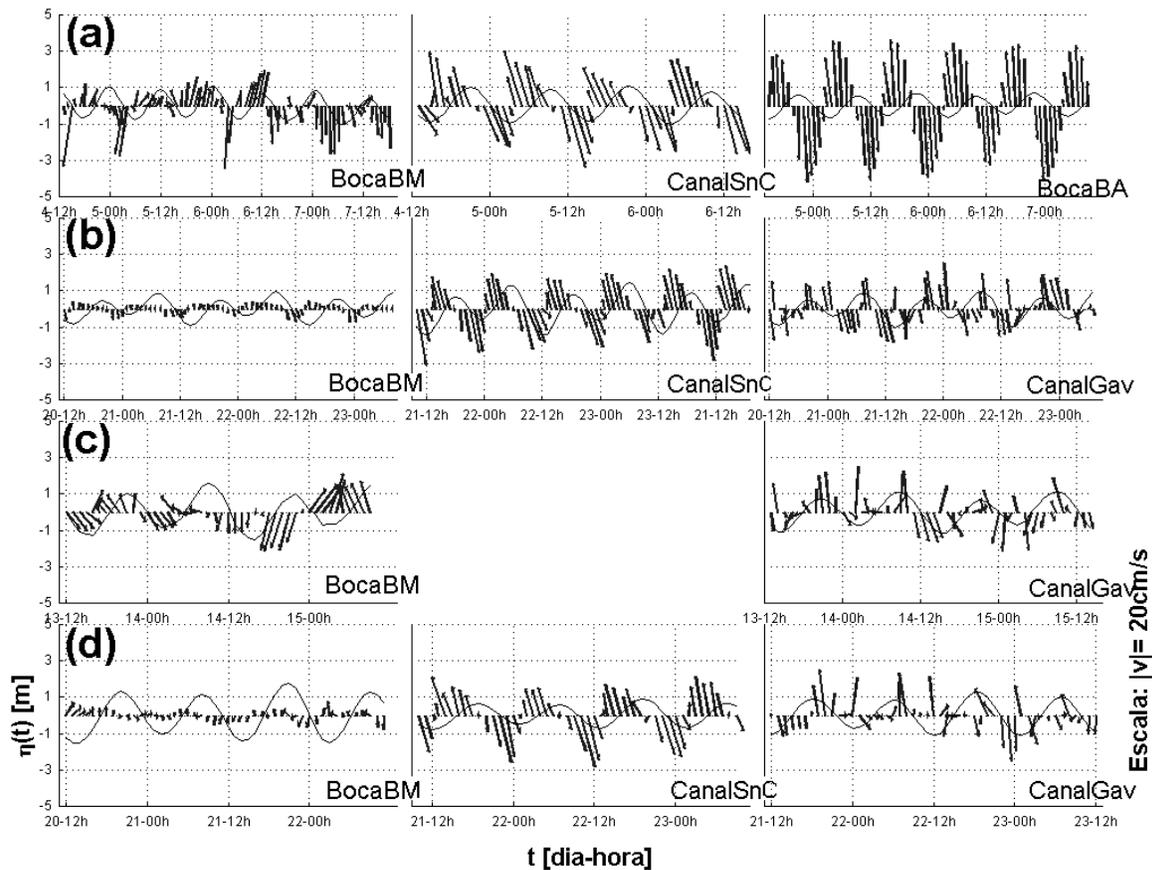


Figura 48. Las condiciones hidrodinámicas en los canales del sistema lagunar BM-BA caracterizadas por medio de los datos de los anclajes autónomos obtenidos en abril del 2000 (a), febrero del 2001 (b), noviembre del 2001 (c) y mayo del 2002 (d), tomado de (Sánchez Montante O., 2004).

En general, la evolución temporal de las corrientes sobre el Canal San Carlos, Canal Gaviotas y en la boca de BA presenta una mayor simetría bidireccional, entre las fases de flujo y reflujos que en la de las corrientes sobre la boca de BM. Esta diferencia está relacionada con los efectos topográficos: la boca de BM es ancha y profunda, mientras que todos los canales son angostos y someros.

La variación tanto de las intensidades como de las direcciones de las corrientes, a lo largo de un ciclo de marea, se representa por las elipses de marea mostradas en la (Fig. 49).

La orientación de las elipses de marea en el Canal San Carlos en abril del 2000, febrero del 2001 y mayo del 2002 (Figs. 49a, 49b y 49d) esta relacionada con la curvatura del canal de navegación donde fueron colocados los equipos. Las corrientes en este canal fueron estrictamente bidireccionales. La orientación de las elipses en la boca de BM en febrero del 2001 y mayo del 2002 (Figs. 49b y 49d) nos indica que las corrientes cerca de la punta Noroeste de la boca de BM tienen una componente principal Noroeste-Sureste y una componente principal Este-Oeste, respectivamente. Las corrientes en el Canal Gaviotas y en la boca de BA en abr00 y feb01 (Figs. 49a y 49b) fueron prácticamente bidireccionales.

