

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



HIDRODINÁMICA DE LA BAHÍA DE SAN QUINTÍN, B. C.

T E S I S

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA

NIDIA TERESA ANGULO LARIOS

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO. NOVIEMBRE DEL 2006.

RESUMEN

Se analizan datos de series de tiempo de corrientes, temperaturas y variables meteorológicas para estudiar la hidrodinámica de Bahía San Quintín, B. C. (BSQ), durante el periodo Mayo-Junio del 2004. Las corrientes fueron medidas con ADCPs (*Acoustic Doppler Current Profilers*) sobre el fondo de los canales de la boca de conexión con el Océano Pacífico y en el interior. En la boca, las *corrientes totales* alcanzaron velocidades mayores a 1 m/s en superficie, mientras que las *corrientes residuales* fueron de ~ 0.1 m/s con dirección *NNW* en superficie y con dirección *NNE* en el fondo. Los resultados sugieren que la circulación residual en esta localidad es inducida por las interacciones no lineales de la marea, cuyas velocidades se incrementan durante mareas vivas y disminuyen durante mareas muertas. Los registros de temperatura sugieren que los flujos de salida ocurren sobre la porción somera. Cálculos del número de Ekman (*E*) mayores a 1 sugieren que los efectos viscosos son más importantes que los efectos de la rotación de la tierra, y sustentan los resultados de mediciones en el sentido de flujos residuales de entrada por las zonas profundas (canal principal hacia el oeste) y de salida por las partes someras (este). En el interior de la bahía las *corrientes totales* también alcanzaron velocidades mayores a 1 m/s; sin embargo, las *corrientes residuales* alcanzaron velocidades de 0.18 m/s en superficie con dirección *ENE*. En esta área se encontró que los flujos residuales son inducidos por la marea y el viento principalmente. El viento actúa de manera directa en superficie al conducir los flujos superficiales casi en el mismo sentido a este forzamiento y de manera indirecta en el fondo al permitir flujos compensatorios que permiten restablecer el balance de masa. Existen evidencias fisicoquímicas de que ocurrieron pulsos de surgencias moderadas, durante el periodo de Mayo-Junio del 2004, cuando las temperaturas del agua descendieron hasta 10.9 °C y los nitratos alcanzaron valores de hasta 14.6 μM en la boca.

**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSTGRADO EN OCEANOGRAFÍA COSTERA**

HIDRODINÁMICA DE LA BAHÍA DE SAN QUINTÍN, B. C.

T E S I S

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

NIDIA TERESA ANGULO LARIOS

Aprobada por:

Dr. Reginaldo Durazo Arvizu
Presidente del jurado

Dr. Adán Mejía Trejo
Sinodal

Dr. J. Antonio Martínez Alcalá
Sinodal

Dr. Alejandro J. Souza
Sinodal

DEDICATORIA

- *A mi Amada Familia:*
 - *Mi Esposo Eliazar, por su amor y apoyo, al haber asumido gran parte de mi responsabilidad como madre, a fin de que yo pudiera realizar este proyecto académico.*

 - *Mis hijas:*
 - *Olimpia, Celia y Adria. Por ser lo más hermoso que me ha dado Dios.*

AGRADECIMIENTOS

- **A mi Comité de Tesis:**
 - Director de Tesis:
 - Dr. Reginaldo Durazo Arvizu. Por su acertada asesoría y dirección de este trabajo de tesis.
 - Sinodales:
 - Dr. Adán Mejía Trejo. Por su incondicional apoyo en mi proceso de aprendizaje en la herramienta de programación utilizada en este estudio.
 - Dr. Alejandro J. Souza. Por sus comentarios y sugerencias en el análisis de datos.
 - Dr. Antonio Martínez Alcalá. Por sus críticas acertadas que me indujeron a investigar más a fondo algunos tópicos inherentes a mi trabajo de investigación
- **Secretaría de Marina.** Por las facilidades brindadas para efectuar el postgrado.
- Al Proyecto SEP-CONACYT D40144F, por el financiamiento del estudio multidisciplinario **“RESPUESTAS FÍSICAS, GEOQUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE BAHÍA SAN QUINTÍN A LOS PULSOS DE AGUA DE SURGENCIAS DEL MAR ADYACENTE”**, del cual forma parte este trabajo de investigación.
- Al Dr. Víctor Camacho Ibar director del proyecto, por permitirme colaborar en este estudio.
- A todo el personal de investigadores y estudiantes que participaron en este proyecto en sus distintas etapas.
- **Proudman Oceanographic Laboratory.** Por la estancia académica brindada en el 2005.
- A mis compañeros de postgrado en especial a la M. C. Guadalupe Morteo Reyes, por apoyarme en los múltiples trámites que realicé por mí.
- A mis compañeros de trabajo M. en C. Manuel Mancilla Peraza y Tte. Corb. SCMA. Ocean. Francisco Padilla Osuna, porque su disciplina y dedicación a la investigación oceanográfica han sido siempre un ejemplo a seguir, mismo que en gran medida sirvieron de motivación para iniciar esta maestría.
- A toda las personas que de manera directa o indirecta me apoyaron para la realización de este trabajo de investigación.

INDICE

I . INTRODUCCIÓN	1
I.1. ANTECEDENTES	2
I.2. OBJETIVOS	11
<i>I.2.1. Objetivo General.</i>	11
<i>I.2.2. Objetivo Específico</i>	12
 II. MÉTODOS	 13
II.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	13
II.2. METODOLOGÍA.....	16
<i>II.2.1. Obtención de Datos.</i>	16
<i>II.2.2. Localización de equipos y</i> <i>descripción de las mediciones.</i>	17
<i>II.2.3. Procesamiento Preliminar</i>	22
<i>II.2.4. Análisis de Datos</i>	23
<i>II.2.4.1. Análisis Armónico.</i>	24
<i>II.2.4.2. Análisis Espectral.</i>	27
<i>II.2.4.3. Funciones de Correlación.</i>	29
<i>II.2.4.4. Filtrado de Datos</i>	32
<i>II.2.4.5. Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs).</i>	34

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS..... 38

III.1. VARIABLES COMPLEMENTARIAS Y

FORZAMIENTOS OBSERVADOS..... 38

III.1.1. Nivel del Mar..... 38

III.1.2. Gradientes de Presión..... 45

III.1.3. Variables Meteorológicas..... 50

III.1.4. Temperatura del Mar 52

III.1.4.1. Serie de Tiempo de Temperaturas 52

III.1.4.2. Gradientes de temperaturas..... 58

III.1.4.3. Surgencias..... 61

III.2. CORRIENTES EN LA BOCA DE LA BAHÍA. 66

III.2.1. Corrientes Totales en la Boca..... 66

III.2.2. Corrientes Residuales (bajas frecuencias)

en la Boca..... 72

III.3. CORRIENTES EN EL INTERIOR DE LA BAHÍA..... 83

III.3.1. Corrientes Totales en el Interior de la Bahía..... 84

III.3.2. Corrientes Residuales (bajas frecuencias)

en el Interior de la Bahía..... 94

IV. DISCUSIONES.....	108
<i>IV.1. Influencia de la Marea sobre las Corrientes.....</i>	109
<i>IV.2. Circulación Residual</i>	111
<i>IV.2.1. Circulación Barotrópica en la Boca de la Bahía y Efectos de la Amplitud de la Marea en el flujo residual.....</i>	111
<i>IV.2.2. Efecto del Viento y gradientes de densidad en el interior de la Bahía.....</i>	113
<i>IV.2.3. Efecto de la Batimetría y de la longitud del canal en el Intercambio Océano-Bahía.....</i>	117
<i>IV.3. Efecto de las Surgencias del Mar Adyacente en la Boca de la Bahía.....</i>	118
V. CONCLUSIONES.....	123
BIBLIOGRAFIA... ..	125

LISTA DE FIGURAS	<i>Página</i>
Figura 1. Dependencia del flujo inducido por la marea en un estuario (en la profundidad promedio) en forma de V . (figura tomada de Li y O'Donnell, 1997 en Li <i>et al.</i> , 1998). La U_s y U_d son las velocidades submareales sobre las partes someras y del canal, respectivamente. Los segmentos más ancho de la curva indican el rango correspondiente al Río James, E.U.	6
Figura 2. Contornos del flujo a lo largo del estuario obtenido por Kasai <i>et al.</i> (2000). Solución sobre una sección triangular con diferentes números de Ekman. Correspondientes a diferentes valores de Az son (a) 0.1, (b) 0.01, y (c) $0.001 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Los valores negativos indican un flujo neto de entrada y los positivos un flujo neto de salida.	8
Figura 3. Diagrama esquemático de una surgencia costera en el hemisferio norte. Esquema tomado de http://www.pfeg.noaa.gov .	10
Figura 4. Bahía de San Quintín, B. C. Mapa de localización del área de estudio. Brazo Bahía San Quintín (BSQ) y Brazo Bahía Falsa (BF). (Tomada por Dr. David H. Ward del U.S. Geological Survey, Alaska Science Center).	13
Figura 5. Localización de los equipos instalados en la Bahía de San Quintín, B. C. Los contornos representan profundidad en metros referidos al nivel de bajamar media inferior.	19
Figura 6. a).- Esquema de instalación de anclaje del ADCP RDI-Boca en la Bahía de San Quintín, B. C. b).- Esquema de anclaje NA y NB interior de la Bahía.	20
Figura 7. Estación meteorológica automatizada Aanderaa instalada al norte de Bahía San Quintín, B. C.	21
Figura 8a. Representación esquemática de un filtro ideal PASA-BAJAS con respuesta unitaria ($A=1$) en el intervalo $\{-f_c < f < f_c\}$.	32
Figura 8b. Representación esquemática del filtro real PASA-BAJAS.	34

	<i>Página</i>
Figura 9.- a) Serie de tiempo del nivel del mar en la estación RDI-Boca referido al nivel promedio. b) Espectro de frecuencia de la señal de marea al 95% de confianza. Las unidades del eje vertical son en metros [m] con escala logarítmica y el eje horizontal es la frecuencia en ciclos por hora [cph].	40
Figura 10.- a y c) Series de tiempo del nivel medio del mar en las estaciones <i>NA</i> y <i>NB</i> respectivamente. b y d) Espectros de frecuencias de la señal de marea al 95% de confianza de las estaciones <i>NA</i> y <i>NB</i> . Las unidades del eje vertical son en metros [m] con escala logarítmica y el eje horizontal es la frecuencia en ciclos por hora [cph].	43
Figura 11.- a) Serie de tiempo del viento (filtrado) y gradientes de presión (filtrados) entre las series del nivel de mar de las estaciones b) RDI-Boca, c) <i>NA</i> y d) <i>NB</i> . La flecha indica la dirección del viento en la convención oceanográfica.	45
Figura 12 a). Correlación cruzada entre el gradiente de presión longitudinal de BSQ ($\partial P/\partial y$) y la magnitud del viento (y sus componentes). b) Correlación cruzada entre el gradiente de presión transversal de BSQ ($\partial P/\partial x$) y la magnitud del viento (y sus componentes). Lag=1 representa el desfase en una hora.	48
Figura 13. Variables ambientales registradas en la estación meteorológica (Aanderaa) instalada al <i>Norte</i> de Bahía Falsa. a) Temperatura del aire. b) Humedad relativa c) Radiación solar d) Magnitud del viento e) Presión atmosférica.	50
Figura 14. Espectro de frecuencia de la componente Norte-Sur (<i>v</i>) y Este-Oeste (<i>u</i>) del viento.	51
Figura 15. Series de tiempo de temperatura. La línea azul indica la señal cruda y la línea roja indica la señal filtrada mediante un filtro pasa-bajas. El número en la leyenda indica la estación del termógrafo.	52
Figura 16. Espectro de frecuencia de las series de temperaturas en la boca, interior y cabeza de la Bahía de San Quintín, B.C.	54

	Página
Figura 17. a) Serie de tiempo de las diferencias de temperaturas de los termógrafos (T3 y T2) instalados en la boca de Bahía San Quintín. b) Serie durante mareas muertas. c) Serie durante mareas vivas.	55
Figura 18.- Serie de tiempo de las diferencias de temperaturas en el Interior de la Bahía. a) Diferencia entre los termógrafos T6 y T8. b) Diferencia entre los termógrafos T6 y T5. c) Diferencia entre los termógrafos T5 y T9.	57
Figura 19. Serie de tiempo de los gradientes de temperatura calculados entre el termógrafo T ₃ -Boca y T ₇ -Cabeza oeste, T ₁₃ -cabeza este y T ₂ -Boca.	59
Figura 20.- a) Serie de tiempo del nivel medio del mar durante la transición de mareas muertas a vivas, comparado con la serie de temperaturas del sensor de la estación RDI-Boca y el termógrafo instalado en la boca extremo Oeste (T ₃) durante los registros de mínimas temperaturas. b) Vivas a muertas.	62
Figura 21. Correlación entre la serie de Serie de tiempo del viento y las series de temperaturas del sensor de la estación RDI-Boca y el termógrafo instalado en la boca extremo Oeste (T ₃). Lag positivo significa que serie de la temperatura precede a la serie del viento.	63
Figura 22. Serie de tiempo de las corrientes superficiales, a media agua y fondo, de la componente “u” y “v” respectivamente.	66
Figura 23. Contorno de las corrientes totales en todos los niveles, para ambas componentes “u y v”, durante un periodo de dos días. La barra de color representa la escala de la magnitud de las componentes [m/s]. Los valores positivos son hacia el <i>norte</i> y <i>este</i> , y los negativos hacia el <i>sur</i> y <i>oeste</i> , respectivamente.	66
Figura 24. a) Perfiles vertical del promedio de cada uno de los niveles muestreados en la estación RDI-Boca para ambas componentes y b) desviación estándar. La componente “y” indica la profundidad a partir del sensor del aparato. c) Vectores de la velocidad promedio de la corriente de cada nivel muestreado durante todo el periodo [m/s].	68

	Página
Figura 25. Espectro de potencia de la componente N-S de la corriente promedio en la estación RDI-Boca. El espectro se calculó con 6 grados de libertad y 95% de confianza. Escala logarítmica en ambos ejes.	69
Figura 26. a) Elipses de los principales constituyentes de marea de las corrientes totales en promedio de toda la columna de agua obtenido en la estación RDI-Boca. Las elipses de K_1 y S_2 están corridas 0.1 m/s y 0.2 m/s respectivamente hacia la derecha para una mejor apreciación. b). Elipses de los principales constituyentes de marea de las corrientes totales observadas en la superficie a una distancia de 14 m sobre el fondo.	70
Figura 27. a) Variabilidad temporal y b) espacial arrojada del <i>primer modo</i> obtenido de las <i>FEOs</i> aplicadas a los datos de corrientes del anclaje RDI-Boca. La escala en [m/s] de las componentes vectoriales se indican en su correspondiente eje x y y .	71
Figura 28. a) Serie de tiempo del vector viento b) contornos verticales de las series de tiempo de las corrientes de baja frecuencia a lo largo del canal y c) componente a través del canal. La línea azul representa la superficie del agua. La barra de color representa la escala de la magnitud de las componentes [m/s]. Los valores positivos indican corrientes hacia <i>norte</i> y <i>este</i> , y los negativos hacia el sur y oeste respectivamente. Se utilizó el criterio oceanográfico (hacia donde va) para indicar sentido de la dirección del viento.	76
Figura 29. Perfil de las corrientes residuales de marea promediadas en cada uno de los niveles muestreados en la estación RDI-Boca. Las unidades están dadas en [m/s].	77
Figura 30.- a) Correlación vectorial entre el viento y la corriente residual <i>RDI-Boca</i> en los diferentes niveles muestreados. b) Angulo de correlación entre el viento y la corriente, valores positivos indican que la primera serie (corrientes) es rotada en contra de las manecillas del reloj con respecto de la serie dos (viento).	77
Figura 31. Variación temporal de los tres primeros modos ortogonales aplicados a las series de tiempo de las corrientes residuales de marea obtenidas en la estación RDI-Boca.	79

	<i>Página</i>
Figura 32. Variación espacial de los tres primeros modos ortogonales aplicados a las series de tiempo de las corrientes residuales de marea obtenidas en la estación RDI-Boca. La escala de las componentes vectoriales se indican en su correspondiente eje x y y con amplitudes relativas.	80
Figura 33.- Comparación del primer modo de las corrientes residuales contra gradiente de temperatura a lo largo del canal ($\partial T/\partial y$) y componente meridional del viento (Wy).	81
Figura 34.- Comparación del segundo modo de las corrientes residuales contra componente meridional del viento (Wy) y gradiente de presión a lo ancho del canal ($\partial P/\partial x$).	81
Figura 35.- Comparación del tercer modo de las corrientes residuales contra componente zonal del viento (Wx).	82
Figura. 36.- a) Contornos de las corrientes absolutas en todos los niveles, para ambas componentes “ u y v ”, durante un periodo de cinco días obtenidos en la estación NA b) contornos de la estación NB . La barra de color representa la escala de la magnitud de las componentes en [m/s]. Los valores positivos indican hacia <i>norte</i> y <i>este</i> , y los negativos hacia sur y oeste respectivamente.	84
Figura 37.- a y c) Perfiles verticales del promedio temporal $\langle u \rangle$ y $\langle v \rangle$ y b-d) desviación estándar para ambas componentes de cada uno de los niveles muestreados en las estaciones NA y NB respectivamente. Los promedios en los niveles superficiales (por encima de 6 m en NA y de 5 m en NB) se encuentran sesgados, debido a que solo se contó con información durante las pleamares. La componente “ y ” indica la profundidad a partir del sensor del aparato.	86
Figura 38a-b) Vectores de la velocidad promedio de la corriente de cada nivel muestreado. La escala de las componentes vectoriales se indica en sus correspondientes ejes horizontales en [m/s].	87
Figura 39. Espectro de potencia del promedio vertical de la corriente a) Componente más energética de la estación NA y b) Componente más energética de la estación NB . El espectro se calculó con 6 grados de libertad y 95% de confianza. El eje horizontal y vertical tiene una escala logarítmica.	88

	<i>Página</i>
Figura 40.- a) Elipses de las principales constituyentes de marea del promedio vertical de las corrientes absolutas obtenidas en las estaciones <i>Nortek A</i> . b) Nivel superficial. Los ejes <i>x</i> y <i>y</i> están dados en [m/s].	90
Figura 41.- a) Elipses de las principales constituyentes de marea del promedio vertical de las corrientes absolutas obtenidas en las estaciones <i>Nortek B</i> . b) Nivel superficial. Los ejes <i>x</i> y <i>y</i> están dados en [m/s].	91
Figura 42. a) Variabilidad temporal y b) espacial arrojada del <i>primer modo</i> obtenido de las <i>FEOs</i> aplicadas a los datos de corrientes del anclaje <i>Nortek A</i> . La escala de las componentes vectoriales se indica en su correspondiente eje horizontal y con amplitud relativa.	92
Figura 43. a) Variabilidad temporal y b) espacial arrojada del <i>primer modo</i> obtenido de las <i>FEOs</i> aplicadas a los datos de corrientes del anclaje <i>Nortek B</i> . La escala de las componentes vectoriales se indica en su correspondiente eje horizontal y con amplitud relativa.	93
Figura 44. a) Diagrama de astillas de la serie de tiempo del viento filtrado mediante un filtro pasa baja. Cada vector representa un promedio de cada 4 horas de registro. b) contornos de corrientes de baja frecuencia en la estación <i>NA</i> a lo largo del canal. c) Contornos a través del canal. La línea azul continua representa la superficie del agua medida por el sensor de presión. La escala vertical en colores indica magnitud de las componentes. Los valores positivos son hacia el norte y este y los negativos hacia el sur y oeste.	94
Figura 45.- a) Diagrama de astillas de la serie de tiempo del viento filtrado mediante un filtro pasa baja. Cada vector representa un promedio de cada 4 horas de registro. b) contornos de corrientes de baja frecuencia en la estación <i>NB</i> a lo largo del canal. c) Contornos a través del canal. La línea azul continua representa la superficie del agua medida por el sensor de presión. La escala vertical en colores indica magnitud de las componentes. Los valores positivos son hacia el norte y este y los negativos hacia el sur y oeste.	95

	<i>Página</i>
Figura 46.- Perfil de las corrientes residuales de marea promediadas en cada uno de los niveles medidos durante todo el periodo de muestreo en la estación <i>Nortek A</i> . La escala de las componentes vectoriales se indica en su correspondiente eje horizontal en [m/s].	96
Figura 47.- Perfil de las corrientes residuales de marea promediadas en cada uno de los niveles medidos durante todo el periodo de muestreo en la estación <i>Nortek B</i> . La escala de las componentes vectoriales se indica en su correspondiente eje horizontal en [m/s].	96
Figura 48.- a) Correlación vectorial entre el viento y la corriente residual <i>NA</i> en los diferentes niveles muestreados. b) Angulo de correlación entre el viento y la corriente, valores positivos indican que la primera serie (corrientes) es rotada en contra de las manecillas del reloj con respecto de la serie dos (viento). c) similar al inciso a), pero con signo (signo negativo indica correlación inversa).	99
Figura 49.- a) Correlación vectorial entre el viento y la corriente residual <i>NB</i> en los diferentes niveles muestreados. b) Angulo de correlación entre el viento y la corriente, valores positivos indican que la primera serie (corrientes) es rotada en contra de las manecillas del reloj con respecto de la serie dos (viento). c) similar al inciso a), pero con signo (signo negativo indica correlación inversa).	99
Figura 50.- a-b) Variación temporal de la amplitud relativa de los dos primeros modos ortogonales aplicados a las series de tiempo de las corrientes residuales obtenidas en la estación <i>NA</i> . c-d) Variación espacial los dos primeros modos ortogonales. La escala de las componentes vectoriales se indica en su correspondiente eje horizontal con magnitud relativa.	102
Figura 51.- a-b) Variación temporal de la amplitud relativa de los dos primeros modos ortogonales aplicados a las series de tiempo de las corrientes residuales obtenidas en la estación <i>NB</i> . c-d) Variación espacial los dos primeros modos ortogonales. La escala de las componentes vectoriales se indica en su correspondiente eje horizontal con magnitud relativa.	103
Figura 52. a) Variación Temporal del Modo 1 de la corrientes residuales de la estación <i>NA</i> . b) Comportamiento del gradiente de temperatura a lo largo de Bahía San Quintín $-(\partial T/\partial y)$. c) Componente zonal del viento filtrado (W_x).	104

	Página
Figura 53. a) Variación Temporal del Modo 2 de las corrientes residuales de la estación <i>NA</i> . b) Componente zonal del viento filtrado (W_x). c) Componente meridional del viento filtrado (W_y).	105
Figura 54. a) Variación Temporal del Modo 1 de la corrientes residuales de la estación <i>NB</i> (multiplicado por -1 a fin de facilitar la comparación visual). b) Comportamiento del gradiente de temperatura a lo largo de Bahía San Quintín ($\partial T/\partial y$). c) Componente zonal del viento filtrado (W_x).	105
Figura 55. a) Variación Temporal del Modo 2 de las corrientes residuales de la estación <i>NB</i> . b) Gradiente de presión a lo ancho del canal ($\partial P/\partial x$).	106
Figura 56. Vectores de las corrientes residuales en la boca e interior de Bahía de San Quintín, B. C.	116
Fig. 57. Esquema conceptual del principal mecanismo de transporte de nutrientes dentro de las lagunas costeras. Los nutrientes de las surgencias se mueven dentro del sistema lagunar debido a los flujos de las corrientes de mareas a la par con la mezcla turbulenta. Figura tomada de Zaytsev, <i>et al.</i> (2003).	118

LISTA DE TABLAS	Página
Tabla I. Equipos utilizados y periodos de muestreos.	17
Tabla II. Principales componentes armónicas de marea observadas en la estación RDI-Boca. Las frecuencias están expresadas en ciclos por hora, las amplitudes en metros, y la fase en grados relativa al meridiano de Greenwich.	39
Tabla III. Principales componentes armónicos de marea observadas en las estaciones Nortek A y Nortek B. Las amplitudes están expresadas en metros, y la fase en grados relativa al meridiano de Greenwich.	41
Tabla IV. Estadística básica de las variables meteorológicas.	49
Tabla V. Matriz de correlación cruzada entre las corrientes de superficie y fondo de cada uno de los ADCPs y diferentes forzamientos a lag = 0 de desfase.	64
Tabla VI.- Correlaciones entre principales modos obtenidos mediante la aplicación de <i>funciones empíricas ortogonales FEOs</i> a los datos de corrientes residuales "RDI-Boca" Vs gradientes de temperatura ($\partial T / \partial x, \partial T / \partial y$), componentes zonal y meridional del viento (W_x y W_y) y gradientes de presión ($\partial P / \partial x, \partial P / \partial y$).	80
Tabla VII.- Estadística básica de las magnitudes de las corrientes obtenidas de los ADCPs en las estaciones <i>Nortek A</i> y <i>Nortek B</i> durante el periodo de muestreo del 23 mayo al 13 junio del 2004.	84
Tabla VIII.- Correlaciones entre principales modos obtenidos mediante la aplicación de <i>funciones empíricas ortogonales FEOs</i> a los datos de corrientes residuales "Nortek A" vs Gradientes de Temperaturas ($\partial T / \partial x, \partial T / \partial y$), componentes zonal y meridional del viento (W_x y W_y) y gradientes de presión ($\partial P / \partial x, \partial P / \partial y$).	104
Tabla IX.- Correlaciones entre principales modos obtenidos mediante la aplicación de <i>funciones empíricas ortogonales FEOs</i> a los datos de corrientes residuales "Nortek B" Vs Gradientes de Temperaturas ($\partial T / \partial x, \partial T / \partial y$), componentes zonal y meridional del viento (W_x y W_y) y gradientes de presión ($\partial P / \partial x, \partial P / \partial y$).	104

“HIDRODINÁMICA DE LA BAHÍA DE SAN QUINTÍN, B. C.”