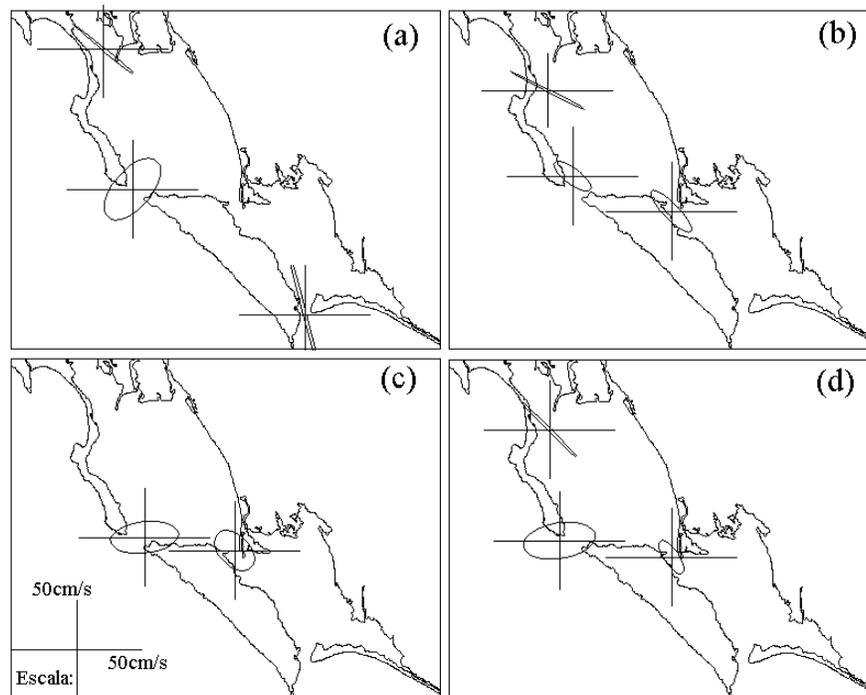


Figura 49. Las elipses de marea en los canales del sistema lagunar BM-BA obtenidas por medio de los datos de los anclajes autónomos en (a) abril del 2000, (b) febrero del 2001, (c) noviembre del 2001 y (d) mayo del 2002 tomado de (Sánchez Montante, 2004).

Debido al comportamiento regresivo de las corrientes de marea, el sistema lagunar mostró un balance hidrodinámico más o menos estable durante cada ciclo de marea. De tal manera que las contribuciones al transporte de masa deben quedar determinadas por los mecanismos dados por el viento, el oleaje y las mareas.

A partir de las mediciones obtenidas con el uso del ADCP a lo largo de la boca de BM durante la campaña de marzo del 2003, se calcularon para cada fase de la marea las componentes de los vectores de la velocidad de corriente, normales a la sección transversal a la boca. La distribución horizontal de las corrientes normales a la sección transversal de la boca de BM durante el flujo de marea (Fig. 41) muestra la uniformidad horizontal. Esto es, no existen o al menos no predominan las corrientes contrarias de fondo y los procesos de turbulencia en los extremos de la boca no son lo suficientemente intensos como para afectar considerablemente la dirección de las corrientes de marea. En la capa subsuperficial se observan las corrientes con intensidades que exceden 1 m/s. Un valor máximo instantáneo registrado durante todas las mediciones con ADCP en la boca principal de BM fue 1.35 m/s (4 de abril del 2000, flujo máximo de marea). Los resultados de otros investigadores confirman, que las corrientes en la boca principal de BM pueden alcanzar más de 1.25 m/s (Gómez-Gutiérrez y Robinson, 2006)

Las intensas corrientes durante los máximos flujo y reflujos de marea provocan en los canales angostos del interior del sistema lagunar, una intensa mezcla turbulenta. Este efecto fue mostrado con base en datos obtenidos durante una serie de las mediciones con ADCP en el Canal Gaviotas en noviembre del 2001 (Fig. 42). Este efecto es importante porque origina una resuspensión de sedimentos finos y una mezcla vertical de aguas, que afecta al desarrollo de los organismos marinos.

En la costa del Pacífico de la Península de Baja California Sur, domina el oleaje distante, el comportamiento relativo de oleaje de swell varió entre 70 y 90 % de toda la energía de oleaje. En las condiciones meteorológicas, prevalecen los vientos globales del Norte y Noroeste, las ondas de swell llegan de la misma dirección alcanzando alturas significantes hasta de 2.5 m y periodos significantes hasta de 20 s en Bahía Tortugas (Troyo Diéguez, 2003) mientras que en la boca principal de Bahía Magdalena en la mayoría de los registros las ondas de swell llegan del norte (Fig. 46) alcanzando amplitudes significantes máximas hasta 1.2 m y periodos significantes hasta 18 s. Las componentes de oleaje local de viento no se registraron en todas las series de mediciones ya que estas se presentan durante las brisas. Las ondas frecuentemente son agrupadas, esto mantiene buenas condiciones para el forzamiento de ondas forzadas largas de infragravedad (Troyo Diéguez, 2003).

CONCLUSIONES.

La marea es el factor principal del forzamiento hidrodinámico en las bocas y canales del sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas. El comportamiento de las mareas es de carácter mixto semidiurno.

La intensidad de las corrientes en la capa del fondo durante la marea viva (hasta de 0.6 m/s en los máximos de flujo y reflujo) fue en promedio 2.5 veces mayor que el de las corrientes de marea muerta en flujo y reflujo. Los eventos de flujo y reflujo son de corto plazo (horas).

El flujo a través de la boca principal de BM durante los periodos de flujo y reflujo de marea es más estable que los flujos en los canales del sistema, y las fluctuaciones en la boca de BM fueron en magnitud menores respecto de las que se presentaron en el Canal San Carlos y Canal Gaviotas. Esta diferencia está relacionada con la interacción de la onda de marea con la topografía de los canales del sistema por la fricción de fondo.

En el canal Gaviota se presenta una fuerte mezcla turbulenta, con variaciones de las corrientes que alcanzan casi un 60% del valor medio.

El oleaje dominante en la boca principal de Bahía Magdalena es de swell (de 70% a 90 %).

RECOMENDACIONES.

Un sentido fundamental de los resultados hidrodinámicos, con los que se puedan soportar las conclusiones obtenidas en otros campos de la investigación, es el que se refiere al transporte neto de material disuelto o en suspensión. Estos resultados son determinados a partir de la caracterización cualitativa y cuantitativa del sistema de circulación y el intercambio entre los elementos del sistema lagunar.

Los forzamientos de la circulación que determinan el transporte de material marino en BM-BA, son debido a la dinámica de mareas y de viento. Estos procesos requieren un monitoreo mas detallado en la región de estudio y demandan desde la instalación de instrumentación básica de medición, como mareógrafo(s) y estaciones autónomas meteorológicas, su optimización y mantenimiento, y hasta el monitoreo costero regular en una red con equipos oceanográficos tales como mediciones con ADCP con “bottom track” en movimiento.

También, es necesario el desarrollo, la aplicación y la calibración óptima de los modelos hidrodinámicos validados y flexibles al acoplamiento de módulos de procesos hidroquímicos, geológicos, ecológicos, etc.

Finalmente para completar la información oceanográfica sobre el sistema lagunar BM-BA resta mencionar los tópicos de investigación que a raíz de los resultados reportados en este texto se plantean que deben de ser abordados como continuación de la investigación hidrodinámica. Entre estos se encuentran:

1. La cuantificación de mezcla turbulenta en la zona por medio de los experimentos con colorantes;

2. Estudio de las condiciones atmosféricas locales por medio de una estación meteorológica.
3. La cuantificación sistemática del intercambio de agua en los canales de interconexión y del balance hidrodinámico del sistema lagunar.
4. Estudio de circulación en el interior del sistema lagunar mediante los flotadores de deriva.
5. Estudio sistemático de las mareas mediante un mareógrafo.

BIBLIOGRAFÍA.

- Abbott, M. B. and Price, W. A. 1994. Coastal, Estuarial and Harbour Engineer's Handbook, Editorial E & FN SPON,, London, UK: 727 p.
- Acosta J. y J. Lara, 1978. Resultados Fisicoquímicos en un Estudio de Variación Diurna en el Area Central de Bahía Magdalena, BCS. Ciencias Marinas. 5(1):37-45.
- Alvarez-Borrego S., L.A. Galindo Bect y A. Ch. Barragán, 1975. Características Hidrodinámicas de Bahía Magdalena, BCS. Ciencias Marinas. 2(2): 94-109
- Bernal, P.A., 1979. Large Scale Biological Events in the California Current. Scripps Institution of Oceanography. University of California, San Diego, La Jolla, C.A. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations (Abr. En las sigs referencias: CalCOFI, Vol. XX: 89-104.
- Blumberg, A.F. and G.L. Mellor, 1987. A Description of Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model. Published by the American Geophysical Union, 98 p.
- Contreras E.F. y J.R. Casillas, 1992. Importancia del Intercambio Mareal en Lagunas Costeras. Universidad y Ciencia, 9 (18):22-27.
- Dietrich G., K. Kalle, W. Krauss, G. Siedler, 1980. General Oceanography. Wiley Interscience, New York, 626 p.
- Dean, R. G. and R. A. Dalrymple, 1993. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, World Scientific, Singapore: 353 p.
- Drake, I. and T. Knauss, 1978. Oceanography. Holt, Reinhart y Winston, New York: 447 p.
- Eguiluz A. and K. Chuin Wong, 2005. Second Order Tidally Induced Flow in the Inlet