I. INTRODUCCIÓN.

En los últimos años ha existido un creciente interés de la comunidad científica, por conocer y explicar la complejidad de la dinámica de las lagunas costeras en nuestro país, debido a su importancia económica y ecológica, así como a la variedad de recursos existentes. Este interés busca complementar estudios de manejo adecuado de la zona costera, además de contar con información científica que contribuya en la prevención y remediación de los efectos de la contaminación en estas áreas, debido al desarrollo de distintos sectores productivos que ahí tienen lugar.

La plataforma oeste de la Península de Baja California comprende parte de la región del sistema de la Corriente de California, una de las áreas más productivas del mundo (Zaytsev *et al.*, 2003), región en la que se encuentra localizada la Bahía de San Quintín, B. C. (*BSQ*). Por su alto contenido de nutrientes obtenidos de manera natural, la *BSQ* es uno de los cuerpos costeros más productivos de la costa noroccidental de México (García-Esquivel *et al.*, 2004). En esta bahía se desarrollan exitosamente desde 1979 cultivos del ostión japonés.

La importancia económica y ecológica que la *BSQ* representa, motivó a llevar a cabo campañas oceanográficas intensivas durante los años 2003, 2004 y 2005 que permitieron entender mejor la hidrodinámica existente en la bahía. El presente estudio se

aboca a analizar los resultados obtenidos a través mediciones espaciales y temporales de corrientes, temperaturas y variables meteorológicas durante la campaña efectuada en los meses de Mayo-Junio del 2004. La información fue obtenida mediante el uso, por primera vez en este cuerpo costero, de perfiladores acústicos de corrientes por efecto Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés), así como termógrafos colocados en sitios estratégicos dentro de la bahía y de una estación meteorológica instalada permanentemente. Con la información generada se determinaron los principales forzamientos presentes en la bahía, lo cual permitió avanzar en el entendimiento de los mecanismos de inyección de nutrientes en este lugar, así como su relación con los pulsos de surgencias que se presentan en las inmediaciones de *BSQ* y la fertilización que se da en este sistema costero a través de la boca. De esta manera se complementará la información que arrojen futuros estudios biogeoquímicos lo cual contribuirá a la toma de decisiones inherentes a los sectores productivos que se desarrollan en la bahía.

I.1. ANTECEDENTES.

La Bahía de San Quintín, B. C., ha sido objeto de una variedad de estudios, en su mayoría con un enfoque descriptivo, como Barnard (1962) y Menzies (1962), mientras que Álvarez-Borrego *et al.* (1975) y Lara-Lara (1979) realizaron estudio químicos e hidrográficos de la bahía; Del Valle (1979), Monreal (1980) y Ocampo (1980) implementaron el uso de modelos numéricos en *BSQ*. Posteriormente Martori (1989) realizó un estudio de la variabilidad de la circulación de la bahía realizado en julio de 1986. Dentro de los estudios más recientes se encuentra el “Análisis de procesos

físico-biológico acoplados en la Bahía de San Quintín, B. C., México” realizado por Jiménez (2005), quien calculó tiempos de residencia del agua en la bahía, mediante la aplicación de un modelo bidimensional forzado por marea y viento.

El explicar la dinámica de las lagunas costeras no es tarea fácil, debido a que son cuerpos costeros que tienen relativa homogeneidad vertical de sus propiedades hidrográficas y rápida disminución de la magnitud de los movimientos de marea con la distancia a la boca (Dyer, 1973). Las lagunas costeras responden a diferentes mecanismos de forzamiento dentro de un amplio rango de escalas temporales; la marea astronómica es el más evidente, y genera un intercambio periódico que es predecible. En las bajas frecuencias (< 1 cpd) el forzamiento puede tener un origen no local producido por esfuerzo del viento; y local inducido por la fricción del viento ó por efecto de las no-linealidades de la marea (Martori, 1989).

La mezcla inducida por la marea es un aspecto intrínseco de la circulación en mares someros y en estuarios. La turbulencia es generada por el estrés del fondo y parte de la energía cinética turbulenta está produce mezcla en la columna de agua. La capacidad del flujo de marea para mezclar la columna de agua y mantener verticalmente condiciones homogéneas se incrementa con la intensidad de la marea y es más efectiva en estuarios someros (Linden y Simpson, 1988). La interacción de las corrientes con la topografía es capaz de producir fuerte mezcla dentro del ciclo de marea la cual puede ser espacialmente muy variable (Dyer, 1988).

En oceanografía costera, donde las mareas son predominantes, el término residual es usado para referir a la parte no mareal del movimiento. Los flujos residuales pueden ser debido al estrés del viento local en la superficie, a los gradientes de densidad horizontal, a las pendientes del nivel medio del mar, resultado de los procesos dinámicos que ocurren en la región exterior inmediata ó a las no linealidades de la dinámica del flujo mareal (Robinson, 1981). Las corrientes residuales han sido estudiadas por numerosos investigadores [e.g. Robinson (*op cit.*); Robinson (1983); Pugh (1987); Yasuda (1996); Delgado (1997); Souza *et al.* (1997); Rady *et al.* (1998); Valle–Levinson *et al.* (2000); Winant y Gutiérrez, (2003) y Ribeiro *et al.* (2004); Sanay y Valle-Levinson(2005), entre otros)]. Rady *et al.* (*op cit.*), menciona que debido a las no linealidades (advección y fricción) de las ecuaciones de movimiento (Ecuación 1) y continuidad (Ecuación 2), flujos residuales son generados (Corriente Euleriana de marea promedio).

Ecuaciones de Movimiento:

$$m\bar{a} = \sum \vec{F} \quad (1)$$

$$\underbrace{\frac{\partial u}{\partial t}}_{\text{aceleraciones}} + \underbrace{u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}}_{\text{advección}} - \underbrace{fv}_{\text{Coriolis}} = - \underbrace{g \frac{\partial \eta}{\partial x}}_{\text{G.P.Barotrópico}} - \underbrace{\frac{g}{\rho_o} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz}_{\text{G.P.Baroclinico}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[A_x \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_y \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right]}_{\text{Fricción}}$$

$$\underbrace{\frac{\partial v}{\partial t}}_{\text{aceleraciones}} + \underbrace{u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}}_{\text{advección}} + \underbrace{fu}_{\text{Coriolis}} = - \underbrace{g \frac{\partial \eta}{\partial y}}_{\text{G.P. Barotrópico}} - \underbrace{\frac{g}{\rho_o} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz}_{\text{G.P. Baroclinico}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[A_x \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_y \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right]}_{\text{Fricción}}$$

$$0 = \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial z} + g$$

Ecuación de Continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{2}$$

en donde: $u, v, w, t, f, g, \eta, \rho_o, \rho, A, P$ componente zonal, meridional de la velocidad y vertical (m s^{-1}), tiempo (s), parámetro de Coriolis ($1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) a $45^\circ N$ de latitud, gravedad (9.81 m s^{-2}), elevación de la superficie del mar (m), densidad del agua de mar de referencia (1025 kg m^{-3}) y densidad del agua de mar variable (kg m^{-3}), coeficiente de viscosidad ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$) y la presión (P), respectivamente.

Linden y Simpson (1988), sugieren una modulación mareas vivas - mareas muertas de la corriente submareal debido a la variación de la fuerza de la turbulencia, surgida de la mezcla por marea. Li y O'Donnell, (1997) demostraron que el flujo medio inducido marealmente dentro de un estuario se incrementa con la amplitud de marea en la boca. El incremento del flujo medio con el forzamiento mareal es casi lineal, particularmente si la variación de la elevación es pequeña (del orden de 1m o menos). Por esta razón, se asume que la componente barotrópica es proporcional a la amplitud de la marea en la boca (Fig. 1).

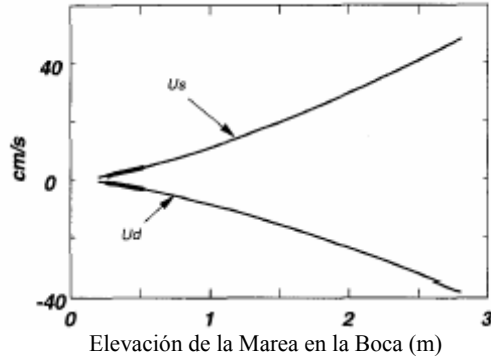


Figura 1. Dependencia del flujo inducido por la marea en un estuario (en la profundidad promedio) en forma de V . (figura tomada de Li y O'Donnell, 1997 en Li *et al.*, 1998). La U_s y U_d son las velocidades submareales sobre las partes someras y del canal, respectivamente. Los segmentos más anchos de la curva indican el rango correspondiente al Río James, E.U.

Esta consideración también es explicada por expansión de series de Taylor desarrollada por Li *et al.* (1998), quienes determinan que la componente barotrópica en mareas vivas de un flujo residual puede ser escrita como:

$$u_{bt}^{(s)} = \frac{\phi u^{(s)} - u^{(n)}}{\phi - a^{(n)} / a^{(s)}} \quad (3)$$

y la componente baroclínica en mareas vivas es:

$$u_{bc}^{(s)} = u^{(s)} - u_{bt}^{(s)} = \frac{u^{(n)} - u^{(s)} a^{(n)} / a^{(s)}}{\phi - a^{(n)} / a^{(s)}} \quad (4)$$

en donde: u_{bt} es la componente barotrópica y u_{bc} es la componente baroclínica, $\varepsilon = a/h_0 < 1$, a y h_0 son la amplitud de marea y profundidad media respectivamente, el superíndice s indica mareas vivas y n mareas muertas y

$$\phi = \frac{R^{(n)}}{R^{(s)}} \left/ \frac{a^{(n)}}{a^{(s)}} \right., \quad (5)$$

en donde R es la razón de la descarga del río.

La circulación inducida por el viento es capaz de generar patrones de distribución en cuerpos semicerrados. Tal es el caso de una circulación consistente en un flujo a favor del viento en las partes someras y un flujo en contra del sentido del viento a lo largo del canal en toda la columna de agua (Simons, 1980; Sanay y Valle-Levinson, 2005;). Mientras que Valle-Levinson *et al.*, 2004, observaron un flujo inducido por el viento bajo una débil fricción interna (bajo número Ekman), consistente en un flujo a favor del viento en una capa superior delimitada por la picnoclina y un flujo en contra del viento por debajo.

Los efectos de la batimetría en el intercambio océano-bahía fueron descritos por Kasai *et al.* (2000) y Valle-Levinson *et al.* (2003), mediante la aplicación de modelos analíticos mostraron resultados sobre la estructura transversal de flujos de intercambio estuarino. Estos autores consideran que el patrón de flujos de un estuario está fuertemente ligado a la competencia entre la fricción y la rotación de la tierra lo cual puede ser caracterizado con el número de Ekman (E). Con un número de Ekman grande

($E > 1$), el flujo de entrada neta tiende a ser concentrados en un canal, mientras que los flujos que salen se presentan en las zonas más someras (Fig. 2).

$$E = \frac{A_z}{fH_0^2} \quad (6)$$

En donde H_0 es la máxima profundidad del agua. A_z el coeficiente de viscosidad vertical, f el parámetro de Coriolis (10^{-4} s^{-1}). Los autores calcularon el número de Ekman considerando una profundidad de 30m y variaron los valores de viscosidad en $A_z = 10^{-1}, 10^{-2}$ y $10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para obtener tres diferentes números de E de 1, 0.1 y 0.01 respectivamente.

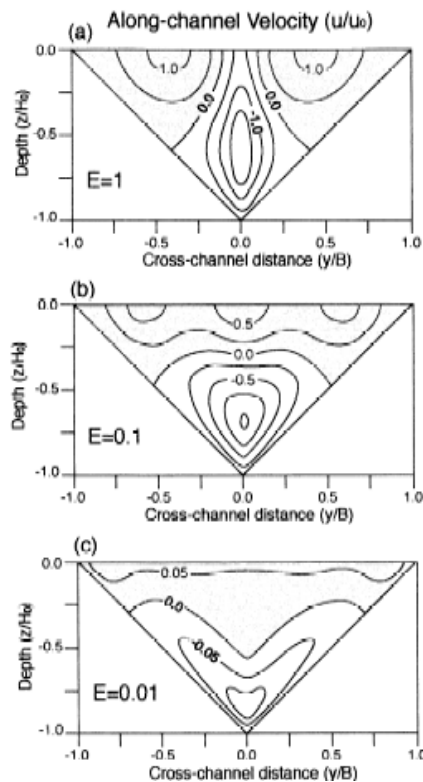


Figura 2. Contornos del flujo a lo largo del estuario obtenido por Kasai *et al.* (2000). Solución sobre una sección triangular con diferentes números de Ekman. Correspondientes a diferentes valores de A_z son (a) 0.1, (b) 0.01, y (c) 0.001 $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$. Los valores negativos indican un flujo neto de entrada y los positivos un flujo neto de salida.

El efecto de la longitud del canal fue estudiado por Li y O'Donnell (2005). Estos autores describieron mediante el uso de un modelo analítico la circulación submareal en canales de diferentes longitudes dominados por la marea, con variaciones de profundidad lateral arbitraria. Determinaron un importante parámetro asociado con la inversión de los flujos de intercambio. Este parámetro δ (no dimensional) es definido como la relación entre la longitud del canal y un cuarto de la longitud de la marea, esta a su vez es determinada por la profundidad del agua y la frecuencia de la marea.

$$\delta = \frac{4L}{\lambda}, \quad \lambda = \frac{\sqrt{gh}}{\omega}; \quad (7)$$

en donde g , h y ω son la aceleración gravitacional, profundidad y frecuencia de la marea, respectivamente. Para un canal con δ más pequeño que 0.6-0.7 (canales cortos), en los intercambios que fluyen en el extremo abierto tienen un transporte que entra en aguas profundas y un transporte que sale en aguas someras.

Rady *et al.* (1994a) en Rady (1998), consideran que los movimientos de marea, siendo oscilatorios por naturaleza, no afectan directamente el transporte a largo plazo de masas de agua, calor, sal, nutrientes sedimentos y contaminantes como lo hacen las corrientes residuales. Las corrientes residuales inducidas por la marea son importantes porque su persistencia puede permitir dominar la distribución general y el transporte de las características de las propiedades del agua tales como temperatura y salinidad. (Pugh, 1987).

Un mecanismo importante en la fertilización de las zonas costeras son las surgencias. La causa de una surgencia costera es el movimiento de agua superficial hacia fuera de la costa en respuesta al esfuerzo del viento y al efecto de la rotación de la Tierra. El agua superficial acarreada hacia mar abierto es remplazada cerca de la costa por agua fría (Fig. 3), densa y rica en nutrientes proveniente de los niveles subsuperficiales (Gill, 1982; Brown *et al.*, 1993).

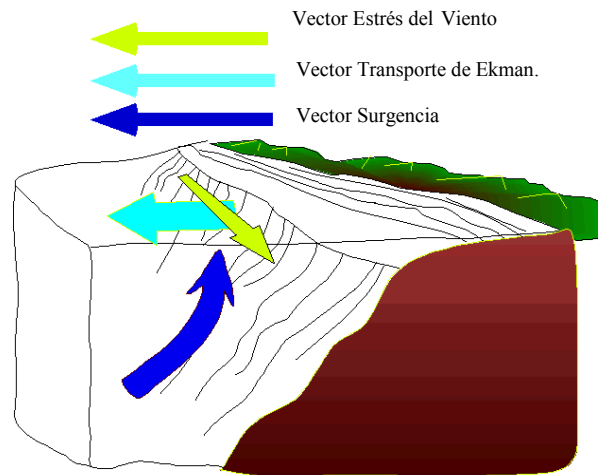


Figura 3. Diagrama esquemático de una surgencia costera en el hemisferio norte. (Esquema tomado de <http://www.pfeg.noaa.gov>.)

Las surgencias costeras en el Pacífico Norte han sido ampliamente estudiadas por diversos autores. Pennington y Chávez (2000) realizaron series de tiempos de diversos parámetros físico-químicos durante 1989-1996 en una estación central de la Bahía de Monterey, CA, E.U. Reportan que las aguas superficiales (0-5 m) más frías y más saladas se registraron durante la primavera ($\sim 10-11^{\circ}\text{C}$ y $S = 33.4-33.8$). Durante primavera y verano observaron en superficie altas concentraciones de nitratos (10-20 μM). Castro *et al.* (2002) describen las anomalías de diversos parámetros calculadas

para los meses de febrero a abril de 1988 a 1991, en un ancho de 100 km a partir de la costa de la Bahía de Monterrey; reportan en la superficie del mar anomalías negativas de temperatura ($\Delta T < -0.5^{\circ}\text{C}$), positivas de salinidad ($\Delta S > 0.2$) y anomalías de nitratos y silicatos ($> 5\mu\text{mol kg}^{-1}$).

BSQ es una laguna costera influenciada por surgencias costeras del Sistema de la Corriente de California (SCC). Las surgencias acarrearán aguas ricas en nutrientes cerca de la boca de la bahía y las corrientes de marea las propagan a través de toda la bahía (Alvarez-Borrego, 2004). Este mismo autor reporta las propiedades del agua de mar durante eventos de surgencia ocurridos en junio-julio de 1979. La temperatura descendió hasta $\sim 11^{\circ}\text{C}$, la concentración de nitratos (NO_3) se elevó hasta $> 12\mu\text{M}$, y las diatomeas dominaron la comunidad fitoplanctónica.

I.2. OBJETIVOS.

I.2.1. Objetivo General.

Avanzar en el conocimiento de la hidrodinámica de la Bahía de San Quintín, B. C. y en la determinación de los principales forzamientos presentes durante el período de muestreo y su relación con los procesos de inyección de nutrientes a la Bahía.

1.2.2. Objetivo Específico.

- a) Analizar la variabilidad espacial y temporal de las corrientes presentes en la bahía durante los períodos de muestreo.
- b) Conocer el comportamiento de las corrientes residuales en la boca y en el interior del sistema costero.
- c) Identificar los principales componentes armónicos de la marea, tanto en la boca de la bahía, como en su interior; así como los subarmónicos que pueden generarse por procesos de interacción no lineal.
- d) Determinar los principales forzamientos que dominan la dinámica de la Bahía, así como su relación entre sí, los cuales contribuyen a los procesos de enriquecimiento de nutrientes del sistema.

Lo anterior se pretende lograr mediante el análisis de los datos obtenidos durante la campaña de medición de parámetros físicos realizada, lo cual permitirá dilucidar la importancia relativa de cada uno de los forzamientos observados durante la etapa de muestreo.

II. MÉTODOS.

II.1.- DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

La Bahía de San Quintín, está localizada en la costa oeste del estado de Baja California (B. C.) entre los paralelos $30^{\circ} 24'$ y $30^{\circ} 30'$ latitud N y entre los meridianos $115^{\circ} 57'$ y $116^{\circ} 01'$ longitud W (Figs. 4 y 5). BSQ es de origen tectónico y contemporáneo, que emergió durante el Pleistoceno (Almeida, 1998).

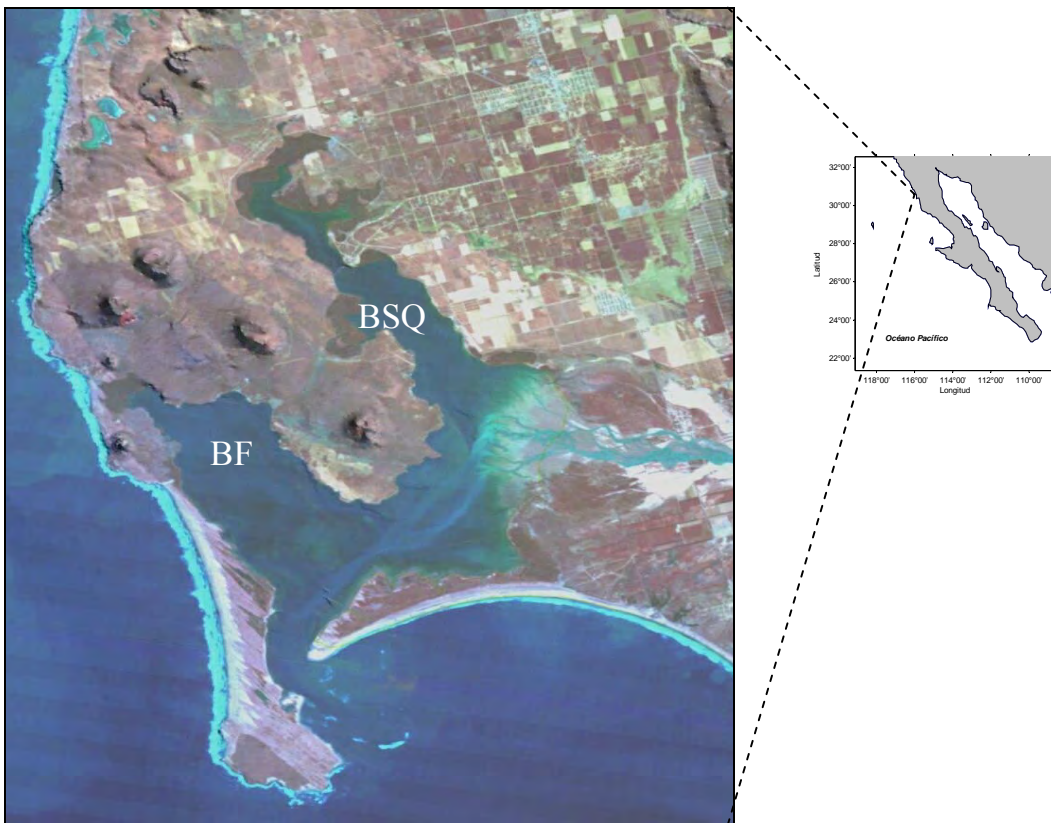


Figura 4. Bahía de San Quintín, B. C. Mapa de localización del área de estudio. Brazo Bahía San Quintín (BSQ) y Brazo Bahía Falsa (BF). (Tomada de Ward, 2000).