- of a Coastal Lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64: 509-518.
- Emery W.J. and R.E. Thomson, 1997. *Data Analysis in Physical Oceanography*. Pergamon Press, Tunbridge Wells, Kent, Great Britain: 634 pp.
- Frías A. y G. Moreno, 1988. *Ingeniería de Costas*. Limusa. México: 339 p.
- Garate L. y D. Siqueiros. 1998. Time Variation of Phytoplankton Assamblages in a Subtropical Lagoon System After the 1982-83 El Niño Event. *Pacific Science* 52(1): 79-97.
- García Escobar H., 1992. Análisis del Viento en el Area Frente a Bahía San Hipólito y la Zona Comprendida Entre Bahía Magdalena y Cabo San Lucas, B. C. S. en Junio y Julio de 1989. *Res. IX Congr. Nal. Oceanogr.* 28.
- Godin, G., 1972. *The Analysis of Tides*. University of Toronto Press. 246 pp.
- Gómez-Gutiérrez, J. and Robinson, C.J. 2006 Tidal Current Transport of Epibenthic Swarms of the Euphausiid *Nyctiphanes simplex* in a Shallow, Subtropical Bay on Baja California Peninsula, Mexico. *Marine Ecology Progress, Ser.* 320: 215–231
- Guerrero G.R., R. Cervantes D. and A. Jiménez I., 1988. Nutrient Variation during a Tidal Cycle at the Mouth of a Coastal lagoon in the Northwest of Mexico. *Indian Journal of Marine Sciencies*, 17: 235- 237.
- Hernandez-Trujillo S., R. Cervantes-Duarte y S. Aguiñiga-Garcia. 1997. Variación Espacial y Temporal de Algunas Variables Físicas, Químicas y Biológicas en Bahía Magdalena, B. C. S. (Julio - Agosto, 1988). *Rev. Inv. Cienc. Mar. UABCS* 8(1-2):1-13.
- Knauss, J.A. 1978. *Introduction to Physical Oceanography*. Prentice Hall, New

Jersey: 333 p

- Luch-Belda D., M. Hernández Rivas, R. Saldierna Martínez y R. Guerrero Caballero, 2000. Variabilidad de la Temperatura Superficial del Mar en Bahía Magdalena. *Oceánides*, 15:1-23.
- Mathews, C P., 1975. El Desarrollo de la Zona Bahía Magdalena. Un panorama socioeconómico en una región en pleno desarrollo. *Ciencias Marinas* 2(1): 47-49.
- Morales-Zarate M.V., Aretxabaleta A. L., Werner F. E., Llunch-Cota S. E. (2006). Modelación de la Circulación Invernal y la Retención de Partículas en el Sistema Lagunar Bahía Magdalena-Almejas (Baja California Sur, México). *Cienc. Mar.* 32: 631-647.
- Nienhuis G.H. and R. Guerrero C., 1985. A Quantitative Analysis of Annual Phytoplankton Cycle of the Magdalena Lagoon Complex (Mexico) *Journal Plankton Res.* 7(4): 427-441.
- Obeso Nieblas M., J. H. Heberto Gaviño y A. R. Illescas, 1999. Modelación de la Marea en el Sistema Lagunar Bahía Magdalena- Almejas, B.C.S., México. *Oceánides*. 14(2): 79-88.
- Otnes R.K. and L. Enochson, 1978. *Applied time Series Analysis. Volume 1. Basic techniques.* John Willey and Sons, New York: 428 pp.
- Phillips, O.M., 1977. *The Dynamics of the Upper Ocean.* Cambridge University Press, Cambridge: 319 p.
- Rodriguez Mata L.M., 2006 *Estudio a Microescala de los Nutrientes y Variables*

Hidrológicas en Bahía Magdalena, B. C. S., México. Tesis de maestría. CICIMAR-IPN, La Paz: 90 pp.

Rosales Villa A.R., 2004. Dinámica de Nutrientes en Bahía Magdalena, B. C. S., México. Tesis de maestría. CICIMAR-IPN, La Paz: 104 pp.

Sánchez Montante O., 2004. Hidrodinámica y Transporte de Masa en el Sistema Lagunar Magdalena-Almejas, Baja California Sur, México: (Experimentación y Modelación Numérica). Tesis doctoral. CICIMAR-IPN, La Paz: 237 pp.

Troyo Diéguez S., 2003. Oleaje de Viento y Ondas de Infragravidad en la Zona Costera de Baja California Sur. Tesis doctoral. CICIMAR-IPN, La Paz: 211 pp.