Este sistema es una laguna en forma de “Y” consta de dos brazos, conocidos como Bahía Falsa (brazo oeste) y Bahía San Quintín (brazo este), este último también llamado Bahía de San Simón (Fig. 4). Bahía Falsa es una zona muy somera, cuyo canal principal tiene en promedio 4 m de profundidad, localizado en el margen derecho de esta bahía. En el brazo este, el canal tiene en promedio 8 m (Monreal, 1980). Existe una conexión con el océano adyacente a través de una boca relativamente estrecha (poco más de un kilómetro) cuya profundidad máxima es de aproximadamente 16 m. El área total cubierta por la Bahía es de aproximadamente 41 km², de los cuales el brazo este de San Quintín ocupa el 60% del total.

El clima de la zona es clasificado como semi-árido con lluvias escasas en invierno con un promedio anual de precipitación de 5-10 cm. La bahía carece de aportes significativos de agua dulce debido a que ningún río permanente desemboca sobre ella (Gorsline y Stewart, 1962), ya que el Río San Simón sólo tiene aportes importantes durante la presencia de fuertes tormentas las cuales son muy escasas en la región.

Los vientos dominantes son del Noroeste con variación diurna, en un régimen predominante de brisas marinas (Juárez, 1982). Debido a lo somero de algunas zonas, éstas se encuentran sujetas a un intenso calentamiento que crean gradientes de temperatura causante de cambios en la densidad y corrientes. BSQ se encuentra influenciada por las surgencias costeras, principalmente hacia el final de la primavera y durante el verano, (Álvarez-Borrego, 2004). Las surgencias parecen ser un fenómeno intermitente en la costa adyacente a BSQ (Lara-Lara *et al.* 1980). Las variaciones de

clorofila y temperatura en *BF* siguen el mismo patrón que las mareas, siendo esto más evidente en la zona cercana a la boca (Hernández-Ayón *et al.*, 2004).

La *BSQ* es un sistema hipersalino que puede ser clasificado como un estuario inverso donde la salinidad se incrementa de la boca hacia su interior debido a la elevada tasa de evaporación y a la ausencia de precipitación pluvial y escurrimientos superficiales (Álvarez-Borrego, 1975; Millán-Núñez *et al.*, 1982 y Camacho-Ibar *et al.*, 1999). De acuerdo a la clasificación de Kjerfve (1994), se considera una laguna restringida, con una sola conexión permanente con el mar y con mareas que cooscilan con las del océano costero pero reduciendo ligeramente su amplitud dentro de la laguna.

Las mareas son predominantemente semidiurnas, con rangos de 2.5 y 1.0 m en mareas vivas y muertas, respectivamente; son el motor principal de la circulación en la bahía y del intercambio de volumen con el océano, ya que explican el 89-97% de la variabilidad de las corrientes medidas. La fricción del fondo y el forzamiento debido al viento influyen en la circulación residual causando desbalances laterales y remolinos en la circulación residual (Martori, 1989).

Las corrientes de mareas en la boca llegan a alcanzar velocidades de 100 cm/s y hacia el interior de la laguna hasta 60 cm/s debido a la continuidad del volumen (Ocampo-Torres, 1980).

II.2. METODOLOGIA.

II.2.1. Obtención de Datos.

En este estudio se realizaron mediciones oceanográficas durante el periodo comprendido del 20 Mayo al 3 de Agosto del 2004. La campaña de muestreo fue programada con la finalidad de cubrir días susceptibles a la presencia de surgencias en la región. El trabajo de campo fue realizado por personal del Proudman Oceanographic Laboratory (Pertenece al gobierno Británico), de la Facultad de Ciencias Marinas (FCM) y del Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC).

De esta campaña de medición se obtuvieron datos de velocidad de las corrientes en toda la columna de agua, alturas horarias del nivel del mar, temperatura del agua, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, temperatura ambiental, humedad relativa y radiación neta.

Para la medición de las variables mencionadas, se instalaron, tanto en la boca como en el interior de la bahía, perfiladores acústicos de corrientes por efecto Doppler con sensores de presión y temperatura, así como una red de termógrafos. Las variables meteorológicas se obtuvieron de la estación meteorológica instalada al noroeste de Bahía San Quintín.

II.2.2. Localización de equipos y descripción de las mediciones.

Se instaló un ADCP en el extremo oeste de la boca (RDI-Boca) y dos en el interior de la bahía denominados Nortek “A y B” (Tabla I y Figs. 5 y 6a-b). Los perfiladores se anclaron sobre el lecho marino, en las zonas de mayor profundidad de los principales canales. Lo anterior es debido a que son zonas muy dinámicas y por lo tanto de mayor interés oceanográfico.

Tabla I. Equipos utilizados y periodos de muestreos.

EQUIPO DE MEDICION	MARCA	MODELO	PERIODO DE MUESTREO
2004			
Perfiladores Acústicos:			
ADCP Est NA	Nortek	Aquadopp Profiler 1000-kHz	23 Mayo al 13 Junio
ADCP Est NB	Nortek	Aquadopp Profiler 1000-kHz	23 Mayo al 13 Junio
ADCP Est RDI-Boca	RD Instruments	Work Horse 1200 kHz	21 Mayo al 16 Junio
Red de Estaciones			
Termógrafos (10 aparatos)	Vemco	Minilog-T	20 Mayo al 3 Agosto
Estación:			
Meteorológica Automatizada	Aanderaa	AWS 2700	1 Enero al 31 Dic.

Los ADCPs fueron programados para registrar las componentes zonal y meridional (u,v) de la corriente a lo largo del perfil vertical de la columna de agua, en tres sitios diferentes (Fig. 5). Cada perfil de corriente se obtuvo al promediar 180 pulsos acústicos (pings) cada diez minutos ($\Delta t = 10$ min), para el caso de los Nortek's y de 100 pulsos cada diez minutos para el RDI. Se midieron celdas (bins) de 0.5 m de espesor, por encima de una zona de blanqueo de 1.0 m para en el caso del RDI (Fig. 6a) y 0.40 m en los Nortek's (Fig. 6b). Las mediciones se realizaron durante 27 días consecutivos. Se cubrieron dos períodos de mareas muertas y uno de mareas vivas. A la par de las

mediciones de corrientes, estos equipos registraron la temperatura del agua [$^{\circ}\text{C}$] y el nivel del mar [m], con el mismo intervalo de muestreo. La precisión del perfil de velocidad del perfilador Nortek es del 1% del valor medido ± 0.5 cm/s y del RDI es ± 0.3 cm/s y su desviación estándar es de 12.9 cm/s.

Se instaló una red de termistores (termógrafos) modelo Minilog-T (Fig. 5) marca Vemco, con la finalidad de medir series de tiempo de temperatura en los niveles superficiales de la bahía, a lo largo de los principales canales, con un intervalo de muestreo de 10 minutos. Los instrumentos midieron durante 76 días consecutivos. Estos termistores pueden medir rangos de -5 a 35 $^{\circ}\text{C}$; con una resolución de 0.2 $^{\circ}\text{C}$; y una aproximación de ± 0.3 $^{\circ}\text{C}$.

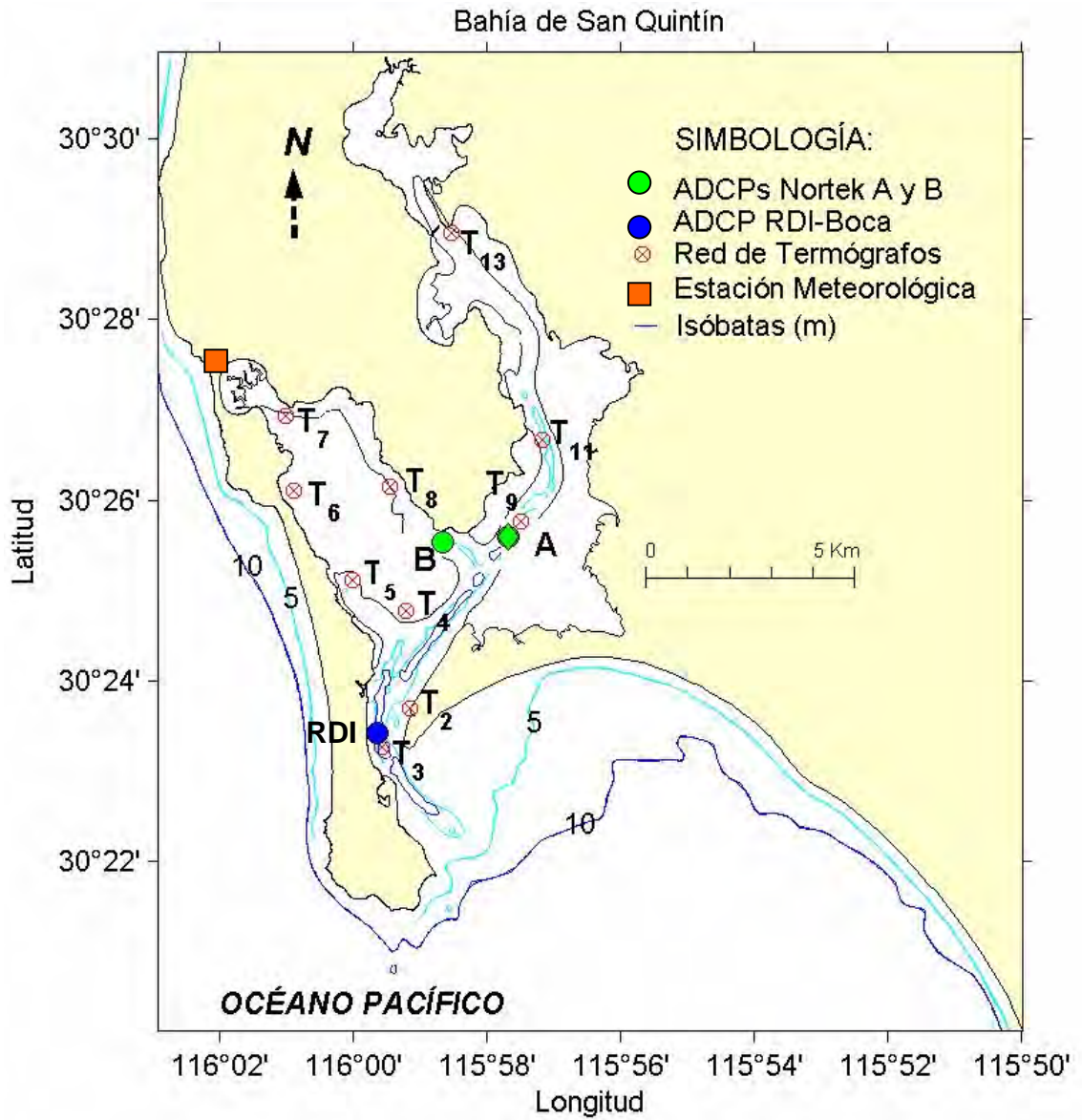


Figura 5. Localización de los equipos instalados en la Bahía de San Quintín, B. C. Los contornos representan profundidad en metros referidos al nivel de bajamar media inferior.

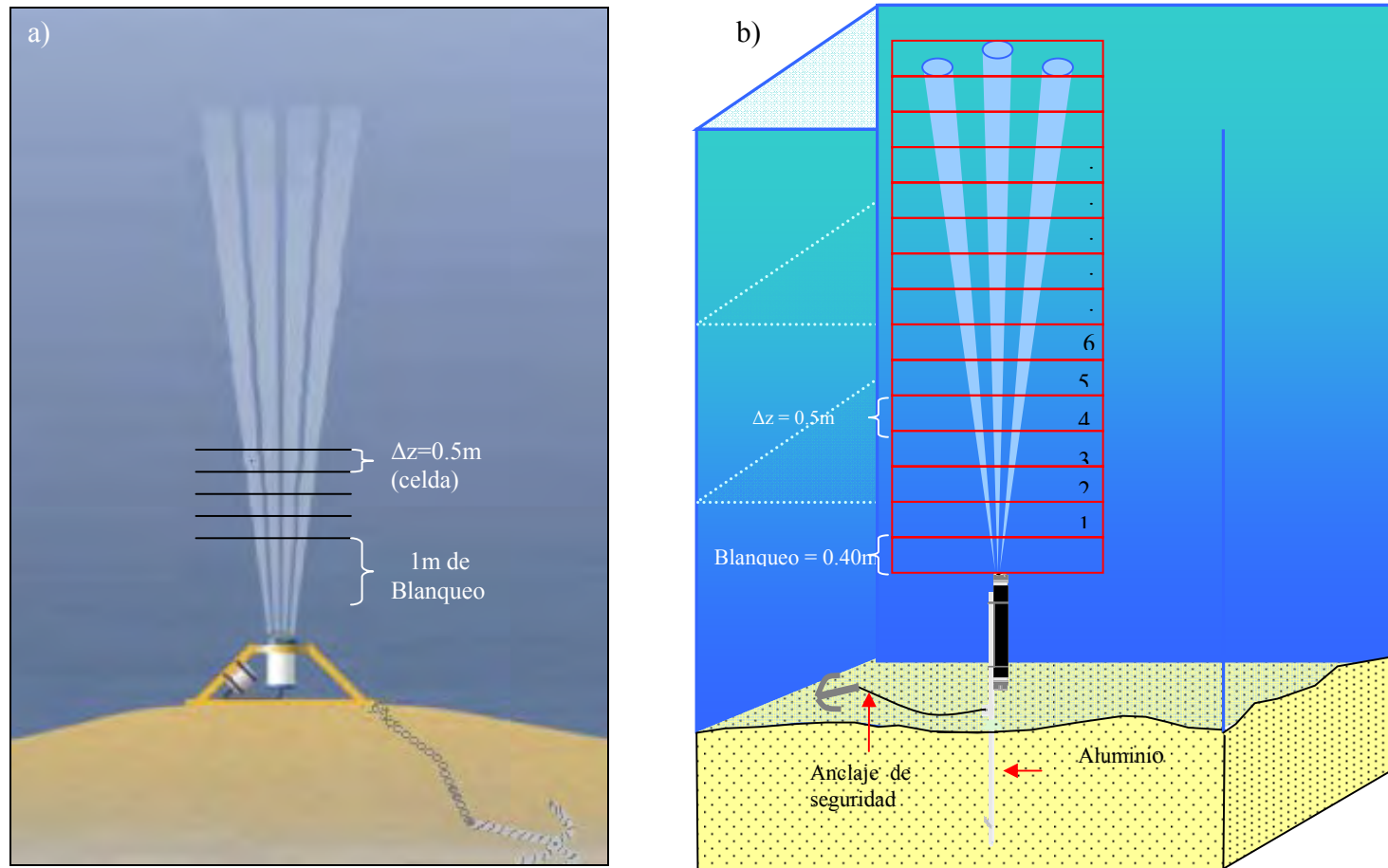


Figura 6. a).- Esquema de instalación de anclaje del ADCP RDI-Boca en la Bahía de San Quintín, B. C. b).- Esquema de anclaje NA y NB interior de la Bahía. (Esquema a) tomado de <http://www.rdinstruments.com>. Esquema b) tomado <http://www.nortek-as.com>.)

La estación meteorológica automatizada Aanderaa, se encuentra localizada en la parte norte de Bahía Falsa (Fig. 5 y 7). Las variables obtenidas en esta estación, fueron muestreadas con un $\Delta t = 30$ min, durante todo el 2004.



Figura 7. Estación meteorológica automatizada Aanderaa instalada al norte de Bahía San Quintín, B. C.

II.2.3. Procesamiento Preliminar.

Para verificar la calidad de los datos se efectuó una revisión mediante el graficado de cada uno de los registros, a fin de detectar de manera visual los datos erróneos. Se eliminaron manual y automáticamente todos los registros cuya su desviación estándar fuera tres veces mayor o menor a su media.

Respecto a los datos de corrientes, los ADCPs presentan limitaciones en la obtención de datos en las fronteras de su alcance. Una corresponde a la región inmediata al emisor (intervalo de blanqueo de 1.0 m RDI y 0.4 m Norteks) y la segunda en la superficie del agua. Esta última introduce una señal de ruido conocida como efecto de lóbulo lateral, por lo que fue necesario eliminar esos datos; además la profundidad de la celda más cercana a la superficie cambió en función de altura de la marea. En general, se descartaron aquellas celdas que estuvieran en el último 10% de la profundidad total del nivel del mar. Los datos eliminados fueron sustituidos por “NaNs” (Not a Number por sus siglas en ingles), lo cual permitió mantener matrices rectangulares necesarias en el procesamiento.

Se verificó la sincronización horaria de los distintos aparatos y se realizaron las correcciones pertinentes. Los registros de velocidad y dirección de los vientos, expresados originalmente en magnitud y dirección azimutal en la convención meteorológica, se expresaron en sus componentes “*u*” y “*v*” con un criterio oceanográfico (“hacia donde se dirigen”).

A los datos de viento y de corrientes se les efectuó la corrección magnética correspondiente a su situación geográfica (12.5° en contra de las manecillas del reloj). Ambas variables fueron rotadas en sus componentes de máxima variabilidad, para resolver las componentes de la corriente y del viento en la dirección transversal y longitudinal del canal.

Con los datos obtenidos por los termógrafos, se calcularon los gradientes de temperatura a lo ancho de la boca y a lo largo de la bahía. Los gradientes de presión sólo se calcularon en los tres sitios en donde se localizaron los anclajes de los ADCPs.

Todas las variables medidas fueron promediadas con un intervalo de tiempo de una hora y se truncaron las series de manera que coincidieran sus periodos de muestreos, para facilitar sus posteriores correlaciones. El procesamiento y graficado de los datos se realizó con el programa de análisis y visualización MATLAB (Matrix laboratory, por sus siglas en inglés).

II.2.4. Análisis de Datos.

Los datos arrojados del procesamiento preliminar, fueron tratados de la siguiente forma:

I.-Se analizaron los registros crudos de cada una de las variables. Primero mediante la aplicación de estadística básica y posteriormente utilizando diferentes métodos matemáticos para el análisis oceanográfico.

II.- A las series de tiempo obtenidas, se les aplicó un filtro pasabajas (Lanczos) a fin de eliminar las altas frecuencias (>0.0139 cph) de la señales registradas. Posteriormente, a los datos filtrados también se analizaron aplicando diferentes métodos, de manera similar al primer inciso.

Lo anterior facilitó estudiar de manera individual las *corrientes totales* y las *corrientes residuales*. Éstas a su vez, pudieron ser correlacionadas con las distintas variables sin filtrar y filtradas, respectivamente.

En esta sección se describen los métodos de análisis de datos, utilizados en el presente trabajo de investigación.

II.2.4.1. Análisis Armónico.

El objetivo de este método es estimar la amplitudes y fases de constituyentes armónicos que pueden ser usados para predicciones de mareas de largos periodos (Emery y Thomson, 2001).

Esta herramienta matemática permite analizar las series de tiempo de mareas como de corrientes, con la finalidad de separar sus principales componentes armónicos presentes durante el periodo de muestreo, así como para construir las elipses componentes de los principales constituyentes existentes en los datos de corrientes de cada uno de los registros. Lo anterior se efectuó mediante la aplicación del programa *t_tide.m* (MATLAB), realizada por R. Pawlowicz, B. Beardsley y Steve Lentz en 1999-2000. Este programa está basado en los algoritmos del método por mínimos cuadrados desarrollados por Godin (1972), y en los códigos en FORTRAN de Foreman (1977) y Foreman (1978) considerados por Pawlowicz *et al.* (2002).

La marea vertical puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$Z(t) = Z_0 + \sum_{k=1}^N A_k \cos(\sigma_k t - \alpha_k) + n(t) \quad (8)$$

en donde:

$Z(t)$ = nivel del agua en el tiempo t ;

Z_0 = nivel medio del mar;

σ_k = frecuencia presente en el potencial de las fuerzas generadoras de mareas o creadas por interacciones no lineales. La frecuencia está relacionada con el período a través de la relación $\sigma_k = 2\pi/T_k$;

$n(t)$ = ruido en los datos;

N = número total de componentes armónicas consideradas;

A_k y α_k = Amplitud y fase de la componente que tiene índice k ;

El método de mínimos cuadrados considera que el promedio del ruido es cero y su varianza es constante. En función de la longitud de la serie de tiempo ($n\Delta t$) se aplica el criterio de Rayleigh, a fin de decidir cuales frecuencias se incluyen en el análisis. Este criterio se expresa como:

$$n\Delta t |\sigma_k - \sigma_{k+1}| \geq 1 \tag{9}$$

en donde:

n = número de muestras; Δt es el intervalo de muestreo;

σ_k y σ_{k+1} son las frecuencias que serán resueltas.

Se puede aplicar una representación armónica para las componentes u y v de la corriente, similar a la del nivel de mar, mediante las siguientes ecuaciones:

$$u(t) = u_o + \sum_{k=1}^N u_k \cos(\sigma_k t - b_k) + n_x(t) \tag{10}$$

y

$$v(t) = v_o + \sum_{k=1}^N v_k \cos(\sigma_k t - c_k) + n_y(t) \tag{11}$$

en donde σ_k es una de las frecuencias descritas previamente; n_x y n_y son las señales residuales en la dirección x y y , respectivamente.

II.2.4.2. Análisis Espectral.

El análisis espectral se utiliza para particionar la varianza de una serie de tiempo como una función de frecuencia. Para series de tiempo estocásticas tales como el oleaje producido por el viento, las diferentes contribuciones de componentes de frecuencia se miden en términos de la *densidad del poder espectral* (DPS). Para determinadas formas de ondas tales como las mareas, puede ser usada la DPS ó la densidad de energía espectral (DES). La potencia es definida como energía por unidad de tiempo (Emery y Thomson, 2001).

Si $y(t)$ es una señal determinística continua, el total de la señal de energía (E) es finita:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |y(t)|^2 dt < \infty \quad (12)$$

Entonces $y(t)$ es absoluta e integrable sobre todo el dominio y la transformada de Fourier $Y(f)$ de $y(t)$ existe. Esto conduce al par de transformadas estándares:

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (13)$$

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} Y(f)e^{i2\pi ft} df = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Y(f)e^{i\omega t} d\omega \quad (14)$$

donde $e^{\pm i2\pi ft} = \cos(2\pi ft) \pm i \operatorname{sen}(2\pi ft)$, f es la frecuencia en ciclos por unidad de tiempo, y $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular en radianes por unidad de tiempo. El cuadrado del módulo de la transformada de Fourier para todas las frecuencias

$$S_E(f) = Y(f)Y^*(f) = |Y(f)|^2 \quad (15)$$

entonces $S_E(f)$ de $y(t)$ es la *densidad de energía espectral (DES)*. El asterisco denota el complejo conjugado.

En este estudio se utilizó la transformada discreta de Fourier para calcular los espectros de frecuencia de las series de tiempo del nivel del mar, temperaturas y viento. Esto permitió identificar las principales bandas de frecuencia en que se encuentra distribuida la energía en cada una de las series. Además, se obtuvieron los espectros de potencia de los registros de corrientes calculados con 6 grados de libertad y un intervalo de confianza del 95 %.

III.2.4.3. Funciones de Correlación.

Las series de tiempo discretas ó continuas $y(t)$ tienen un número de propiedades estadísticas fundamentales, que permiten caracterizar la variabilidad de las series y facilitan comparar una serie contra otra (Emery y Thomson, 2001).