UNAM, 1985. Tablas de Predicción de Mareas. UNAM, México, México DF. 398p

Vetterling W.T., S.A. Teukolsky, W.H. Press and B.P. Flannery, 1992. Numerical Recipes, example book (Fortran), second edition. Cambridge University Press, New Cork: 245 p.

LISTA DE TABLAS.

- Tabla 1. Amplitud de las componentes armónicas principales de las mareas resueltas con base en las mediciones del mareógrafo en el puerto San Carlos BCS, (112.12°W , 24.79°N), durante el periodo Enero 1974-diciembre 1976
- Tabla 2. Número de estaciones de medición realizada en cada campaña oceanográfica.
- Tabla 3. Amplitud de las componentes armónicas principales de la mareas resueltas con base en las mediciones de las variaciones de nivel en el anclaje en la boca de BM, durante el periodo del 19 de marzo al 8 de mayo del 2003.
- Tabla 4. Promedio y desviación estándar de la variaciones de las corrientes por capas de 5 metros durante la serie de mediciones con ADCP en el Canal Gaviotas. Abril 7 del 2000, fase de flujo máximo de marea.

LISTA DE FIGURAS.

- Figura 1. Localización geográfica y la toponimia relativa al sistema lagunar BM-BA.
- Figura 2. Batimetría de Bahía Magdalena. Datos obtenidos de la Carta de Navegación, US NAVY y de la base de datos ETOPO2.
- Figura 3. Localización de los anclajes de correntímetros. Con los triángulos se marcan los anclajes, realizados en 2000-2004, con las cruces - programados a instalar.
- Figura 4. Localización de los correntímetros en la zona del canal San Carlos. puntos de muestreo
- Figura 5. Variaciones de las corrientes en frente el puerto San Carlos en abril del 2000. (a) variaciones del nivel, (b) la intensidad de las corrientes, (c) la dirección.
- Figura 6. (a) Periodo de las mediciones en la zona de San Carlos en Abril del 2000. (b) Variaciones del nivel del mar y de la temperatura. (c) Variaciones de salinidad.
- Figura 7. Espectro de energía de las variaciones del nivel del mar (a) y la elipse de marea (b). abril del 2000, en frente al puerto San Carlos.
- Figura 8. Mediciones de las corrientes en la boya 4 (Canal San Carlos) en febrero del 2001.
- Figura 9. Variabilidad de las variables termohalinas en la boya 4 (canal San Carlos) en febrero del 2001.
- Figura 10. Las corrientes en el Canal San Carlos (boya 4) en mayo del 2002.
- Figura 11. Localización de los puntos de instalación de los anclajes de los equipos en la boca principal de Bahía Magdalena.
- Figura 12. Las corrientes en la parte norte de la boca principal de Bahía Magdalena. abril de 2000.
- Figura 13. El espectro de las variaciones del nivel del mar (a) y la elipse de marea (b, en cm./s) en abril de 2000 en la boca de BM.
- Figura 14. Las corrientes en la parte norte de la boca principal de Bahía Magdalena, febrero del 2001.

- Figura 15. Las variaciones de nivel del mar y los vectores promedio de las corrientes de un anclaje en el centro de la boca principal de la Bahía Magdalena en noviembre del 2001.
- Figura 16. El espectro de las variaciones del nivel del mar (en m^2) y la elipse de marea (en cm./s) en noviembre del 2001 en la boca de BM.
- Figura 17. Las variaciones de nivel del mar (a), temperatura (b), salinidad (c) y Intensidad de las corrientes de un anclaje de largo plazo, instalado en el centro de la boca de BM en el periodo del 21 mayo al 5 de julio del 2002.
- Figura 18. Espectro de energía de las variaciones de nivel del mar para el anclaje a largo plazo, instalado en el centro de la boca de BM en el periodo del 21 mayo al 5 de julio del 2002. La barra vertical muestra un intervalo de confianza para el nivel de probabilidad de 0.95.
- Figura 19. Las variaciones de nivel del mar (a), temperatura (b), salinidad (c) y Intensidades de las corrientes en un anclaje de largo plazo durante la fase de marea viva en el centro de la boca de BM en el 2002.
- Figura 20. Las variaciones de nivel del mar (a), temperatura (b), salinidad (c) y intensidad de las corrientes en un anclaje de largo plazo durante la fase de marea muerta en el centro de la boca de BM en el 2002.
- Figura 21. Las variaciones de nivel del mar (a), intensidad de las corrientes (b), temperatura (c) y salinidad (d) en un anclaje de largo plazo, instalado en el centro de la boca de BM en el periodo del 18 marzo al 7 de mayo del 2003.
- Figura 22. Espectros de energía de las variaciones de nivel del mar (a) y de la intensidad de corrientes (b) para el anclaje de largo plazo, instalado en el centro de la boca de BM en el periodo del 18 de marzo al 7 de mayo del 2003. Las barras verticales muestran el intervalo de confianza para nivel de probabilidad de 0.95. El panel (c) muestra la elipse de marea.

- Figura 23. Un corte de 3 días de las series de tiempo de las variaciones de nivel del mar (a), intensidad de las corrientes (b), temperatura (c) y salinidad (d) en un anclaje de largo plazo, instalado en el centro de la boca de BM en el 2003.
- Figura 24. Localización de los puntos de instalación de los anclajes de los equipos en el Canal Gaviotas.
- Figura 25. Los vectores promedio en hora (a), la intensidad (b), las componentes de las corrientes (meridional – línea continúa, zonal – línea discontinúa (c) y variaciones de nivel del mar (d) en un anclaje en el Canal Gaviotas en el periodo del 20 al 23 de febrero del 2001.
- Figura 26. Las variaciones de nivel del mar y los vectores promedio de las corrientes en un anclaje en el Canal Gaviotas en noviembre del 2001.
- Figura 27. El espectro de las variaciones del nivel del mar (en m^2) y la elipse de marea (en cm./s) en noviembre del 2001 en el Canal Gaviotas.
- Figura 28. Las variaciones de nivel del mar (a), la intensidad (b) y la dirección de corrientes (c) en un anclaje de un correntímetro en el Canal Gaviotas en marzo del 2003.
- Figura 29. Localización de los puntos de instalación de los anclajes de los equipos en la boca de la Bahía Almejas.
- Figura 30. Las variaciones de nivel del mar (a), la intensidad (b) y la dirección de corrientes (c) en un anclaje de correntímetro en la boca de la Bahía Almejas en abril del 2000.
- Figura 31. Perfil de la corriente en el Canal San Carlos obtenido el 4 de abril del 2000 durante el máximo flujo de marea.
- Figura 32. Perfiles de las corrientes obtenidos con un ADCP en la boca de BM en abril del 2000 durante el reflujó de marea (estaciones 3 y 5).
- Figura 33. Perfiles de las corrientes obtenidos con un ADCP en la boca de BM en abril del 2000 durante el reflujó de marea (estaciones 6 y 7).
- Figura 34. Perfil de la corriente obtenido con un ADCP en el Canal Gaviotas en abril del 2000 durante el reflujó de marea.

- Figura 35. Perfil de la corriente obtenido con un ADCP de ADCP en la boca de BA en abril del 2000 durante el reflujó de marea.
- Figura 36. Perfiles de ADCP en los canales del sistema lagunar en abril del 2000.
- Figura 37. Variaciones del nivel del mar y cronograma de las mediciones con un ADCP en el transecto a través de la boca BM en marzo del 2003.
- Figura 38. Componentes normales (a) y los vectores en sistema polar (b) en el transecto a través de la boca BM en marzo del 2003 durante el reflujó de marea.
- Figura 39. Componentes normales (a) y los vectores en sistema polar (b) en el transecto a través de la boca BM en marzo del 2003 durante el flujo de marea.
- Figura 40. La distribución de las corrientes en la sección de la boca para la fase de reflujó de marea, marzo del 2003.
- Figura 41. La distribución de las corrientes en la sección de la boca para la fase de reflujó de marea, marzo del 2003
- Figura 42. Los perfiles de ADCP tomados en el Canal Gaviotas en noviembre del 2001 para evaluar la variabilidad de corrientes en micro escala temporal.
- Figura 43. Las variaciones del nivel del mar y las elipses de oleaje en la boca de BM en abril del 2000.
- Figura 44. Las variaciones de nivel del mar (a), la intensidad de la corriente (b), el espectro (c) y la elipse de los movimientos horizontales bajo de ola (d) en la serie del 4 de abril, 18:00 hrs.
- Figura 45. Las variaciones de nivel del mar (a), la intensidad de la corriente (b), el Espectro (c) y la elipse de los movimientos horizontales bajo de ola (d) en la serie del 5 de abril, 01:00 hrs.
- Figura 46. Estadística básica del oleaje. Bahía Magdalena, del 6 al 9 de abril del 2000 y del 20 al 23 de febrero del 2001.
- Figura 47. Espectros de energía de oleaje, distribución direccional y porcentajes de energía. Bahía Magdalena, del 4 de abril del 2000 y 21 de febrero del 2001.

Figura 48. Las condiciones hidrodinámicas en los canales del sistema lagunar BM-BA caracterizadas por medio de los datos de los anclajes autónomos obtenidos en (a) abril del 2000, (b) febrero del 2001, (c) noviembre del 2001 y (d) mayo del 2002.

Figura 49. Las elipses de marea en los canales del sistema lagunar BM-BA obtenidas por medio de los datos de los anclajes autónomos en (a) abril del 2000, (b) febrero del 2001, (c) noviembre del 2001 y (d) mayo del 2002.