Las funciones de Covarianza y Correlación, son términos usados para describir la covariabilidad de series de tiempo dadas como funciones de dos tiempos diferentes, $t_1 = t$ y $t_2 = t + \tau$, donde τ es el desfase (lag) en tiempo. Si el proceso es estacionario entonces el tiempo absoluto es irrelevante y la función de covarianza depende sólo de τ (Emery y Thomson, *op cit.*). Las funciones de covarianza son derivadas de series de datos después de la remoción de la media verdadera, μ , la cual se aproxima con la utilización de la media muestral, $\overline{y(t)}$. Las funciones de correlación utilizan las series de datos crudos antes de la remoción de la media. Algunos oceanógrafos definen correlación como la covarianza normalizada por la varianza.

Para procesos estacionarios, la función de autocovarianza C_{yy} , la cual se basa en una función de correlación desfasada entre ella misma, se calcula como:

$$C_{yy}(\tau) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} [y_i - \overline{y}][y_{i+k} - \overline{y}] \quad (16)$$

donde E es el valor medio de una serie $y(t)$, $\tau = \tau_k = k\Delta t$ ($k=0, \dots, M$) es el desfase en tiempo para k incrementos de tiempo Δt muestreados, y $M \ll N$. La correspondiente expresión para la función de autocorrelación R_{yy} es:

$$R_{yy}(\tau) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} (y_i y_{i+k}) \quad (17)$$

$$\text{Para } \tau = 0, C_{yy}(0) = \sigma^2 = R_{yy}(0) - \mu^2 \quad (18)$$

Por lo tanto, se puede definir que $C_{yy}(\tau) = C_{yy}(-\tau)$; $R_{yy}(\tau) = R_{yy}(-\tau)$ indicando que las funciones de autocovarianza y autocorrelación son simétricas con respecto al tiempo de desfase τ .

La función de autocovarianza se puede normalizar usando la varianza para pasar a la función de autocovarianza normalizada:

$$\rho_{yy}(\tau) = \frac{C_{yy}(-\tau)}{\sigma^2}, \text{ donde } \sigma^2 \text{ es la varianza.} \quad (19)$$

Las propiedades básicas de la función de autocovarianza normalizada son:

- a) $\rho_{yy}(\tau) = 1$, para $\tau = 0$;
- b) $\rho_{yy}(\tau) = \rho_{yy}(-\tau)$, para toda τ ;
- c) $|\rho_{yy}(\tau)| \leq 1$, para toda τ ;

d) Si los procesos estocásticos son continuos, entonces $\rho_{yy}(\tau)$, deben ser funciones continuas de τ .

Si se reemplaza una de las series $y(t)$ en las relaciones anteriores con otra función $x(t)$, se obtendrá la función de covarianza cruzada:

$$C_{xy}(\tau) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} [y_i - \bar{y}][x_{i+k} - \bar{x}] \quad (20)$$

y la función de correlación cruzada esta dada por:

$$R_{xy}(\tau) \equiv E[y(t)x(t+\tau)] = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} (y_i x_{i+k}) \quad (21)$$

La función de covarianza cruzada normalizada, conocida también como *función de coeficiente de correlación* para un proceso estacionario es:

$$\rho_{xy} \equiv \frac{C_{xy}(\tau)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad \text{donde } \sigma^2 \text{ es la desviación estándar.} \quad (22)$$

Mediante el uso de las funciones de correlación cruzada y covarianza cruzada descritas anteriormente, se realizaron diversas correlaciones entre las series de tiempo de las variables medidas, que arrojaron información referente al grado de relación que existe entre una variable y otra, así como entre diferentes series de tiempo de la misma variable. Esta información permitió construir matrices de correlación y de covarianza que se

utilizaron para aplicar funciones empíricas ortogonales a las series de corrientes y temperaturas, y a una matriz de los forzamientos medidos.

II.2.4.4. Filtrado de Datos.

Se filtraron las series de tiempo de corriente, temperatura y viento mediante el uso del filtro Lanczos en su modalidad *pasa-bajas*. Un filtro *pasa-bajas* permite el paso de las frecuencias menores a una cierta frecuencia de corte f_c y elimina el paso de las frecuencias mayores a ésta.

Sea $H(f)$ la función que representa al filtro ideal pasa bajas (Figura 8), en donde: f corresponde a la frecuencia en ciclos por unidad de tiempo; f_N es la frecuencia de Nyquist y f_c es la frecuencia de corte (Notas curso análisis de datos 2001).

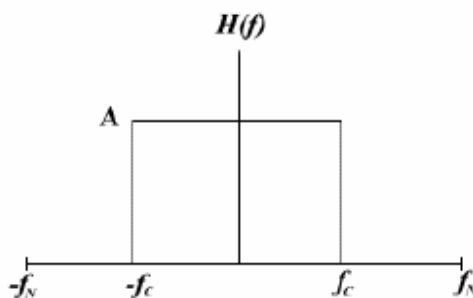


Figura 8a. Representación esquemática de un filtro ideal PASA-BAJAS con respuesta unitaria ($A=1$) en el intervalo $\{-f_c < f < f_c\}$.

Para expresar $H(f)$ en series de Fourier se considera que la función es periódica con período $T=2f_N$

$$H(f) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} C_n \exp(i2\pi n f / 2f_N) \tag{23}$$

en donde C_n son los coeficientes de Fourier y están dados por:

$$C_n = \frac{A}{2f_N} \int_{-f_c}^{f_c} \exp(-i2\pi mf / 2f_N) df \quad (24)$$

Al integrar se encuentra que los coeficientes son simétricos respecto a $n=0$,

$$C_n = \frac{A}{n\pi} \text{sen}(\pi mf_c / f_N) = C_{-n}; \quad n \neq 0, \quad (25)$$

mientras que el coeficiente para $n = 0$ evalúa el límite cuando $n \rightarrow 0$

$$C_n = A \frac{f_c}{f_N} \quad (26)$$

con estos coeficientes se puede expresar el “filtro ideal en series de Fourier”.

$$H(f) = \sum_{n=-\infty}^{-1} C_n \exp(i2\pi mf / 2f_N) + A \frac{f_c}{f_N} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(i2\pi mf / 2f_N) \quad (27)$$

al considerar que $A=1$ y que $C_n = C_{-n}$ se tiene que:

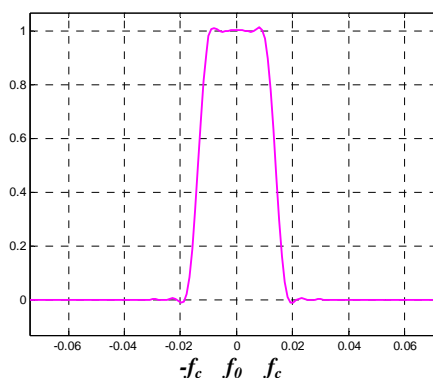
$$H(f) = \frac{f_c}{f_N} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(2\pi mf / 2f_N) \quad (28)$$

La expresión de un filtro Lanczos pasa bajas se define como:

$$H(f) = \frac{f_c}{f_N} + 2 \sum_{n=1}^s C_n \sigma_n \cos(2\pi mf / 2f_N) \quad (29)$$

En donde: σ_n se le conoce como los factores de Lanczos y el número de coeficientes está dado por $s+1+s$.

Para remover las señales de alta frecuencia a las series de tiempo obtenidas durante la campaña de muestreo, se aplicó el filtro mencionado con una frecuencia central de cero, frecuencia de corte de 1/72 hrs., y frecuencia de Nyquist de 0.5 hrs. (Fig. 8b).



Frecuencia ciclos por hora

Figura 8b. Representación esquemática del filtro real PASA-BAJAS.

II.2.4.5. Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs).

Las FEOs permiten describir de manera sintetizada la variabilidad temporal y espacial de las series de tiempo en términos de funciones ortogonales o modos estadísticos. El valor de esta técnica consiste en descomponer un conjunto de datos espacio-tiempo dentro de dos conjuntos de funciones: uno sobre el espacio y otro sobre el tiempo, donde los elementos de cada función son ortogonales al otro (Preisendorfer *et al.*, 1981).

Una cantidad $A(x,t)$ puede ser expresada como una matriz A_{mn} con dimensiones $M \times N$, donde M es el número de puntos distribuidos y N es el número de observaciones a lo largo del tiempo. De acuerdo a Emery y Thomson (2001), la matriz simétrica de covarianza puede ser calculada mediante la ecuación:

$$C = \frac{1}{N-1} AA^T, \quad (30)$$

donde A^T es la transpuesta de la matriz A . Si se asume que todos los datos espaciales de campo son muestras independientes, entonces el producto medio de la matriz de covarianza y las FEOs pueden ser encontradas mediante la solución del problema de eigenvalores:

$$C\phi = \phi\lambda \quad (31)$$

donde ϕ es una matriz cuadrada cuyas columnas son eigenvectores (vectores propios) y λ es la matriz diagonal de eigenvalores (valores propios). El problema de eigenvalores se puede resolver mediante la descomposición en valores singulares (*SVD*), para cualquier matriz A que satisfaga que el número de renglones M , sea mayor o igual al número de columnas N . Esto puede ser expresado como el producto de tres matrices:

$$USV^T = SVD(A) \quad (32)$$

donde U es una matriz columna ortogonal ($M \times N$), S es la matriz diagonal ($N \times N$) con elementos positivos o ceros, y la transpuesta V^T como la matriz ortogonal ($N \times N$). Los elementos de la matriz U son los eigenvectores mientras que los de la matriz S son relacionados a los eigenvalores $S_1 \geq S_2 \geq \dots \geq S_N \geq 0$.

Este método se aplicó a las series de tiempo de velocidad de las corrientes y temperaturas (filtradas y sin filtrar). Se construyeron matrices $M \times N$ de las series de tiempo de corriente y temperatura, las cuales se almacenaron como vectores columna, donde M es el número de datos y N las diferentes profundidades o número de series de datos según el caso, previa remoción de la media y la tendencia lineal. Posteriormente se calculó la matriz de covarianza (C_{mn}) y su descomposición en valores singulares, mediante esto se obtuvo la matriz U_{mn} correspondiente al eigenvector, la matriz diagonal S_{mn} de eigenvalores y la matriz transpuesta V_{mn}^T que arroja la amplitud de cada modo. De esta manera, se obtuvo N modos de M datos. El porcentaje de varianza explicada para cada modo correspondiente, fue calculado a través la ecuación:

$$\%Var \exp = \frac{D}{\Sigma D} \times 100 \tag{33}$$

en donde D son los eigenvalores.

A la par se construyó una matriz de correlación con todos los posibles forzamientos medidos durante la campaña. A esta matriz también se le aplicaron *FEOs* de acuerdo a lo propuesto por Elliott (1978). Lo anterior arrojó información que permitió conocer la importancia relativa de cada forzamiento.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS.

El presente capítulo se ha dividido en tres secciones a fin de facilitar la descripción y el análisis de los resultados. En la primera sección se explican con detalle las variables medidas (nivel del mar, temperatura del agua y parámetros meteorológicos), durante la campaña de muestreo. Las dos últimas analizan las corrientes registradas en la boca y en el interior de la bahía respectivamente, y su relación con los forzamientos observados.

III.1. VARIABLES COMPLEMENTARIAS Y FORZAMIENTOS OBSERVADOS.

Officer (1976), considera que los forzamientos importantes en la determinación de la circulación de un estuario son debido a: la pendiente de la superficie del agua y a las pendientes de las superficies internas, a las fuerzas asociadas con la aceleración de Coriolis, al esfuerzo del viento, al esfuerzo de la fricción interna y al esfuerzo de la fricción con el fondo. Por este motivo en el presente trabajo se realiza análisis a las variables medidas en el experimento efectuado, que permitan inferir cuales fueron los forzamientos involucrados en la circulación de la BSQ durante la etapa de muestreo.

III.1.1. Nivel del Mar.

El periodo de registro de la serie de tiempo medida con el sensor de presión en la estación RDI-Boca (Fig. 5), comprendió dos eventos de mareas muertas y uno de mareas

vivas (Fig. 9a). El rango de variación de la marea registrada de la estación RDI-Boca fluctuó aproximadamente entre ± 1.3 m (2.6 m en total) durante las mareas vivas, mientras que en mareas muertas fue de 0.34 a -0.63 m (0.97 m en total).

El análisis armónico de los datos del sensor de presión, para los 27 días de registro (21 Mayo al 16 Junio del 2004), proporcionó información sobre la frecuencia, amplitud y fase de los principales constituyentes armónicos de la marea (Tabla II). En esta tabla se observa que las constituyentes más energéticas son la lunar principal semidiurna (M_2), la lunisolar declinación diurna (K_1), la lunar principal diurna (O_1) y la solar principal semidiurna (S_2). Estas cuatro constituyentes contribuyen con el 95.9% del total de la energía, siendo M_2 la dominante debido a que aporta el 37% de la energía. El factor de forma de las mareas, determinado por la razón entre amplitudes $F = (K_1 + O_1)/(S_2 + M_2)$ fue de 0.92, lo que indica que la marea en este lugar es mixta, predominantemente semidiurna. También se observa la presencia de constituyentes de agua somera de la componente lunar principal como son M_4 y M_6 , las cuales resultan de las interacciones no lineales de la marea (e.g. la fricción). Parker (1991) menciona que la M_6 es predominantemente generada por un mecanismo friccional. Las amplitudes de estos subarmónicos son relativamente muy pequeñas en relación a las demás componentes mostradas en la tabla II, pero se encuentra por arriba del 95 % del nivel de confianza.

Tabla II. Principales componentes armónicas de marea observadas en la estación RDI-Boca. Las frecuencias están expresadas en ciclos por hora, las amplitudes en metros, y la fase en grados relativa al meridiano de Greenwich.

COMPONENTE	FRECUENCIA	AMPLITUD	FASE
O1	0.039	0.22	89.58
K1	0.042	0.39	95.79
M2	0.081	0.49	294.67
S2	0.083	0.17	249.86
M4	0.161	0.01	256.79
M6	0.242	0.00	177.57

El espectro de frecuencia de la señal del nivel del mar (Fig. 9b), muestra que la energía se encuentra concentrada en las bandas diurna y semidiurna (~ 0.04 y 0.08 cph). En esta figura igualmente se observa el dominio de la componente semidiurna M_2 sobre las demás, sin menospreciar las amplitudes mostradas por las componentes K_1 , O_1 y S_2 , las cuales también presentan valores relativamente altos comparados con los subarmónicos mostrados en esta figura. En registros obtenidos con un limnógrafo instalado en la boca de Bahía de San Quintín durante julio-agosto 1977 se registraron amplitudes similares en las mismas cuatro componentes principales (Ocampo, 1980).

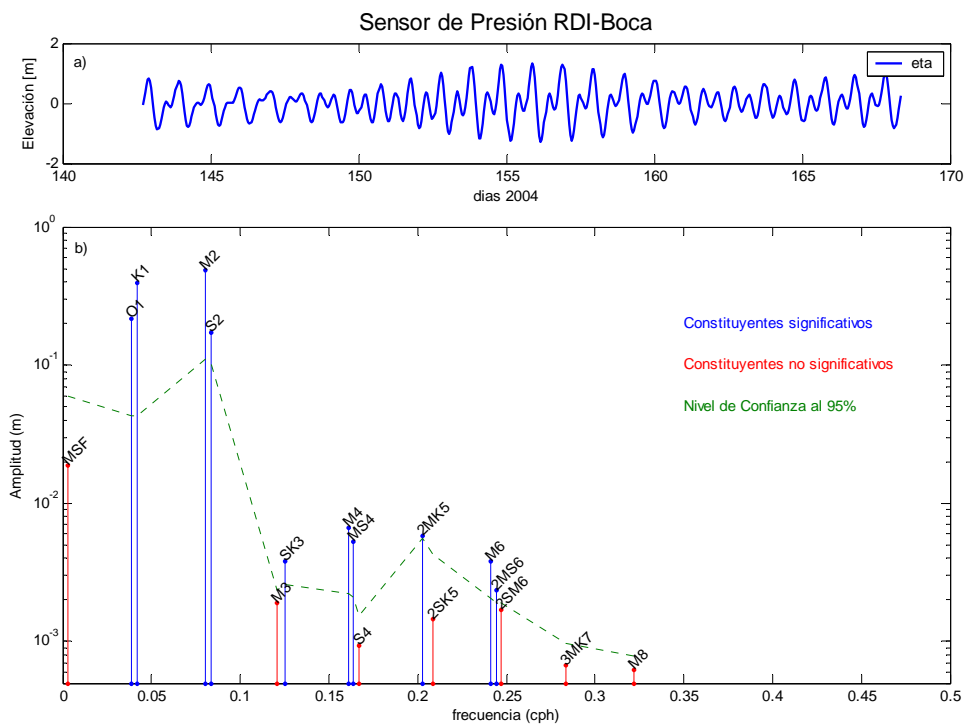


Figura 9.- a) Serie de tiempo del nivel del mar en la estación RDI-Boca referido al nivel promedio. b) Espectro de frecuencia de la señal de marea al 95% de confianza. Las unidades del eje vertical son en metros [m] con escala logarítmica y el eje horizontal es la frecuencia en ciclos por hora [cph].

De forma similar a la estación RDI-Boca, las series de tiempo medida con los sensores de presión en las estaciones *NA* y *NB* (Figs. 5 y 6b), comprendieron las mismas dos etapas de mareas muertas y una de mareas vivas, aunque los días de muestreo fueron solo 22 días (23 Mayo al 13 Junio del 2004). El rango de variación de la marea registrada en ambas estaciones (Fig. 10a y 10c), fue muy semejante al observado en la boca debido a la cercanía de las estaciones (~ 1.5 km). La amplitud de la marea fue aproximadamente de 2.6 m durante mareas vivas y de 1.05 m durante mareas muertas.

La Tabla III muestra que las constituyentes diurnas (K_1 y O_1) y semidiurnas (M_2 y S_2) son las más energéticas de las estaciones NA y NB . Estos armónicos contribuyen el 94.9% y 94.8% del total de la energía en cada una de las estaciones, respectivamente. Se observa que la amplitud de M_2 es la mayor en ambas estaciones. Similar que en la boca el factor de forma es $F = 0.90$, lo que significa que la marea es mixta, con predominancia semidiurna.

Tabla III. Principales componentes armónicos de marea observadas en las estaciones Nortek A y Nortek B. Las amplitudes están expresadas en metros, y la fase en grados relativa al meridiano de Greenwich.

COMPONENTE	FRECUENCIA	AMPLITUD Nortek "A"	FASE Nortek "A"	AMPLITUD Nortek "B"	FASE Nortek "B"
O1	0.039	0.23	93.62	0.24	93.78
K1	0.042	0.40	99.68	0.42	100.05
M2	0.081	0.53	301.14	0.54	301.92
S2	0.083	0.17	253.97	0.18	254.90
M4	0.161	0.01	297.34	0.01	287.47
M6	0.242	0.01	173.26	0.01	167.86

Los espectros de energía de las estaciones NA y NB (Figs. 10b y 10d) muestran que la energía se concentra en las bandas diurna y semidiurna, con un dominio de la constituyente M_2 . Estos espectros en general son muy similares al obtenido en la boca. Sin embargo la amplitud de la constituyente M_8 en la estación NA es 67% y 150 % mayor comparadas con las estaciones $RDI-Boca$ y NB respectivamente (Figs. 9, 10b y 10d). La transferencia de energía desde las frecuencias de mareas dominantes como es la M_2 a más altas frecuencias como la M_8 observada en la estación NA , es resultado de la rectificación de marea, típica de cuerpos de agua semicerrados en co-oscilación con el océano abierto.

En general se observa un pequeño incremento en las amplitudes de las constituyentes principales (diurnas y semidiurnas) en las estaciones del interior comparadas con lo registrado en la boca (Tabla II y III). Esto puede ser debido a que en un estuario somero y estrecho hacia la cabeza, la amplitud de la marea se incrementa corriente arriba debido a la convergencia, pero decrece debido a la fricción (Dyer, 1973).

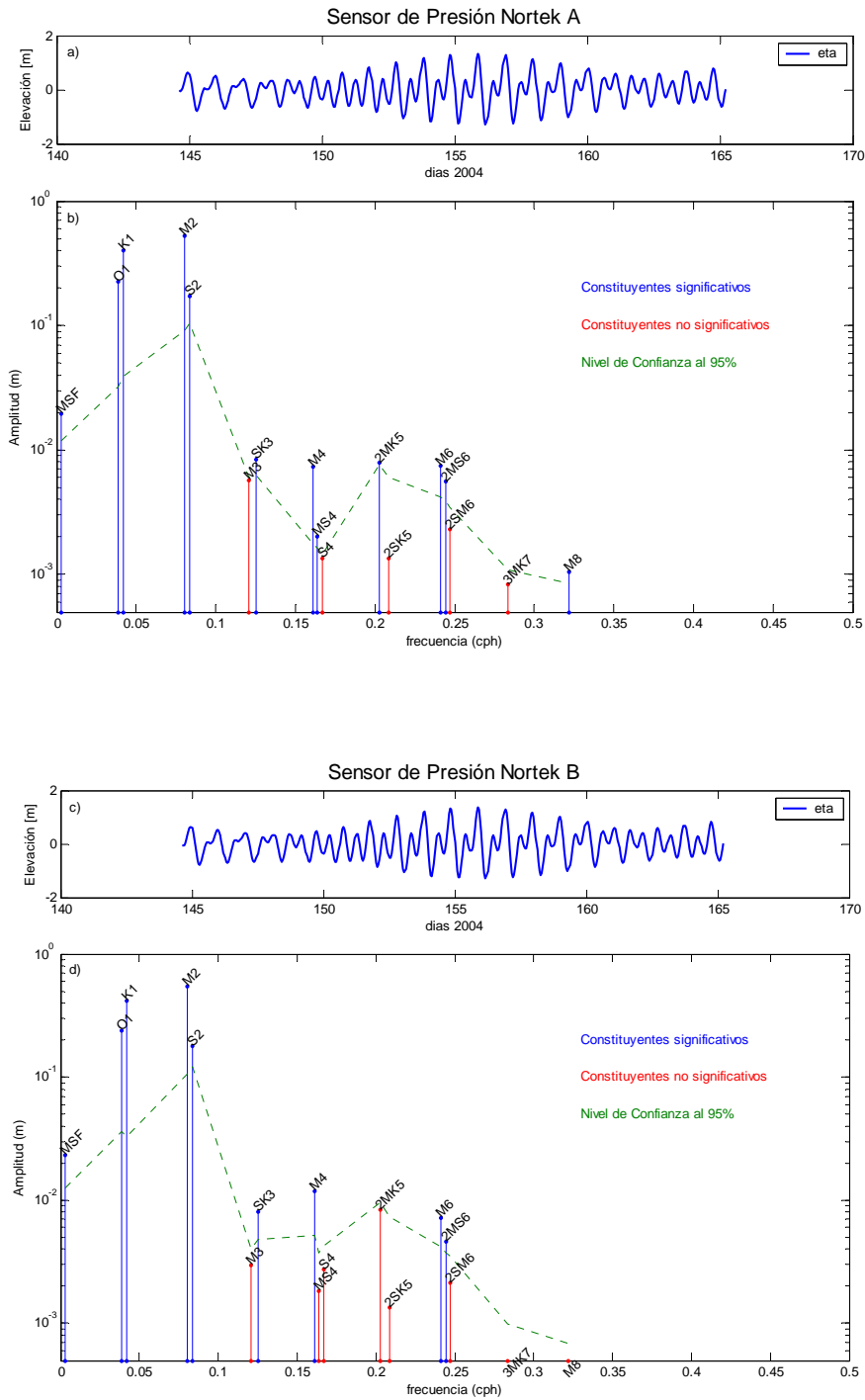


Figura 10.- a y c) Series de tiempo del nivel medio del mar en las estaciones NA y NB respectivamente. b y d) Espectros de frecuencias de la señal de marea al 95% de confianza de las estaciones NA y NB. Las unidades del eje vertical son en metros [m] con escala logarítmica y el eje horizontal es la frecuencia en ciclos por hora [cph].

III.1.2. Gradientes de Presión.

Una de las más sencillas e importantes fuerzas conductoras del movimiento horizontal de agua, es causado por el gradiente de presión horizontal asociado a la pendiente de la superficie del agua (Officer, 1976).

Fuerza del gradiente de presión ocasionado por la superficie del mar (fuerza por unidad de masa):

$$g \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

Fuerza del gradiente de presión ocasionado por el campo de densidad:

$$\frac{g}{\rho_o} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz$$

en donde g , η , ρ_o , ρ , son aceleración de la gravedad (9.81 m s^{-2}), elevación de la superficie del mar (m), densidad del agua de mar de referencia (1025 kg m^{-3}) y densidad *in situ* del agua de mar (kg m^{-3}), respectivamente.

Con la finalidad de determinar la pendiente en la superficie del agua de mar dentro de la bahía e identificar en que dirección se presenta, se calcularon los gradientes de presión [m/km] a partir de los registros obtenidos con los sensores de presión de los tres ADCPs instalados en la boca e interior de la bahía. El cálculo se realizó mediante las

diferencias entre los valores registrados (referidos al nivel promedio) de cada uno de los aparatos. Posteriormente, de las series obtenidas se filtraron las señales de alta frecuencia mediante el uso de un filtro pasa-bajas (Fig. 11).

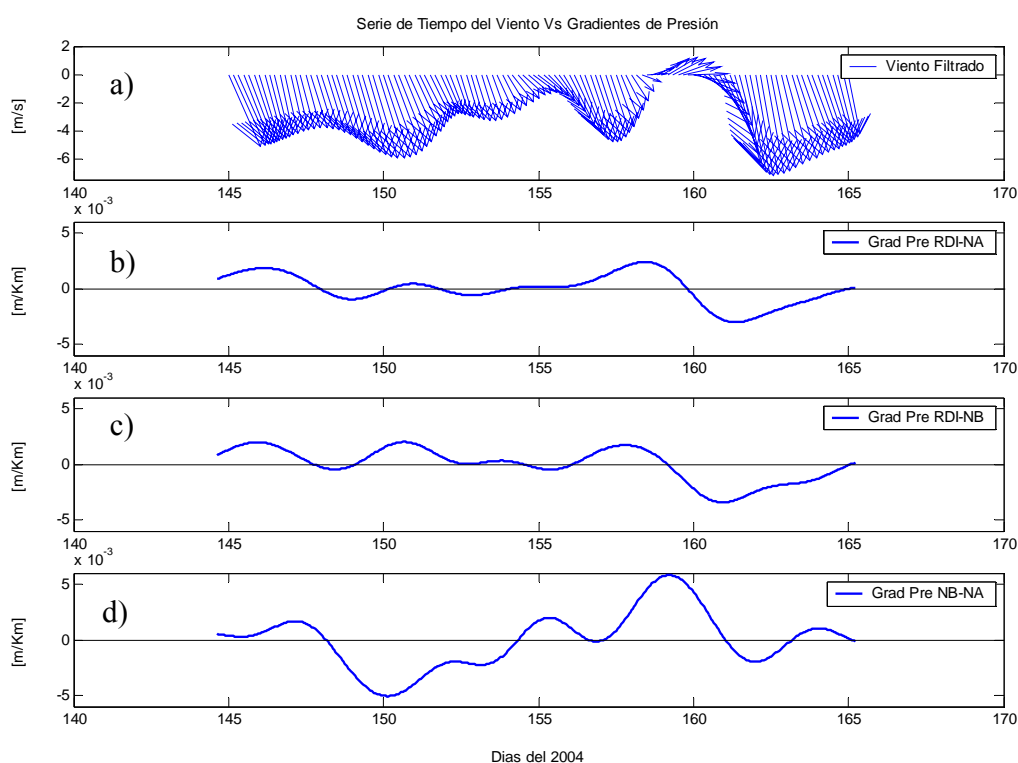


Figura 11.- a) Serie de tiempo del viento (filtrado) y gradientes de presión (filtrados) entre las series del nivel de mar de las estaciones b) RDI-Boca, c) *NA* y d) *NB*. La flecha indica la dirección del viento en la convención oceanográfica.

El efecto del viento sobre el nivel del mar es el de crear un apilamiento de agua en el margen opuesto de la dirección del viento (Clancy, 1968). En este estudio los gradientes obtenidos permiten observar un apilamiento promedio del agua hacia el sur de la bahía para el caso de las comparaciones efectuadas entre la boca y el interior de la misma durante el periodo comprendido entre los días 145 y 159 (Fig. 11b-c). La diferencia mostrada entre las estaciones *NA* y *NB* revelan una acumulación del agua hacia

el este de la bahía durante los días 148-152 (Figura 11d). Lo anterior sugiere que un candidato para explicar el comportamiento de los gradientes de presión es la influencia del viento que se dirige predominantemente hacia el *SE* de la bahía (Fig. 11a) y que apila el agua de las capas superficiales en esa misma dirección.

Los gradientes de presión entre la estación de la boca y la entrada de ambos canales al interior de la bahía muestran un comportamiento muy similar (Fig. 11b-c). En cambio, el gradiente calculado entre la estación *NA* y *NB* muestra un relativo desfase con el gradiente longitudinal de presión, así como una diferencia notoria en amplitudes. Cualitativamente los tres gradientes sugieren una relación directa ó indirecta con la magnitud del viento durante las mismas fechas (Fig. 11). Para poder corroborar lo anterior se procedió a efectuar correlaciones cruzadas entre este forzamiento y los gradientes de presión, a fin de conocer el grado de similitud entre ambos a diferentes desfases.

La figura 12, muestra correlaciones cruzadas entre la magnitud del viento (W_m), la componente este-oeste (W_x) y componente norte-sur (W_y) del mismo, contra el gradiente de presión longitudinal ($\partial P / \partial y$) y el gradiente de presión transversal ($\partial P / \partial x$) de la bahía. Se consideró al gradiente resultante entre las estaciones *NA* y *NB* como $\partial P / \partial x$ y al promedio entre los gradientes *RDI-NA* y *RDI-NB* como $\partial P / \partial y$ en virtud de mostrar gran similitud entre sí.

En la figura 12a se observa que la máxima correlación entre W_m y $\partial P/\partial y$ se presenta con un desfase de ~ 26 horas. La máxima correlación entre W_y y $\partial P/\partial y$ es directa con un desfase similar; mientras que la correlación entre la componente del viento W_x y $\partial P/\partial y$ es insignificante. La figura 12b muestra que W_m y W_y presentan su máxima correlación con el gradiente transversal ($\partial P/\partial x$) con desfase negativo (aproximadamente -5 lag en cual esta dado en horas) lo cual no indica relación alguna entre esa componente del viento y el gradiente transversal; mientras que la correlación entre ($\partial P/\partial x$) y la componente W_x muestra su máximo valor ~ 26 horas. Lo anterior, confirma que la componente del viento W_y es la más importante en relación a la influencia que pueda existir entre el viento y el gradiente longitudinal ($\partial P/\partial y$); mientras que la componente W_x es la de mayor influencia entre el viento y el gradiente de presión transversal ($\partial P/\partial x$), lo que permite inferir que la componente W_y representa un forzamiento importante en el apilamiento del agua hacia la boca del cuerpo costero, observado en las series de tiempo de los gradientes de presión (Fig. 11b-c); y la componente W_x resulta ser más importante al apilar el agua hacia la costa este de la bahía (Fig. 11d). En general, los gradientes de presión muestran una mayor correlación con el viento al aumentar el tiempo de desfase hasta ~ 26 horas, como una respuesta a la transferencia de energía del viento a las capas superficiales posterior a que el forzamiento suceda. Es decir después de un día de la persistencia del forzamiento existente se observa la máxima correlación entre ambas variables.

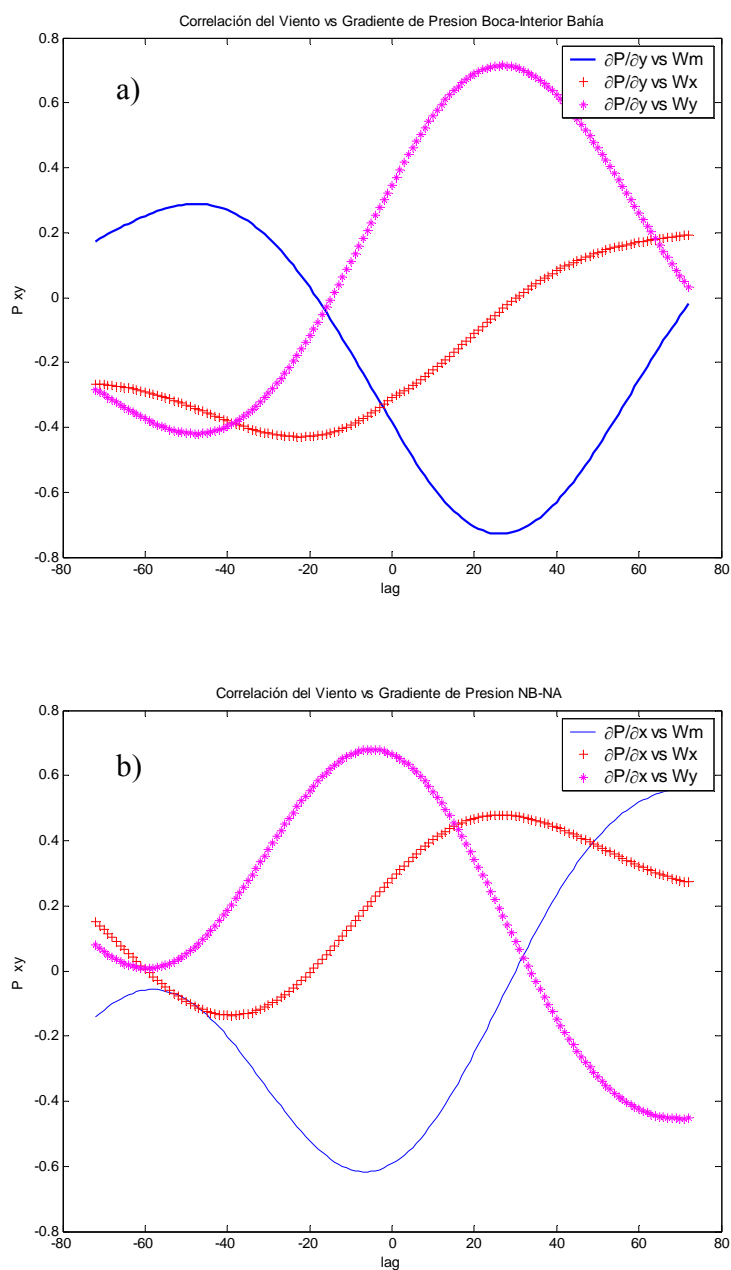


Figura 12 a). Correlación cruzada entre el gradiente de presión longitudinal de BSQ ($\partial P / \partial y$) y la magnitud del viento (y sus componentes). b) Correlación cruzada entre el gradiente de presión transversal de BSQ ($\partial P / \partial x$) y la magnitud del viento (y sus componentes). Lag=1 representa el desfase en una hora.

III.1.3. Variables Meteorológicas.

En esta sección se reportan los datos meteorológicos registrados en la estación meteorológica automatizada Aanderaa, localizada en la parte *norte* del brazo de Bahía Falsa (ver figs. 5 y 7). La estación midió durante todo el año del 2004, sin embargo en esta sección sólo se reporta el mismo periodo comprendido por las mediciones de los ADCPs.

La estadística básica de la información meteorológica (durante 20 días consecutivos) se presenta en la tabla IV. El comportamiento de las series de tiempo obtenidas se observa en la figura 13. La temperatura del aire, la humedad relativa, la radiación solar y el viento muestran una modulación diurna bien definida (Figs. 13a – 13d), mientras que la presión atmosférica muestra una modulación semidiurna (Fig. 13e). En general estas variables atmosféricas no presentan valores que indiquen cambios bruscos repentinos debidos algún evento meteorológico relevante como Santanas, tormentas tropicales ó tormentas extratropicales.

Tabla IV.- Estadística básica de las variables meteorológicas.

Variable	Máximo	Mínimo	Media
Temperatura [°C]	18.3	11.5	15.5
Humeda Relativa [%]	96.8	73.5	87.1
Radiación Solar [W/m ²]	1088	0.21	407.33
Magnitud Viento [m/s]	9.4	0.07	4.17
Presión atmosférica [mbar]	1017.3	1007.1	1012

La radiación solar muestra una influencia directa sobre el viento, aunque con un pequeño desfase en tiempo. Esto sugiere que la radiación solar favorece el régimen de brisas marinas existentes en la Bahía de San Quintín ocasionado por los gradientes de temperaturas atmosférica entre la parte terrestre y marina.

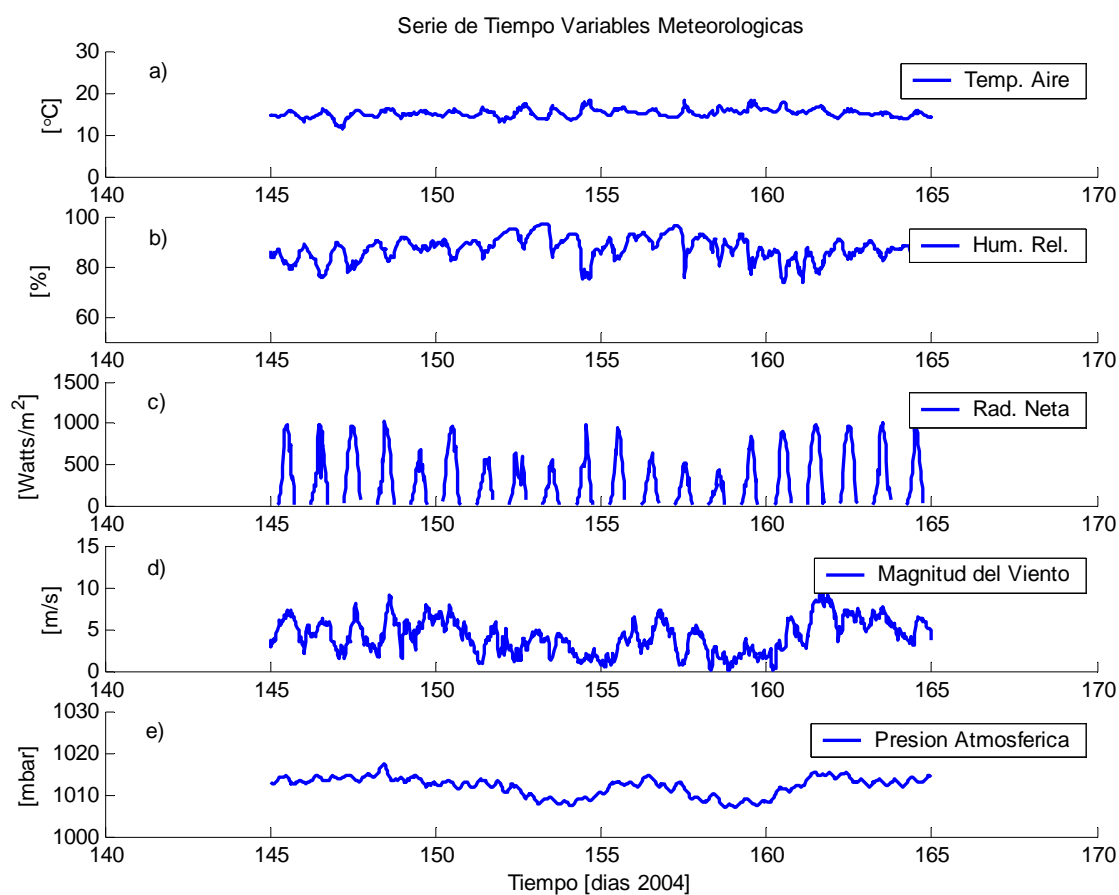


Figura 13. Variables ambientales registradas en la estación meteorológica (Aanderaa) instalada al Norte de Bahía Falsa. a) Temperatura del aire. b) Humedad relativa c) Radiación solar d) Magnitud del viento e) Presión atmosférica.

La magnitud y dirección del viento presente durante el periodo del experimento puede ser apreciada en la figura 11a. La dirección predominante es hacia el *SE* con magnitud promedio de 4.2 m/s y con valores máximos de 9.4 m/s. La serie de tiempo de

la magnitud del viento muestra una variabilidad diurna (fig. 13d); variabilidad que también puede ser apreciada en los espectros de frecuencia (Fig. 14), de cada una de sus respectivas componentes, lo cual confirma la existencia del régimen de brisas marinas en esta región costera.

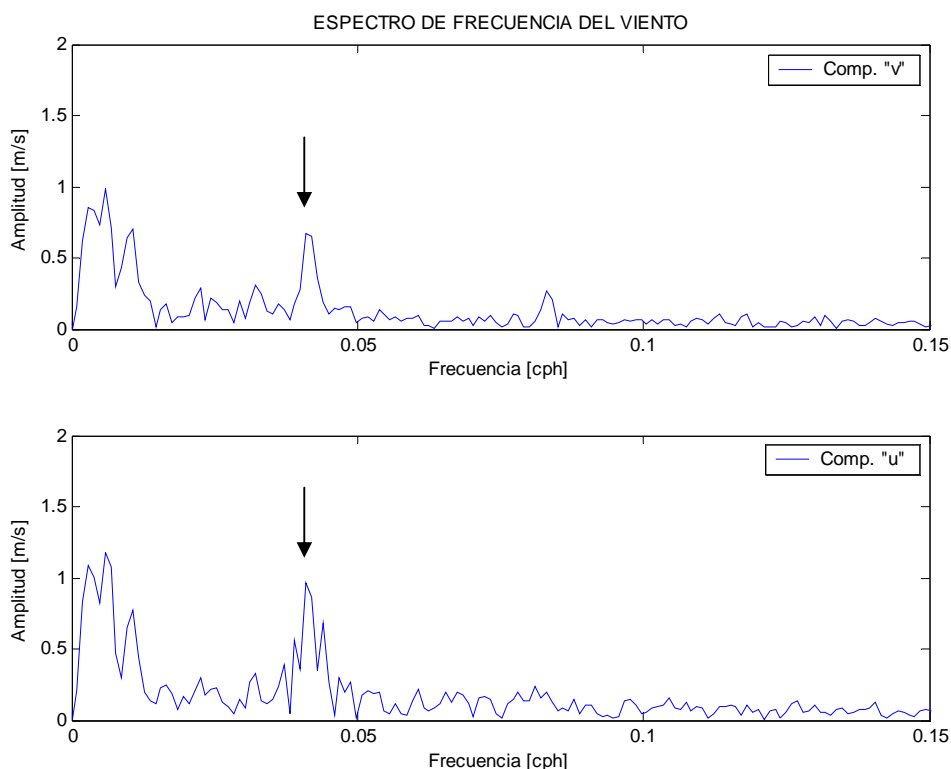


Figura 14.- Espectro de frecuencia de la componente Norte-Sur (v) y Este-Oeste (u) del viento. La flecha indica una señal diurna.

III.1.4. Temperatura del Mar.

III.1.4.1. Serie de Tiempo de Temperaturas.

A lo largo de la Bahía se instaló una red de termógrafos (Fig. 5), los cuales midieron series de tiempo de temperaturas, durante el periodo del 20 de Mayo al 3 de

Agosto. En esta sección se analiza la serie completa para enriquecer la información, sin embargo, cuando se realizan comparaciones con las series de los ADCPs sólo se considera el mismo período en que se utilizó los perfiladores acústicos.

Las series de tiempo de temperatura obtenidas muestran una estrecha relación con los periodos de mareas vivas y mareas muertas (Fig. 15). Se observa que las estaciones que presentan mayor variabilidad son aquellas que se encuentran cercanas a la boca, debido al mayor intercambio de agua ocasionado por los flujos y reflujos de la marea. En general durante el periodo de muestreo la temperatura incrementa desde la boca hacia el interior de la bahía.

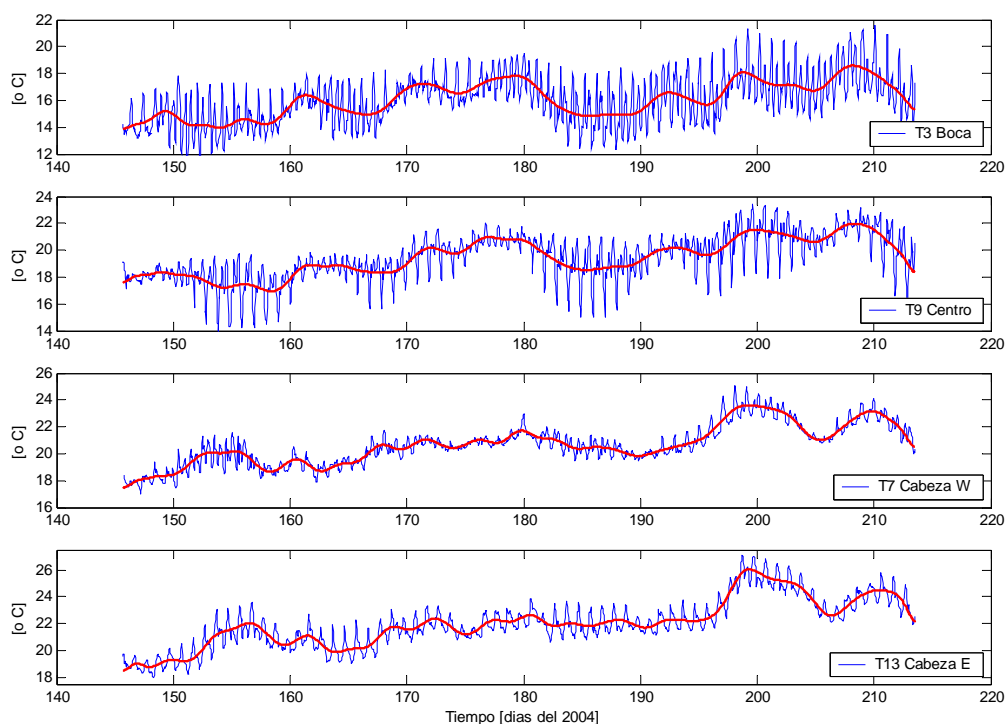


Figura 15. Series de tiempo de temperatura. La línea azul indica la señal cruda y la línea roja indica la señal filtrada mediante el filtro Lanczos modalidad pasa-bajas. El número en la leyenda indica la estación del termógrafo.

Las temperaturas mayores se registraron en las series del extremo norte de BSQ ($T_{13}=27.2$ °C), en la sección *NW* de BF ($T_6=26.1$ °C) y en la cabeza de BF ($T_7=25.2$ °C) (Fig. 15). Las temperaturas menores fueron medidas en la boca de la bahía ($T_3=10.8$ °C). Lo anterior parece indicar que los registros con valores altos son debido a la combinación de lo somero de la bahía en donde se instalaron los termógrafos y a los altos tiempos de residencia del agua en las cabezas de este cuerpo costero. Estos tiempos son del orden 3.4 a 4.5 días en la parte norte de BF (T_7) y de 10 a 13 días en la cabeza de *BF* (T_{13}) (Jiménez, 2005). En la boca, el intercambio constante del mar adyacente con la bahía (residencia del orden de horas), provee de agua de menor temperatura que la observada en el interior de la misma y los valores registrados no son tan altos.