GLOSARIO

ADCP (“Acoustic Doppler Current Profiler”) Instrumento que sirve para medir la velocidad de las corrientes. Este instrumento se puede programar para obtener una serie de tiempo del perfil de corrientes de la columna de agua. Se instala en el casco de un barco, o lancha o bien anclado al fondo con los sensores viendo hacia la superficie.

Advección. Transporte de masa o propiedades de un fluido debido al movimiento del mismo. En Oceanografía se refiere a movimientos horizontales y verticales. En meteorología solo a los movimientos horizontales de gran escala.

Amplitud. Es igual a la mitad de la distancia entre la cresta y el valle de una onda, o sea el mayor desplazamiento de un punto de la onda medido desde el centro. Se aplica tanto para olas como para mareas y por analogía, a las corrientes que estos fenómenos producen.

Análisis armónico. Proceso numérico para analizar series de tiempo separando sus diferentes componentes armónicos. El análisis armónico es utilizado en el estudio de la marea o de las corrientes de marea para separarlas en sus constituyentes armónicos básicos

Armónico. Un armónico es un componente senoidal de una señal. Su frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental.

Bajamar. El nivel más bajo de la superficie del mar alcanzado al estar descendiendo dicha superficie a causa de la marea. También se puede usar para designar el fenómeno de descenso de la superficie del mar a causa de la marea por debajo del nivel medio del mar.

Bajamar inferior. La bajamar que alcanza un mayor descenso de las dos que se pueden presentar durante el día cuando existan mareas mixtas.

Bajamar superior. La bajamar más alta de las dos que se pueden presentar durante el día de marea cuando existan mareas mixtas.

Batimetría. Se refiere a mediciones de la profundidad, a la configuración del suelo marino o a un mapa en donde esté delineado el perfil del fondo de un cuerpo de agua, por medio de contornos de igual profundidad (isóbatas).

Circulación termohalina. Circulación de las masas de agua oceánica, inducida por la diferencia de sus densidades.

Convergencia. Fenómeno que se presenta cuando aguas de diferente origen tienen una componente de su flujo que se unen en una línea o en un área, la cual es llamada línea de convergencia o zona de convergencia.

Correntímetro. Instrumento para medir la velocidad y dirección de la corriente. Las mediciones de estos instrumentos son generalmente eulerianas, dado que el instrumento se fija o ancla en una localización dada.

Corriente (Corriente Marina).- Movimiento del agua del océano, horizontal o vertical el cual se caracteriza por una cierta regularidad, que puede ser o tener una componente cíclica o más comúnmente formar un flujo continuo a lo largo de una trayectoria definida, por ejemplo, la corriente del Golfo o la corriente de California..

Corriente de refluo. El movimiento de la corriente de marea que fluye, alejándose de la costa o se desplaza río abajo en una desembocadura o que sale de una laguna costera o estuario.

Corriente litoral. Corriente en la zona litoral que fluye paralela a la costa, la cual es producida por el embate del oleaje con un ángulo oblicuo con respecto a la línea de costa.

Corrientes de marea. Movimientos horizontales alternantes del agua asociados con la elevación y descenso del nivel del mar, causados por la marea astronómica. En regiones costeras la alternancia de las corrientes de marea está dominada por la topografía, pudiendo presentarse en una sola dirección, solo cambiando el sentido.

Corrientes residuales. Comúnmente, este término se usa para conceptualizar las corrientes que resultan después de filtrar los efectos de la marea astronómica en los datos de corriente de una localidad dada. Este término también se utiliza para referirse a las corrientes producidas por el viento, o algunas veces para el flujo promedio después de eliminar la parte armónica de una serie de tiempo.

C.T.D. Instrumento oceanográfico para obtener perfiles de temperatura y conductividad con la presión, lo que permite calcular la salinidad y la densidad.

Diagrama T-S. Gráfica de datos de temperatura versus salinidad colectados en forma simultánea en cada nivel de una estación oceanográfica. Estos diagramas son muy útiles: permiten identificar las masas de agua, hacer estimaciones de la mezcla relativa entre ellas, relacionar la curva T-S y la densidad (σ_t), da idea de la estabilidad de la columna de agua y permite detectar datos erróneos en de temperatura y salinidad.

Difracción. En ondas, como el sonido la luz o el oleaje, es la distorsión que sufre el frente de la onda al pasar por un obstáculo. Para el oleaje, es el cambio de dirección asociado al cambio de rapidez que sufre una serie de olas con crestas paralelas cuando se aproximan a la costa con un cierto ángulo.

Divergencia. La divergencia de un flujo expresa la razón de disminución temporal de una cantidad por unidad de volumen. En Oceanografía se habla de divergencia de la circulación superficial, cuando en la estructura de la corriente horizontal, se presentan flujos en diferentes direcciones partiendo de un centro o una zona común.