El termógrafo T_9 localizado cerca de la bifurcación del canal principal, presenta un comportamiento de mayor similitud al observado en la boca (T_3) en relación con las temperaturas medidas en T_7 y T_{13} (Fig. 15). Esto sugiere que lo que ocurre en la boca alcanza a influir en la dinámica del parte interna de la bahía, dentro del canal en donde se colocó el T_9 . Esta influencia se debilita conforme se adentra hacia las cabezas de BF y BSQ. Lo anterior también puede ser observado en los espectros de frecuencia realizados a los datos de temperaturas (Fig. 16), donde se aprecia una fuerte señal semidiurna (T_3), la cual sigue presente pero con menor amplitud en la parte interna de la bahía (T_9). En la cabeza de BSQ (T_{13}) (Fig. 16c), la señal diurna es más energética (>dos veces) que la señal semidiurna. Esto sugiere que en la cabeza de BSQ, la variación de la temperatura esta más relacionada al calentamiento diurno provocado por la radiación solar, que por la influencia de la marea, mientras que en la boca las variaciones semidiurnas son debidas

al intercambio periódico de agua ocasionada por la marea. En todos los espectros se observó una fuerte señal espectral de frecuencias más cortas (Fig. 16), es decir de periodos más largos con modulación mensual y catorcenal.

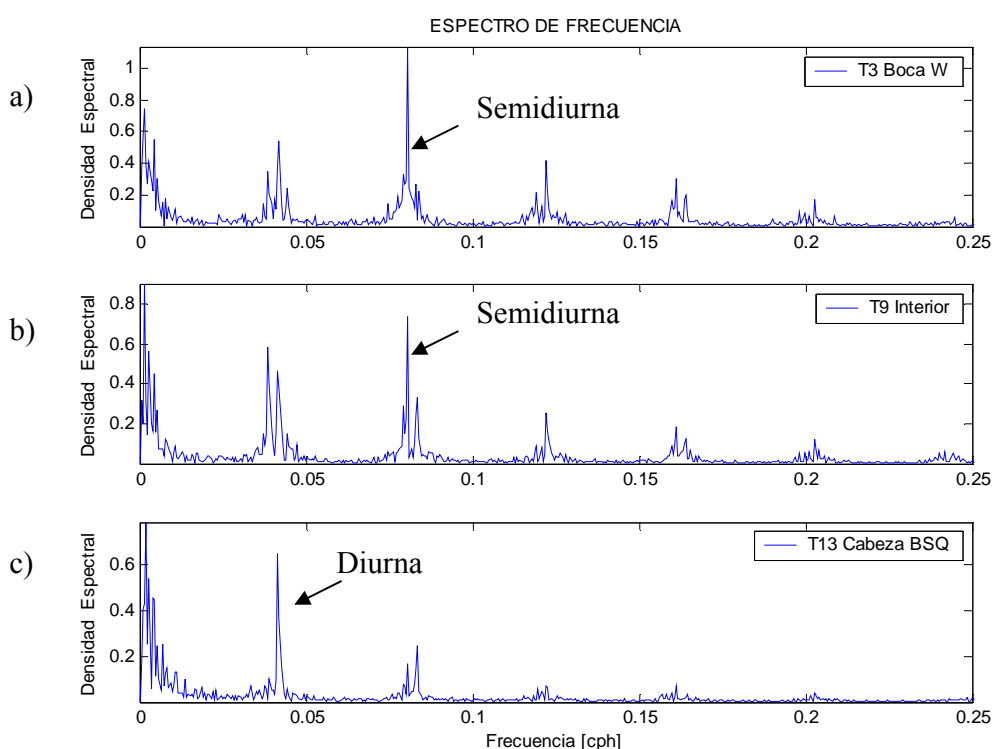


Figura 16. Espectro de frecuencia de las series de temperaturas en la boca, interior y cabeza de la Bahía de San Quintín, B.C.

En lo que respecta a los termógrafos T_3 y T_2 instalados en la boca (Fig. 5), existe una diferencia de temperaturas promedio de -1.7 °C, con un máximo de -6.3 °C (Fig. 17a). Las figuras 17b y 17c muestran el comportamiento durante mareas muertas y vivas respectivamente, en donde se observa que las mayores diferencias se presentan durante mareas muertas con una variabilidad diurna. Durante mareas vivas las temperaturas del agua tienden a ser más homogéneas, en virtud de ser menores las diferencias entre las dos series, muy probablemente ocasionado por la mayor mezcla presente durante este periodo

de la marea. Los resultados de la figura 17a indican que las temperaturas del extremo oeste (T_3) presentan en general valores menores comparados con los del extremo este (T_2). Esto sugiere que existe un flujo residual de agua que entra a la bahía por el extremo oeste de la boca, con temperaturas más bajas que provienen del mar adyacente y sale por el extremo este de la misma, con temperaturas más altas que son transportadas desde el interior de la Bahía.

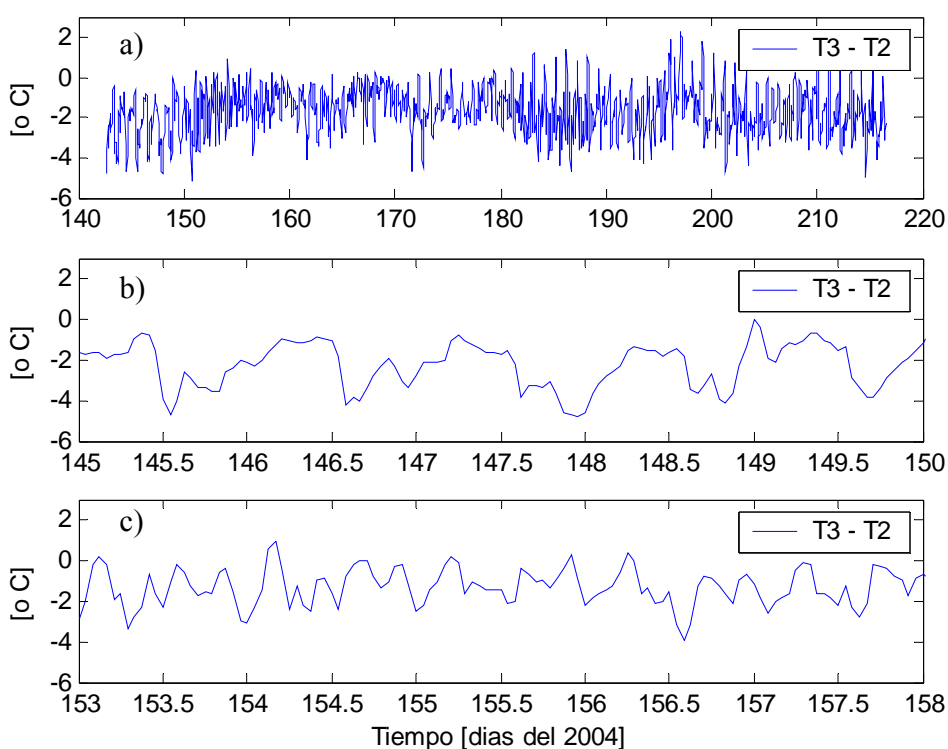


Figura 17. a) Serie de tiempo de las diferencias de temperaturas de los termógrafos (T_3 y T_2) instalados en la boca de Bahía San Quintín. b) Serie durante mareas muertas. c) Serie durante mareas vivas.

De manera similar se efectuaron comparaciones entre las temperaturas de los termógrafos T_6 - T_8 , T_6 - T_5 y T_5 - T_9 (Fig. 17) localizados en su mayoría en Bahía Falsa. En general se observa que el T_6 presenta temperaturas mayores que el T_8 y T_5 (Fig. 18a-b), excepto durante mareas vivas cuando ocurrió luna llena. Las temperaturas más altas

registradas en T₆ en comparación con los otros termógrafos, sugieren que los tiempos de residencias son mayores en este sitio de muestreo y el aumento progresivo de las temperaturas hacia el norte por el canal principal de Bahía Falsa, permite suponer la existencia de una posible celda de circulación de agua en esta zona que se traslada en contra de las manecillas del reloj, consistente con lo reportados por Martori (1989)

En general las diferencias de temperaturas entre los termógrafos en el interior de la bahía (Figs. 17 y 18) dan una idea de la distribución de las temperaturas a lo largo y ancho de este cuerpo costero y su comportamiento durante las mareas vivas y mareas muertas, así como la capacidad de penetración de la señal de marea. Además sugiere una circulación ciclónica en Bahía Falsa, mientras que en bahía de San Quintín se aprecia un comportamiento más canalizado muy probablemente debido a la geomorfología de esta región de la laguna.

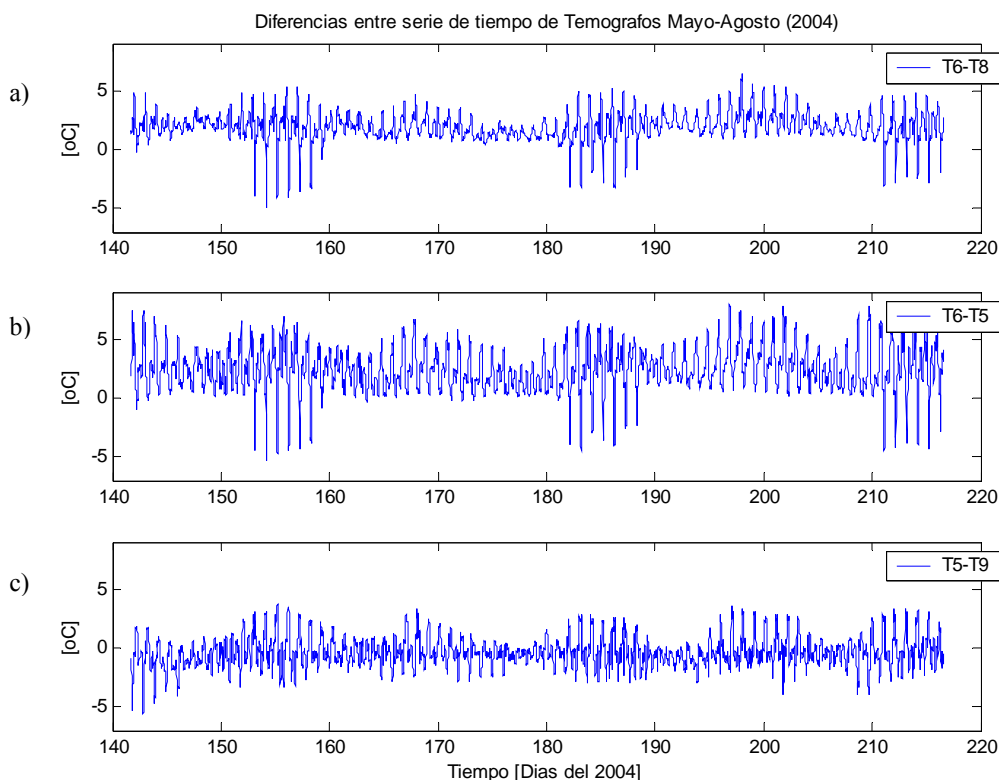


Figura 18.- Serie de tiempo de las diferencias de temperaturas en el Interior de la Bahía. a) Diferencia entre los termógrafos T6 y T8. b) Diferencia entre los termógrafos T6 y T5. c) Diferencia entre los termógrafos T5 y T9.

III.1.4.2. Gradientes de temperaturas.

La variabilidad temporal de temperatura (dT/dt) puede ser causada por (a) los procesos advectivos y difusivos verticales (proporcional al gradiente vertical de la temperatura dT/dz) que se presentan principalmente por las excursiones verticales de la pycnoclina y de los flujos de calor a través de la interfase agua-aire, y/o por (b) los procesos advectivos horizontales (proporcionales a $-u$ y $-v$) provenientes de la advección de un gradiente de temperatura (dT/dx , dT/dy) [Valle-Levinson *et al.*, 2000; Souza y Pineda, 2001; Souza *et al.*, 2001].

En este trabajo se calcularon los gradientes de temperatura transversales (dT/dx) y longitudinales (dT/dy) del agua de *BSQ*, a fin de estudiar los cambios de esta variable a lo largo de la bahía (entre la cabeza y la boca dT/dy) y a lo ancho de la boca de la bahía (dT/dx), así como su relación con la circulación del agua en este cuerpo costero.

La figura 19 muestra el comportamiento de los gradientes de temperaturas horizontal de los datos filtrados obtenidos entre el termógrafo T_3 de la boca y los termógrafos T_7 , T_{13} y T_2 . En general los gradientes de temperatura muestran valores positivos en casi todo el periodo de muestreo, lo que indica que el gradiente a lo largo de la bahía va de sur a norte, y a lo ancho de la boca va de oeste a este. Se observa una modulación quincenal en la figura 19a-b, que permite inferir una relación entre los gradientes longitudinales con la intensificación de la corriente durante mareas vivas y un relajamiento de estos gradientes durante mareas muertas. En cambio el gradiente de temperatura transversal se comporta de manera inversa, debido a que durante mareas vivas el gradiente es menor, lo cual indica que las temperaturas entre ambos extremos de la boca son más homogéneas.

Se calculó el coeficiente de correlación entre los gradientes de temperatura y los valores de la corriente (superficial y de fondo) de cada uno de los ADCPs. Los resultados muestran en general valores alto de correlación entre estas variables (Tabla V). Lo anterior permite confirmar que la modulación de la temperatura esta ligada a la modulación de las corriente residuales. El gradiente observado a lo ancho de la boca dT/dx (Fig. 19c), muestra mayor variabilidad comparado con dT/dy (Fig. 19a-b), muy

probablemente debido al mayor intercambio de agua que existe con el mar adyacente, lo cual ocasiona que los tiempos de residencia en la boca sean menores comparados con el interior (Jiménez, 2005)

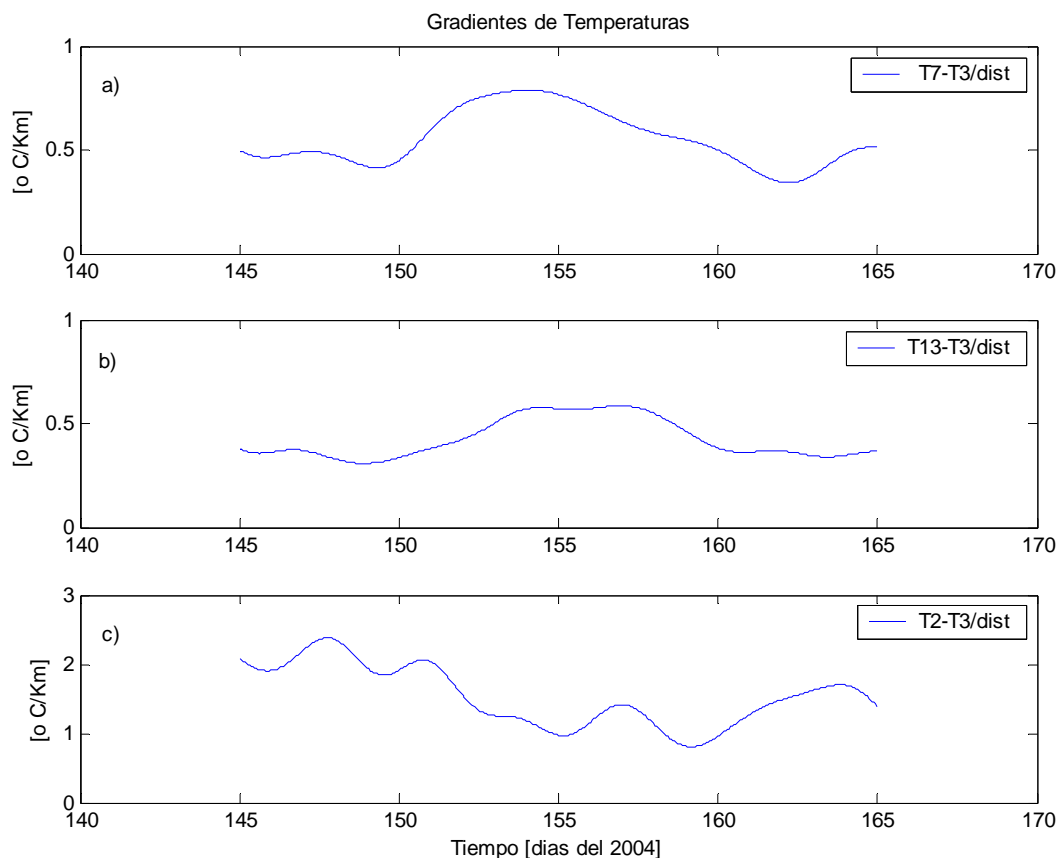


Figura 19. Serie de tiempo de los gradientes de temperatura calculados entre el termógrafo T3–Boca y T7-Cabeza oeste, T13-cabeza este y T2-Boca.

Estrictamente hablando, el enfriamiento superficial y la evaporación no son fuerzas como tales, pero conducen a cambios de densidad los cuales se traducen en cambios del campo de presión (Tomzac, 2000); es por eso el interés de estudiar esta variable. De manera general se puede apreciar que la distribución de las temperaturas y la variabilidad horizontal de los gradientes a lo largo de la bahía esta íntimamente ligada

al patrón de circulación de las corrientes y a los tiempos de residencia del agua en la misma.

III.1.4.3. Surgencias.

La alta productividad primaria en la costa Pacífico de la Península de Baja California se relaciona generalmente con la actividad de surgencias costeras que inyecta nutrientes dentro la zona eufótica en respuesta a los vientos del *NW* que predominan a lo largo de la costa. El proceso de surgencia tiene intensidad máxima a partir de abril a junio, con el índice de surgencia costero que varía de 50 a 300 m³/s por cada 100 m de la línea de la costa (Zaytsev, *et al.*, 2003). Frente a BSQ, las surgencias acarrearán aguas ricas en nutrientes cerca de la boca de la bahía y las corrientes de marea las propagarán al interior de la bahía.

Una forma de estudiar las surgencias en BSQ es mediante el análisis de series continuas de temperatura superficial del agua y su relación con la intensidad de la componente del viento paralela a la costa y el comportamiento de la marea (ver figs. 11a y 20). La figura 20a muestra el comportamiento de las series de tiempo de la superficie del nivel del mar, del termógrafo en superficie del lado oeste de la Boca (T₃) y del sensor de temperatura del RDI-boca instalado a ~15m de profundidad en el canal en la entrada de la bahía. El T₃ y RDI-boca registran el mayor descenso de la temperatura de 10.9 °C y 10.8 °C respectivamente el día 151 (Fig. 20a), esto ocurrió en el periodo de transición de mareas muertas a mareas vivas posterior al incremento de la magnitud del viento durante

los días 149-150 (Fig. 11a). Algo similar se observa durante los días 163-164 en la serie obtenida con el sensor temperatura del RDI-boca (Fig. 20b). Lo anterior sugiere que pudo haberse registrado un pulso moderado de surgencia que provocó el descenso de la temperatura hasta el valor de 10.8 °C (día 151) y de 12.4 °C (día 163) en este sitio de medición. Estos registros se compararon con los datos de nutrientes obtenidos en *BSQ* durante fechas similares por el personal del departamento de geoquímica del IIO de la UABC. Los registros de nutrientes también observan un relativo incremento en relación a los días que anteceden, sobretodo los de nitratos que registran valores hasta de 14.6 µM durante el día 153 (Dr. Víctor Camacho Ibar, comunicación personal).

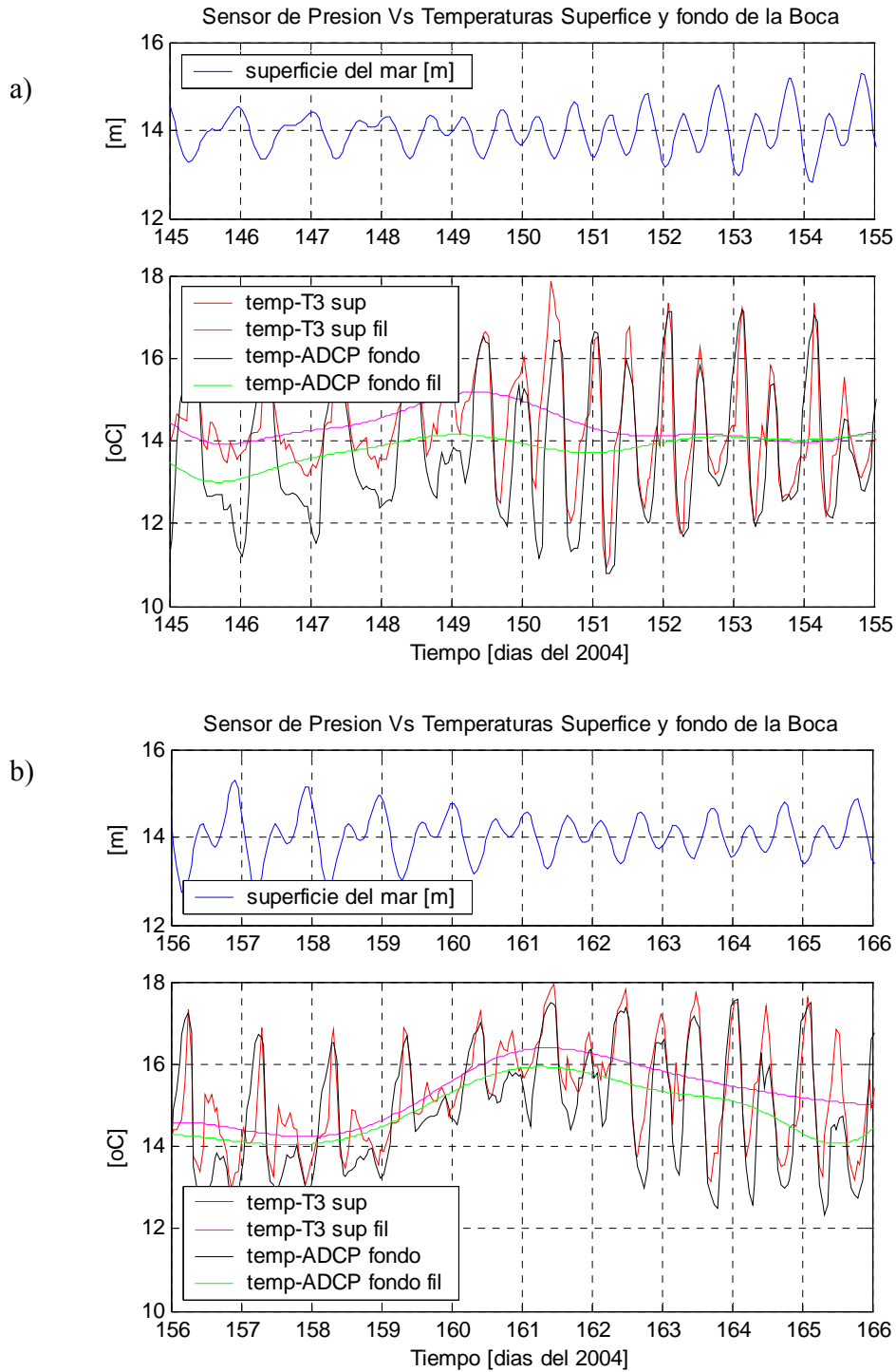


Figura 20.- a) Serie de tiempo del nivel medio del mar durante la transición de mareas muertas a vivas, comparado con la serie de temperaturas del sensor de la estación RDI-Boca y el termógrafo instalado en la boca extremo Oeste (T_3) durante los registros de mínimas temperaturas. b) Vivas a muertas.

Mediante el análisis de correlación entre las series de viento y temperaturas (agua superficial T_3 y de fondo RDI-boca), se observó que la máxima correlación entre estas variables se presenta después de 23 hrs. en la estación T_3 y después 29 hrs. en la RDI-boca (Fig. 21). Es decir la máxima respuesta del descenso de la temperatura en la boca de la bahía como consecuencia del esfuerzo del viento sobre la superficie del mar adyacente ocurre aproximadamente un día después de que inicia la intensificación del viento

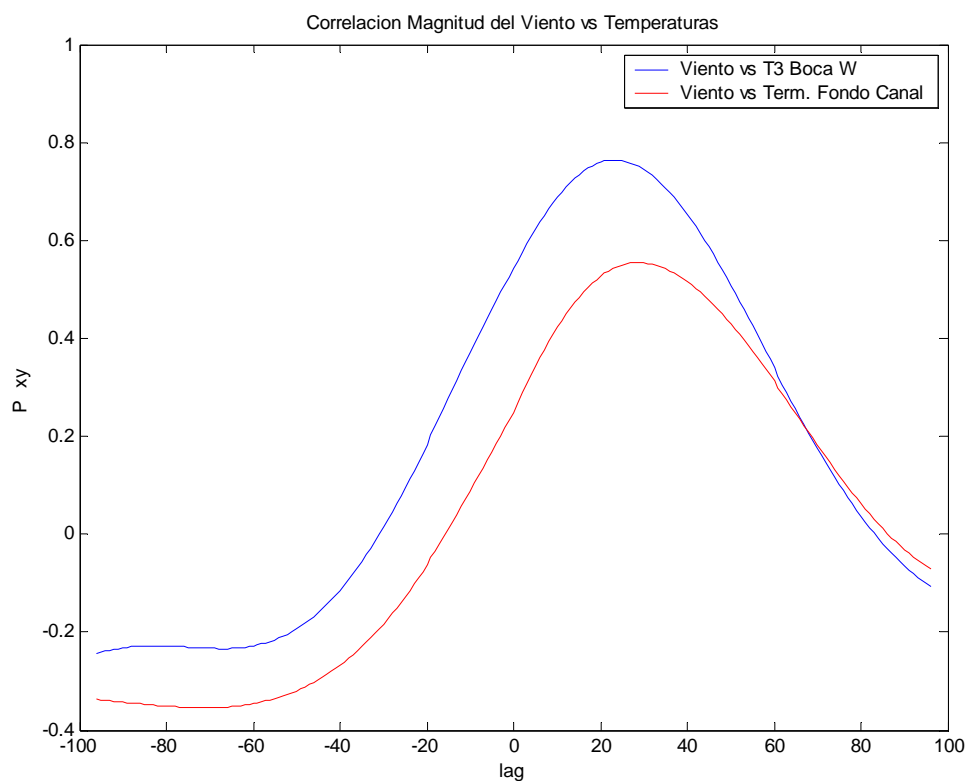


Figura 21. Correlación entre la serie de tiempo del viento y las series de temperaturas del sensor de la estación RDI-Boca y el termógrafo instalado en la boca extremo Oeste (T_3). Lag positivo significa que serie de la temperatura precede a la serie del viento.

Tabla V. Matriz de correlación cruzada entre las corrientes de superficie y fondo de cada uno de los ADCPs y diferentes forzamientos a lag = 0 de desfase.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O	P	Q	R	S
A	1	-0.95	-0.93	0.46	-0.92	0.57	0.80	-0.84	-0.74	0.89	-0.27	-0.75	0.59	-0.67	0.90	-0.85	0.83	-0.21	-0.58	-0.66
B	-0.95	1	0.95	-0.48	0.96	-0.64	-0.91	0.89	0.84	-0.85	0.45	0.88	-0.68	0.82	-0.90	0.86	-0.88	0.28	0.62	0.62
C	-0.93	0.95	1	-0.40	0.89	-0.64	-0.88	0.93	0.83	-0.87	0.42	0.84	-0.60	0.79	-0.91	0.84	-0.89	0.27	0.60	0.59
D	0.46	-0.48	-0.40	1	-0.65	0.31	0.61	-0.29	-0.56	0.43	-0.30	-0.55	0.82	-0.35	0.39	-0.48	0.36	0.30	-0.05	-0.55
E	-0.92	0.96	0.89	-0.65	1	-0.68	-0.90	0.81	0.89	-0.85	0.46	0.88	-0.79	0.75	-0.86	0.85	-0.81	0.22	0.56	0.63
F	0.57	-0.64	-0.64	0.31	-0.68	1	0.73	-0.62	-0.90	0.65	-0.71	-0.81	0.62	-0.71	0.55	-0.50	0.56	-0.16	-0.16	-0.03
G	0.80	-0.91	-0.88	0.61	-0.90	0.73	1	-0.79	-0.91	0.76	-0.70	-0.97	0.77	-0.92	0.73	-0.70	0.78	-0.17	-0.45	-0.48
H	-0.84	0.89	0.93	-0.29	0.81	-0.62	-0.79	1	0.77	-0.88	0.32	0.73	-0.46	0.74	-0.91	0.87	-0.92	0.34	0.60	0.46
I	-0.74	0.84	0.83	-0.56	0.89	-0.90	-0.91	0.77	1	-0.75	0.72	0.95	-0.82	0.82	-0.73	0.71	-0.73	0.15	0.34	0.34
J	0.89	-0.85	-0.87	0.43	-0.85	0.65	0.76	-0.88	-0.75	1	-0.23	-0.69	0.51	-0.61	0.93	-0.90	0.84	-0.28	-0.60	-0.57
K	-0.27	0.45	0.42	-0.30	0.46	-0.71	-0.70	0.32	0.72	-0.23	1	0.81	-0.52	0.82	-0.14	0.07	-0.28	0.24	0.12	-0.16
L	-0.75	0.88	0.84	-0.55	0.88	-0.81	-0.97	0.73	0.95	-0.69	0.81	1	-0.77	0.93	-0.68	0.62	-0.71	0.23	0.43	0.37
M	0.59	-0.68	-0.60	0.82	-0.79	0.62	0.77	-0.46	-0.82	0.51	-0.52	-0.77	1	-0.53	0.58	-0.63	0.52	0.27	-0.09	-0.57
N	-0.67	0.82	0.79	-0.35	0.75	-0.71	-0.92	0.74	0.82	-0.61	0.82	0.93	-0.53	1	-0.55	0.47	-0.68	0.40	0.47	0.17
Ñ	0.90	-0.90	-0.91	0.39	-0.86	0.55	0.73	-0.91	-0.73	0.93	-0.14	-0.68	0.58	-0.55	1	-0.98	0.86	-0.24	-0.65	-0.72
O	-0.85	0.86	0.84	-0.48	0.85	-0.50	-0.70	0.87	0.71	-0.90	0.07	0.62	-0.63	0.47	-0.98	1	-0.85	0.13	0.56	0.74
P	0.83	-0.88	-0.89	0.36	-0.81	0.56	0.78	-0.92	-0.73	0.84	-0.28	-0.71	0.52	-0.68	0.86	-0.85	1	-0.23	-0.53	-0.53
Q	-0.21	0.28	0.27	0.30	0.22	-0.16	-0.17	0.34	0.15	-0.28	0.24	0.23	0.27	0.40	-0.24	0.13	-0.23	1	0.81	-0.19
R	-0.58	0.62	0.60	-0.05	0.56	-0.16	-0.45	0.60	0.34	-0.60	0.12	0.43	-0.09	0.47	-0.65	0.56	-0.53	0.81	1	0.42
S	-0.66	0.62	0.59	-0.55	0.63	-0.03	-0.48	0.46	0.34	-0.57	-0.16	0.37	-0.57	0.17	-0.72	0.74	-0.53	-0.19	0.42	1

Donde: A.- Comp. u superficial de NA , B.- Comp. v superficial de NA , C.- Comp. u fondo de NA , D.- Comp. v fondo de NA , E.- Comp. u superficial de NB , F.- Comp. v superficial de NB , G.- Comp. u fondo de NB , H.- Comp. v fondo de NB , I.- Comp. u fondo RDI , J.- Comp. u superficial de RDI , K.- Comp. v fondo de RDI , L.- Comp. v superficial de RDI , M.- Gradiente de $Temp/dx$, N.- Gradiente de $Temp/dy$, Ñ.- Viento W_x , O.- Viento W_y , P.- Viento W_{mag} , Q.- Gradiente de Presión $RDI-NB$, R.- Gradiente de Presión $RDI-NA$, S.- Gradiente de Presión $NB-NA$.

III.2. CORRIENTES EN LA BOCA DE LA BAHÍA.

Para estudiar la variabilidad temporal y espacial de las corrientes en la boca de BSQ, se instaló un ADCP en el canal principal de acceso a la bahía durante el periodo comprendido del 21 Mayo al 16 Junio del 2004; a esta estación de registro se le denominó RDI-Boca. El equipo fue anclado a una profundidad aproximada de 15 m (Figs. 5 y 6a), con el cual se obtuvieron series de tiempo de las componentes de la velocidad de las corrientes a diferentes niveles, temperaturas en el fondo y registros de las fluctuaciones del nivel del mar.

III.2.1. Corrientes Totales en la Boca..

Las corrientes registradas en la estación RDI-Boca, muestran señales armónicas y verticalmente homogéneas en cuanto a su intensidad (Fig. 22). La componente norte-sur (v) (Fig. 22b) muestra ser más energética comparada con la este-oeste (u) (Fig. 22a). Como es de esperarse ambas componentes aumenta sus velocidades durante el periodo de mareas vivas. Las corrientes totales de este lugar se encuentran fuertemente asociadas a la marea, debido a que las corrientes fluyen en una dirección y en sentido opuesto dependiendo del comportamiento del ciclo de la marea presente (Ver fig. 23).

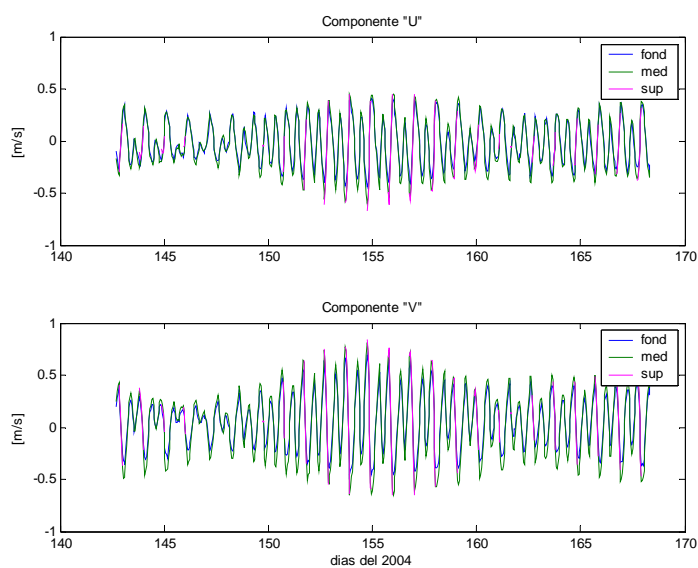


Figura 22. Serie de tiempo de las corrientes superficiales, a media agua y fondo, de la componente “u” y “v” respectivamente.

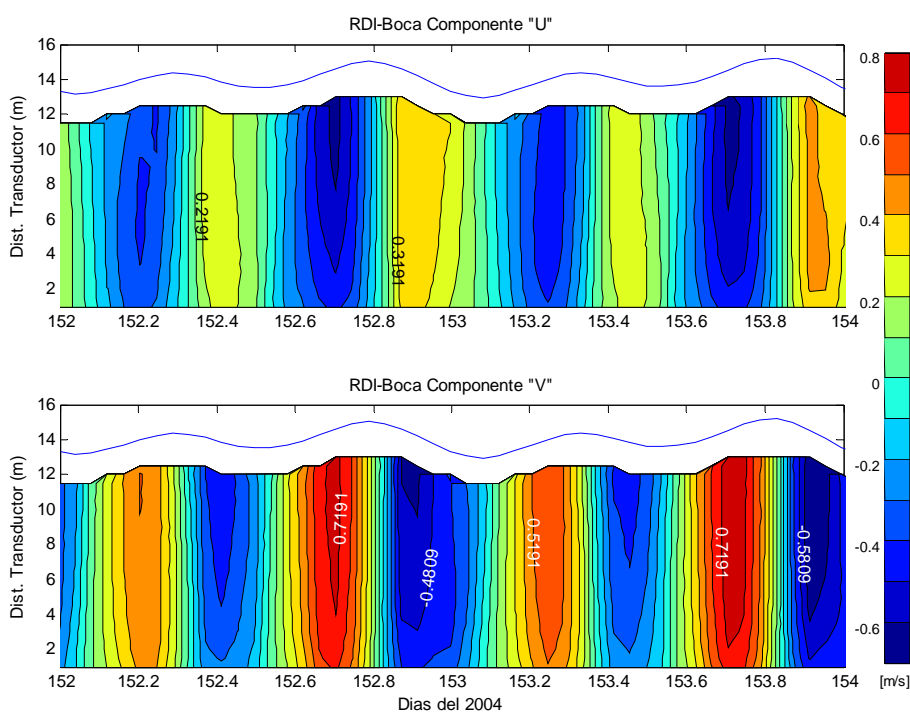


Figura 23. Contorno de las corrientes totales en todos los niveles, para ambas componentes “u” y “v”, durante un periodo de dos días. La barra de color representa la escala de la magnitud de las componentes [m/s]. Los valores positivos son hacia el norte y este, y los negativos hacia el sur y oeste, respectivamente.

De acuerdo a la estadística básica efectuada a las series de corrientes, se obtuvo que las velocidades máximas registradas fueron de 1.07 m/s (niveles superficiales) con dirección predominante del *NNW-SSE*.

Los perfiles verticales de las velocidades promedios de cada una de las series de tiempo de las componentes “*u* y *v*” indican un aumento en las magnitudes en los niveles superficiales (Fig. 24a). Las corrientes promedio para todo el periodo de muestreo fueron hacia el *NNW* con velocidades de 0.05 m/s en casi toda la columna vertical. A una distancia de 12 m sobre el fondo la corriente aumentó hasta alcanzar 0.28 m/s en la superficie (Fig. 24a y 24c). La desviación estándar de ambas componentes (Fig. 24b) muestra que las máximas variaciones de la velocidad también se presentan en la superficie. Los promedios en superficie son más intensos en virtud de que sólo se tienen registros en estos niveles durante las pleamares cuando las velocidades son mayores, esto ocasiona que los promedios de *u* y *v* estén sesgados.

“RDI-Boca”

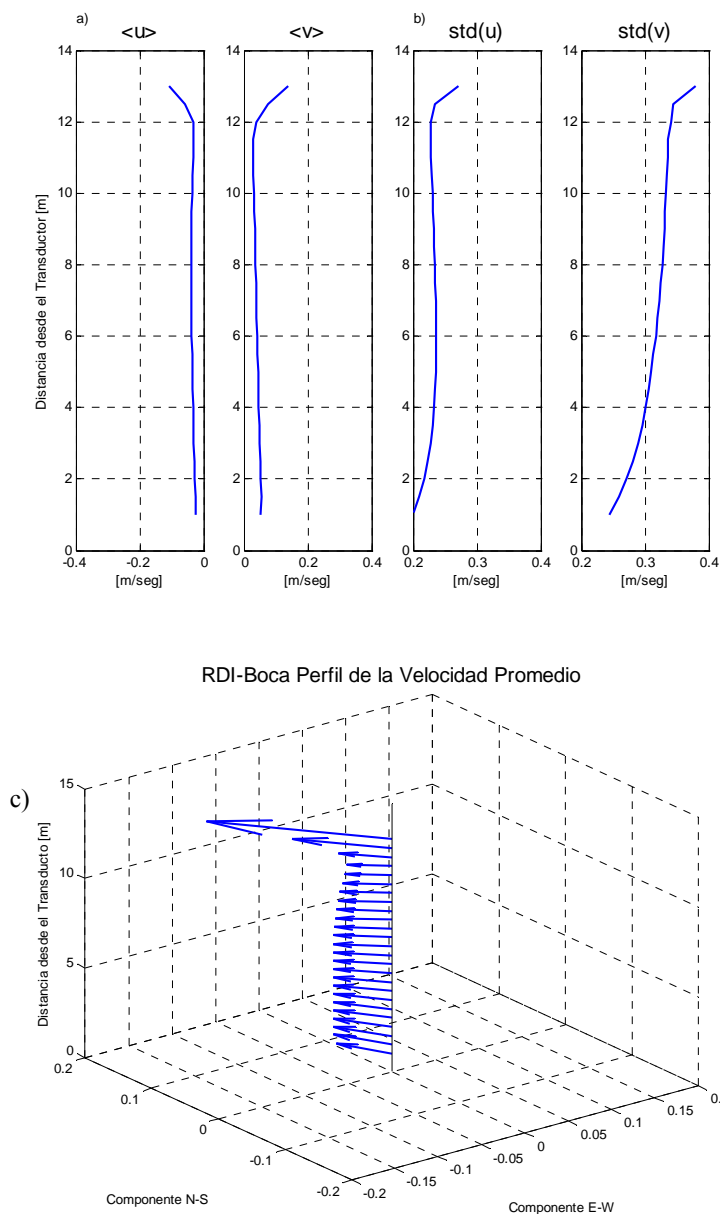


Figura 24. a) Perfiles vertical del promedio de cada uno de los niveles muestreados en la estación RDI-Boca para ambas componentes y b) desviación estándar. La componente “y” indica la profundidad a partir del sensor del aparato. c) Vectores de la velocidad promedio de la corriente de cada nivel muestreado durante todo el periodo [m/s].

La cantidad de energía relativa de las corrientes, distribuida en bandas de frecuencia puede ser observada mediante un análisis espectral. En este trabajo se obtuvo el espectro de potencia de la corriente integrada en la vertical (Ver fig. 25) de la componente más energética (a lo largo del canal). Se observa claramente el dominio de los constituyentes semidiurnos (M_2) y diurnos (K_1) sobre los demás armónicos. También se puede apreciar el efecto de la fricción en el canal, al generar constituyentes múltiples como son M_4 y M_6 a partir de las frecuencias fundamentales.

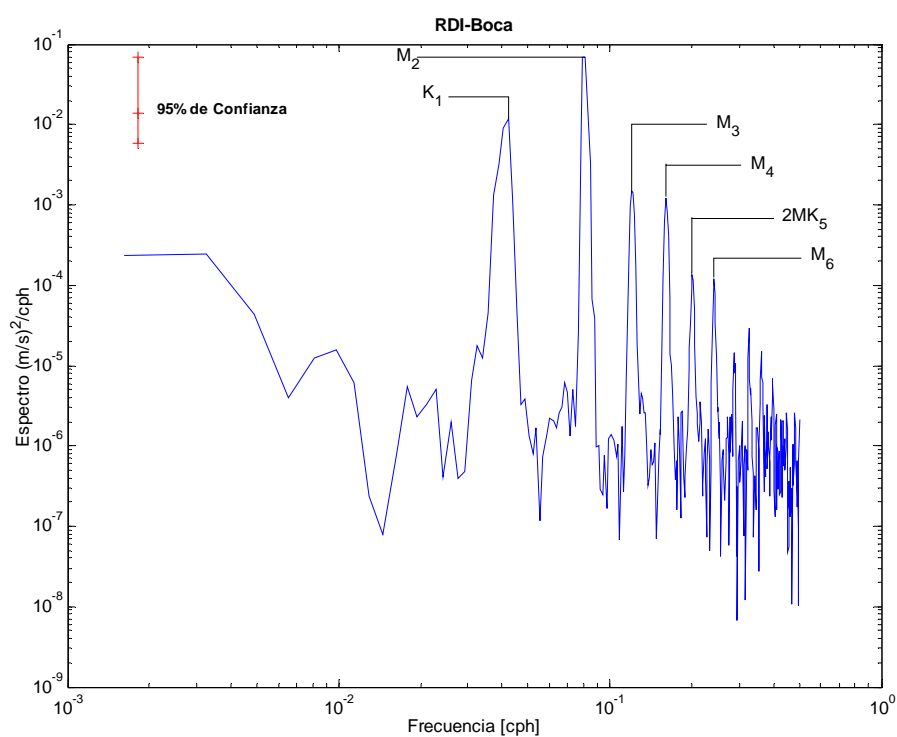


Figura. 25. Espectro de potencia de la componente $N-S$ de la corriente promedio en la estación RDI-Boca. El espectro se calculó con 6 grados de libertad y 95% de confianza. Escala logarítmica en ambos ejes.

Las elipses componentes obtenidas de las corrientes muestran igualmente una similitud en casi toda la columna de agua, por lo que se presenta una gráfica del

promedio vertical y temporal (Fig. 26a). La figura muestra las elipses de las tres constituyentes principales y su magnitud, las cuales presentan una orientación de la corriente con dirección *NNW*, lo que parece indicar que esta se encuentra confinada al relieve submarino de la entrada al canal principal en la boca. Sólo se aprecia un aumento significativo en la magnitud de los ejes hacia los niveles superficiales (Fig. 26b). En general la elipse de la constituyente M_2 obtenida en todos los niveles, indica que la intensidad de la velocidad es mucho mayor casi el doble de la magnitud que la K_1 y S_2 . Tanto en las elipses de mareas como en el espectro de potencia obtenido, se observa que la corriente tiene principalmente características semidiurnas.

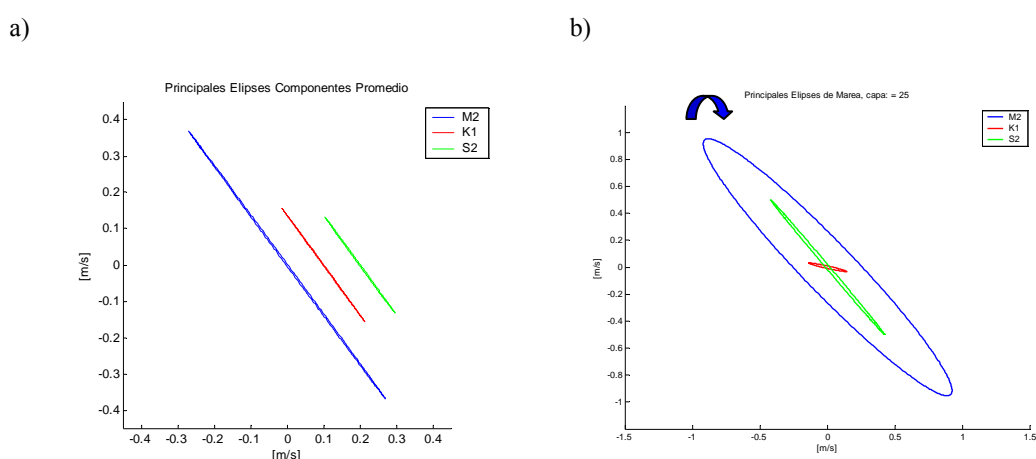


Figura 26. a) Elipses de los principales constituyentes de marea de las corrientes totales en promedio de toda la columna de agua obtenido en la estación RDI-Boca. Las elipses de K_1 y S_2 están corridas 0.1 m/s y 0.2 m/s respectivamente hacia la derecha para una mejor apreciación. b). Elipses de los principales constituyentes de marea de las corrientes totales observadas en la superficie a una distancia de 14 m sobre el fondo. La flecha indica el sentido de la rotación de la elipse.

Las funciones Empíricas Ortogonales (*FEOs*) sintetizan la variabilidad temporal y espacial de las series de tiempo en términos de funciones ortogonales o modos estadísticos. Estos modos estadísticos facilitan la identificación de estructuras, que

pueden explicar el comportamiento de la dinámica presente en una región oceanográfica determinada. El análisis realizado mediante la aplicación de *FEOs* a las corrientes totales indica que el *primer modo* explica el 99% de la variabilidad total. La figura 27a corresponde a la variabilidad temporal, misma que reproduce una señal armónica similar a la intensidad de la corriente de marea registrada en ese sitio, mientras que la variabilidad espacial de este mismo modo arroja un comportamiento totalmente barotrópico (Fig. 27b).