El Niño. El fenómeno meteorológico “oscilación del sur”, el cual consiste en un desplazamiento de la masa atmosférica de gran escala entre el Pacífico occidental y el oriental. La relación es tan grande que en general se denomina al fenómeno “ENSO” “El Niño Southern Oscillation” (“El Niño Oscilación Austral”)

Elipse de mareas. Curva trazada por la punta de los vectores de la corriente de marea en un ciclo de ésta. Hay una elipse para cada frecuencia o armónico en particular.

Estabilidad. Es la resistencia a mezclarse o a invertirse de la columna de agua, como resultado de un gradiente positivo de la densidad con la profundidad.

Estratificación. Condición del fluido que implica la existencia de dos o más capas horizontales arregladas según su densidad, de tal manera que las capas menos densas están sobre las más densas.

Estuario inverso. Un estuario en el cual la evaporación excede a los aportes de agua dulce, incluyendo la lluvia, con esto resulta una mezcla de agua más salina al interior del estuario, con el agua de mar de la boca menos salina.(En algunos tratados también se le llama estuario negativo o **antiestuario**).

Estructura Termohalina. En un cuerpo de agua, la estructura termohalina está dada por los valores de temperatura y salinidad para cada elemento del fluido.

Descripción Eulereana. La que se hace de las características de un fluido en movimiento a partir de lo que ocurre en un punto fijo conforme pasa el tiempo.

Flujo de marea. Se refiere a la corriente o al lapso de tiempo cuando se presenta la corriente provocada por la elevación de la marea.

Forzamiento. Fuerza o impulso que al aplicarse a un fluido provoca alguna reacción. Por ejemplo el viento que sopla sobre la superficie del mar, es un forzamiento que induce algún tipo de movimiento en el fluido.

Fotosíntesis.- Proceso mediante el cual las plantas obtienen alimento en forma de hidratos de carbono, a partir de dióxido de carbono y agua en la presencia de clorofila, utilizando la energía de la luz solar y liberando oxígeno.

Hundimiento. (downwelling).- Movimientos verticales hacia abajo de aguas superficiales debido a un incremento de la densidad causado por fenómenos meteorológicos (enfriamiento, congelación, evaporación) o por la convergencia de dos o más masas de agua en una región geográfica.

Laguna costera. Cuerpo de agua protegido que tiene acceso limitado al mar. Depresión somera por debajo del nivel medio de marea alta conectada con el mar por uno o varios canales.

Línea de Costa. La intersección entre la superficie del agua y la tierra. En zonas donde no existe influencia notable por las fluctuaciones de la marea, la línea de costa está definida por el nivel medio del mar. En zonas con influencia de la marea, la línea de costa está definida por el nivel medio de las mareas talas.

Marea. Es la variación periódica del nivel del mar, debido al movimiento relativo y a la atracción gravitacional entre el sol, la luna y la tierra. Esta variación del nivel del mar se propaga como una onda a través de las cuencas oceánicas.

Oleaje. Sucesión continúa de olas. Movimiento ondulatorio del mar.

Ondas distantes o mar de fondo (swell en ingles). Son ondas que se propagan libremente, sin la influencia del viento. Tienen periodos entre 10 y 20 segundos.

Pleamar. El nivel más alto de la superficie del mar alcanzado en un sitio al estar ascendiendo dicha superficie a causa de la marea.

Pleamar inferior. Es la pleamar de menor elevación durante un día, cuando en un sitio se presentan dos pleamares ocasionadas por mareas mixtas.”

Pleamar superior. Es la pleamar de mayor elevación durante un día, cuando en un sitio se presentan dos pleamares ocasionadas por mareas mixta.

Rango de marea. Diferencia en altura entre una marea alta y una baja consecutivas.

Reflujo de marea. Es el lapso de tiempo cuando se presenta la corriente provocada por la bajada de la marea. La corriente de reflujo generalmente es hacia mar adentro.

Salinidad. Es la medida de la cantidad de sales disueltas en el agua de mar.

Sigma-t (σ_t). Representa en forma abreviada el valor de la densidad de una muestra de agua de mar en función de su temperatura y salinidad in situ a presión constante e igual a cero. Convierte una cantidad como 1026.35 kg/m^3 en un número (26.35), donde generalmente se omiten las unidades y que es más fácil de usar.

Surgencia. Ascenso de aguas subsuperficiales, más frías y con mayor concentración de nutrientes, que reemplazan a las aguas superficiales, en zonas restringidas del océano.

Turbulencia. Estado del flujo en el cual las velocidades instantáneas muestran fluctuaciones irregulares, caóticas e impredecibles tanto en el tiempo como en el espacio; así que en la práctica sólo sus propiedades estadísticas pueden ser analizadas.