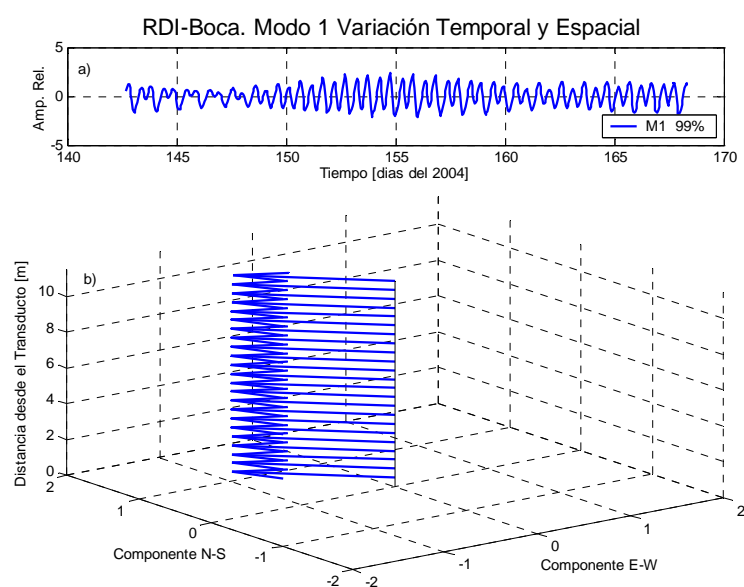


Figura 27. a) Variabilidad temporal y b) espacial arrojada del *primer modo* (M1) obtenido de las *FEOs* aplicadas a los datos de corrientes del anclaje RDI-Boca. La escala en [m/s] de las componentes vectoriales se indican en su correspondiente eje x y y .

III.2.2. Corrientes Residuales (bajas frecuencias).

En localidades donde las corrientes de mareas son predominantes, el término residual se usa para referir la parte no mareal del movimiento. En el contexto de series de tiempo de la elevación del nivel de mar ó velocidad, el residual es definido como la

diferencia entre lo observado y los parámetros predichos de la marea (Robinson, 1983). En este trabajo como la serie de corrientes medida fue relativamente corta y con una fuerte señal barotrópica, se optó por obtener las corrientes residuales mediante la aplicación del filtro “Lanczos” en su modalidad pasa bajas, a fin de obtener la señal de baja frecuencia al eliminar de las corrientes totales las señales de altas frecuencias forzadas por la marea y/o el viento (ver sección II.2.4.4.).

En las figuras 28b y 28c, se representan las componentes de las series de tiempo de las corrientes filtradas y rotadas en dirección de la máxima variabilidad. En estas figuras se observan las estructuras presentes durante todo el muestreo, y se aprecia que durante mareas vivas existe un flujo que entra a la bahía con velocidades de 0.07 a 0.1 m/s como máximas. Durante las mareas muertas las corrientes disminuye apreciablemente con velocidades mínimas de 0.03 a 0.001 m/s.

En la figura 28b se aprecian dos pequeños núcleos en la superficie durante el periodo de mareas muertas, en donde las corrientes muestran magnitudes muy pequeñas del orden de 0.001 - 0.016 m/s. Los núcleos parecen estar relacionados con la relajación de la corriente durante mareas muertas al permitir cierta estratificación; aunado a la intensificación del viento que actúa sobre estos niveles en sentido contrario al desplazamiento de la corriente, como se aprecia durante los días 162 al 164, lo cual provoca que la velocidad de la corriente residual disminuya notoriamente. Esto puede ser debido a que al disminuir la fricción durante las mareas muertas, el parámetro de Coriolis empieza a estar presente en la dinámica de la boca, por lo tanto favorece a una ligera

estratificación en las capas superficiales y/o a la influencia del viento que se opone al sentido de la circulación de la corriente superficial durante este periodo.

El promedio temporal del flujo residual (Fig. 29) muestra que la corriente entra a BSQ con dirección *NNW* en casi toda la columna de agua; sin embargo en las zonas más profundas se observa un ligero cizallamiento que rota en sentido de las manecillas del reloj es decir hacia *NNE*. Lo anterior muy probablemente sea debido a la forma y dirección del canal el cual cambia de *NNW* a *NNE* unos metros después de donde se situó el anclaje, mismo que puede ejercer cierta influencia en la dirección de la corriente.

Los resultados arrojados mediante la aplicación de *FEOs* a las corrientes totales, permitieron evidenciar la gran influencia de la marea sobre la dinámica en la boca. Los resultados a través del análisis a las corrientes residuales en este mismo sitio, muestran la intensificación de las magnitudes durante mareas vivas y homogeneidad de las mismas a través de toda la columna de agua, muy probablemente a que el flujo medio inducido marealmente dentro de un cuerpo costero incrementa con la amplitud de marea en la boca (Li and O'Donnell, 1997). Mientras que la homogeneidad es debida a la capacidad del flujo de marea para mezclar la estratificación y mantener verticalmente condiciones homogéneas la cual se incrementa con la fuerza de la marea. Por otra parte se puede observar la pequeña influencia del viento en las capas superficiales durante las mareas muertas, al existir un relajamiento de este forzamiento.

El aumento de la intensidad de la corriente durante mareas vivas sugiere que las corrientes residuales en la boca pueden ser generadas por las interacciones no lineales de las mareas, como son los términos advectivos y friccionales presentes en la ecuación de movimiento (Ec. 1), debido a que al aumentar la intensidad de las corrientes totales durante las mareas vivas, las corrientes residuales también se ven modificadas, dado a que incrementan su magnitud, como se aprecia en la figura 28b. Durante mareas muertas el relajamiento de las corrientes residuales permiten cierta estratificación en las magnitudes sobre todo en superficie. En la figura 30 se puede observar como sólo en los cuatro primeros niveles superficiales existe buena correlación vectorial entre las corrientes residuales y el viento filtrado. Después esta correlación disminuye notoriamente conforme aumenta la profundidad. Lo cual confirma la poca influencia que tiene el viento sobre resto de la columna de agua en la estación *RDI-Boca*.

Kasai *et al.* (2000) y Valle-Levinson *et al.* (2003) concuerdan que, cuando los efectos friccionales son mayores en relación a los efectos de la rotación de la tierra, dan como resultado un número de Ekman vertical grande ($E > 1$), y cuando la fricción disminuye en relación a los efectos de la rotación, el número de Ekman vertical decrece ($E < 1$). De acuerdo a lo propuesto por estos autores, se calculó el número de Ekman vertical (Ec. 6) para *BSQ*, mediante el uso de tres diferentes coeficientes de viscosidad calculados con datos del 2005 para esa misma estación de muestreo, los cuales fueron: $A_z = 10 \times 10^{-3}$, 14×10^{-3} y $14.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; para el cálculo de A_z se consideró una profundidad de 10 m (Alejandro Souza comunicación personal). Estos coeficientes al aplicarlos a la Ecuación (6) dio como resultado números de $E = 1, 1.4$ y 1.45

respectivamente. Resultados que permiten comprobar que en *BSQ* existe un número de Ekman grande ($E > 1$), lo cual es consistente con la teoría y lo observado en las corrientes residuales, es decir un flujo que entra a la bahía a través del canal (zona más profunda) desde el fondo hasta la superficie de agua durante mareas vivas (Fig. 28b), cuando los efectos friccionales son más importantes, en virtud de que estos efectos son directamente proporcionales al incremento de la intensidad de la corriente, mientras que durante mareas muertas al disminuir la fricción permite una ligera estratificación en la superficie durante esta etapa.

En este estudio se realizó el cálculo del parámetro δ propuesto por Li y O'Donnell (2005), correspondiente a la *BSQ* mediante el uso de la ecuación 7, a fin de determinar el comportamiento de los flujos de intercambio que ocurren en la boca y se consideró la longitud a lo largo del canal (~16 km), la frecuencia de M_2 por ser la más energética, dando como resultado el parámetro $\delta = 0.11$, lo cual indica de que se trata de un canal corto por lo tanto tiene un transporte que entra por las zonas más profundas y sale por las más someras, esto coincide con lo observado en el flujo residual de la boca y al flujo propuesto de salida en base al comportamiento de la distribución de temperaturas en la boca .

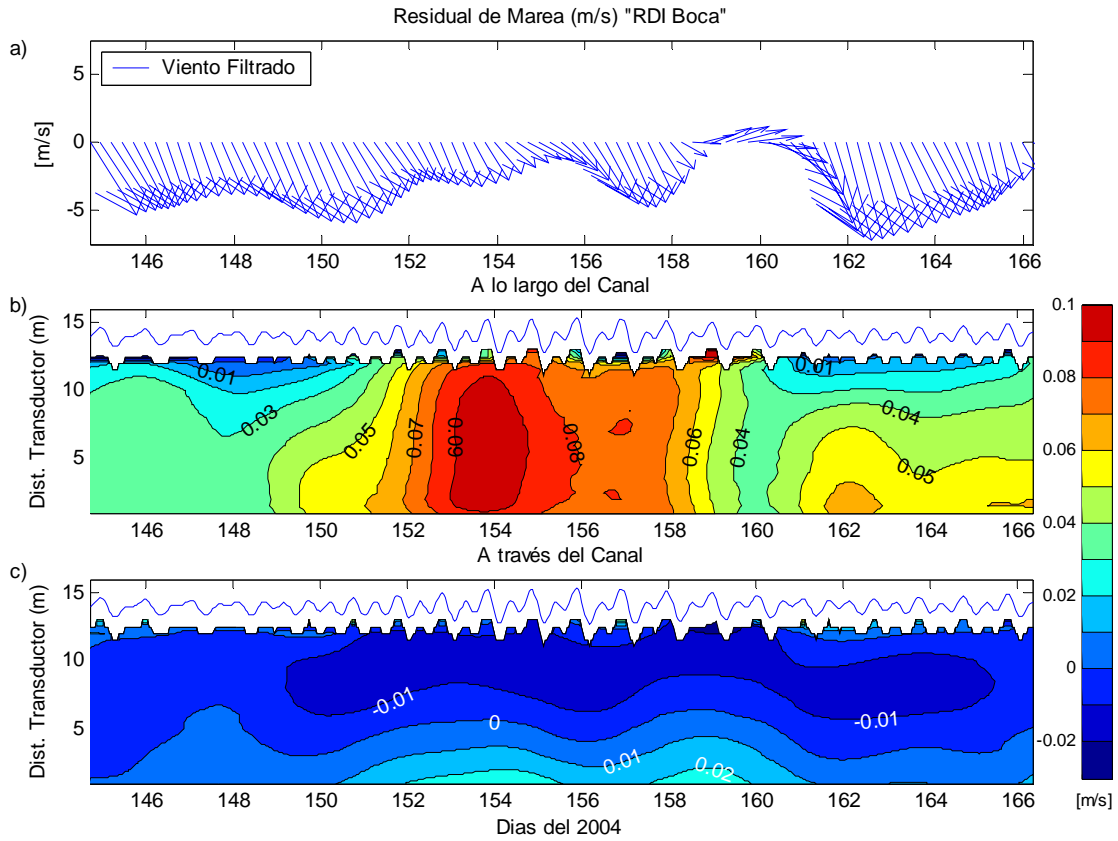


Figura 28. a) Serie de tiempo del vector viento b) contornos verticales de las series de tiempo de las corrientes de baja frecuencia a lo largo del canal y c) componente a través del canal. La línea azul representa la superficie del agua. La barra de color representa la escala de velocidad de las componentes [m/s]. Los valores positivos indican corrientes hacia norte y este, y los negativos hacia el sur y oeste respectivamente. Se utilizó el criterio oceanográfico (hacia donde va) para indicar sentido de la dirección del viento.

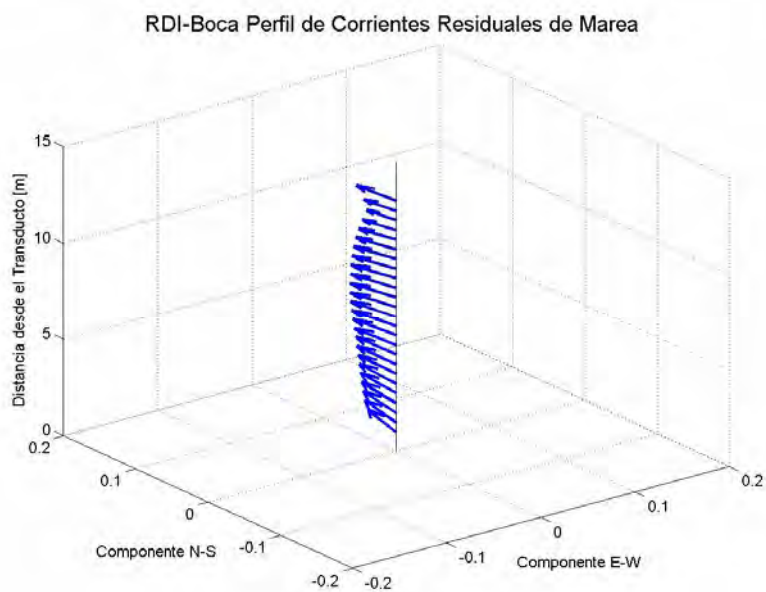


Figura 29. Perfil de las corrientes residuales de marea promediadas en cada uno de los niveles muestreados en la estación RDI-Boca. Las unidades están dadas en [m/s].

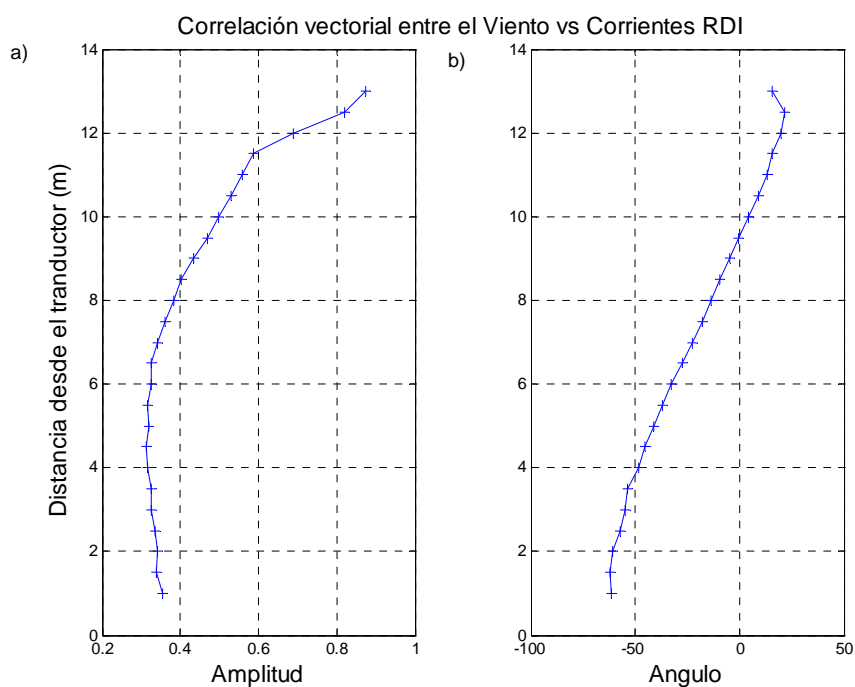


Figura 30.- a) Correlación vectorial entre el viento y la corriente residual *RDI-Boca* en los diferentes niveles muestreados. b) Angulo de correlación entre el viento y la corriente, valores positivos indican que la primera serie (corrientes) es rotada en contra de las manecillas del reloj con respecto de la serie dos (viento).

La aplicación de *FEOs* a las series de corrientes de bajas frecuencias, indica que los tres primeros modos fueron suficientes para explicar el 98% de la variabilidad de las series residuales. Las figuras 31 y 33 muestran los tres primeros modos de la variación temporal y espacial respectivamente. El primer modo representa el 66 % de la variabilidad explicada. La amplitud relativa de este modo temporal disminuye durante las mismas fechas en que se presenta el periodo de mareas vivas y se incrementa durante el periodo de mareas muertas. El inverso de esta modulación temporal tiene un comportamiento similar a la respuesta del gradiente de temperatura a lo largo del canal ($\partial T / \partial y$) y en menor medida con la componente meridional del viento W_y (ver tabla VI y figura 33). Lo que parece indicar que las variaciones de la corriente residual de alguna forma es modulado por la variación temporal mareas vivas-muerta de los gradientes de temperatura longitudinal, así como a las pequeñas modulaciones que el viento ejerce en la superficie cuando las corrientes residuales son relajadas durante mareas muertas.

El inverso de la variación temporal del segundo (25%) y tercer modo (7%), sugiere la influencia del esfuerzo del viento sobre la superficie de la columna de agua, en virtud de que los máximos y mínimos de las componentes W_y y W_x del viento coinciden con estos modos respectivamente (Tabla VI, Figs. 34 y 35), influencia que puede ser apreciada en la modulación espacial de estos mismos modos (Figs. 32b y 32c).

El gradiente de presión ($\partial P / \partial x$) a lo ancho del canal también presenta una modulación temporal que sugiere cierta relación con el inverso del Modo 2 de la

corrientes residuales (Tabla VI y figura 34), por lo que se puede inferir que este forzamiento también influye en menor medida en la dinámica de la boca.

Lo anterior significa que las corrientes residuales están estrechamente ligadas a las modulaciones de temperaturas ocasionadas por la variabilidad ocurrida entre mareas vivas-muertas durante este periodo y en menor medida al efecto del viento y gradientes de presión.

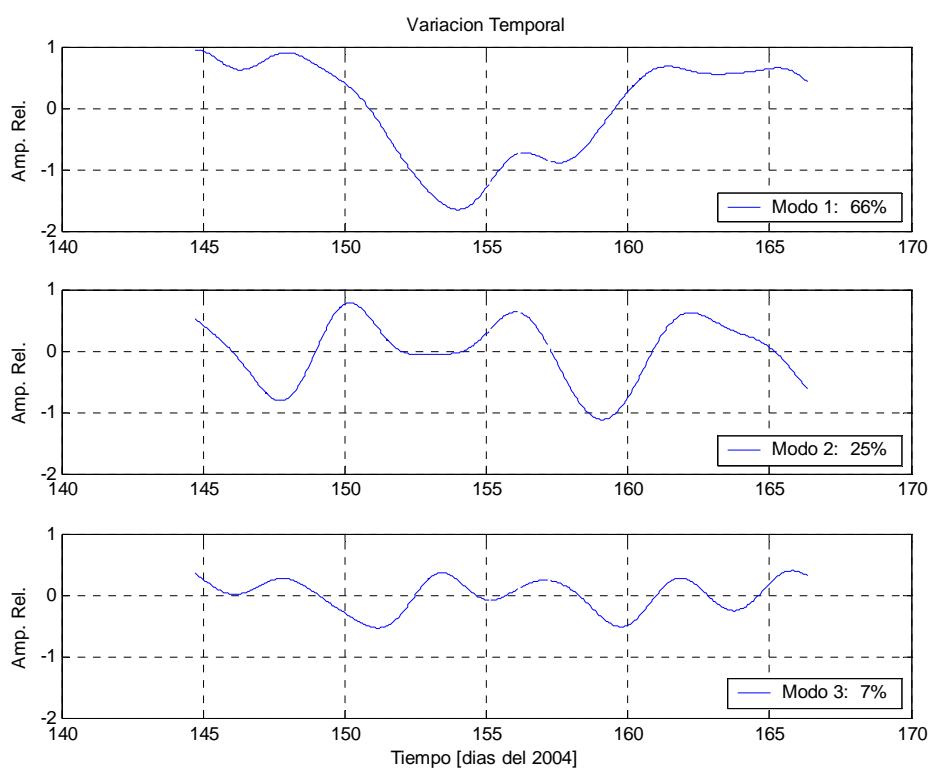


Figura 31. Variación temporal de los tres primeros modos ortogonales aplicados a las series de tiempo de las corrientes residuales de marea obtenidas en la estación RDI-Boca.

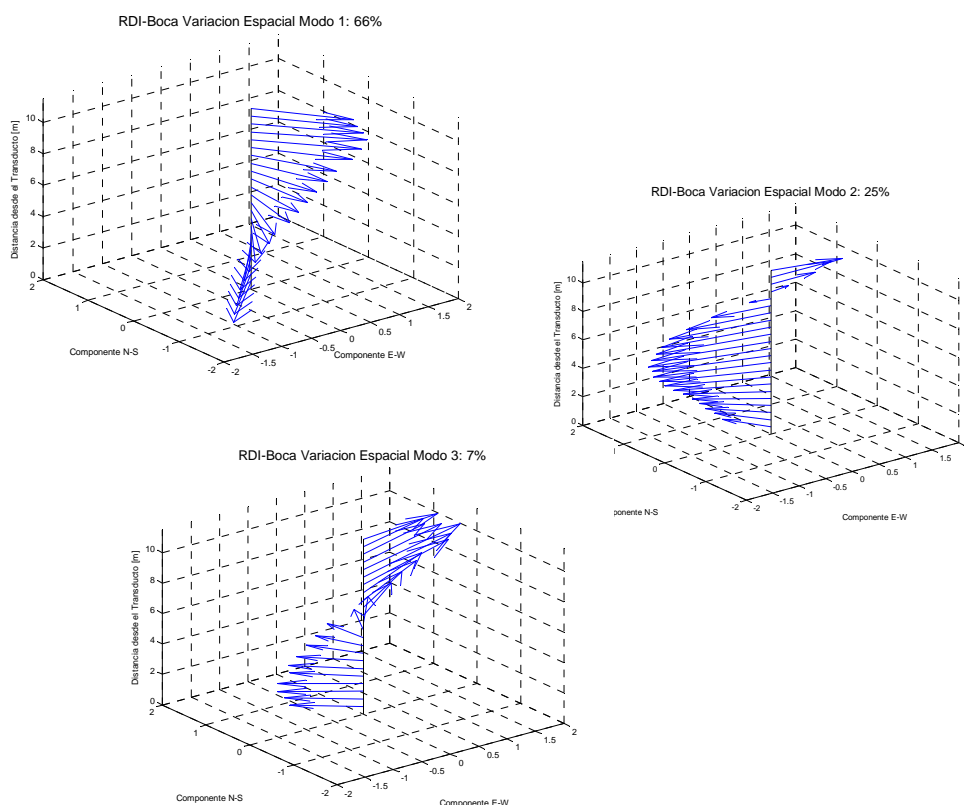


Figura 32. Variación espacial de los tres primeros modos ortogonales aplicados a las series de tiempo de las corrientes residuales de marea obtenidas en la estación RDI-Boca. La escala de las componentes vectoriales se indican en su correspondiente eje x y y con amplitudes relativas.

Tabla VI.- Correlaciones entre principales modos obtenidos mediante la aplicación de *funciones empíricas ortogonales FEOs* a los datos de corrientes residuales "RDI-Boca" Vs gradientes de temperatura ($\partial T / \partial x, \partial T / \partial y$), componentes zonal y meridional del viento (W_x y W_y) y gradientes de presión ($\partial P / \partial x, \partial P / \partial y$).

PRINC. MODOS	$\frac{\partial T}{\partial x}$	$\frac{\partial T}{\partial y}$	W_x	W_y	$\frac{\partial P}{\partial x}$	$\frac{\partial P}{\partial y}$
Modo 1	0.634	-0.960	0.200	-0.549	-0.045	-0.269
Modo 2	0.173	-0.036	0.016	-0.699	-0.690	-0.248
Modo 3	0.121	0.157	-0.601	-0.321	-0.070	-0.021

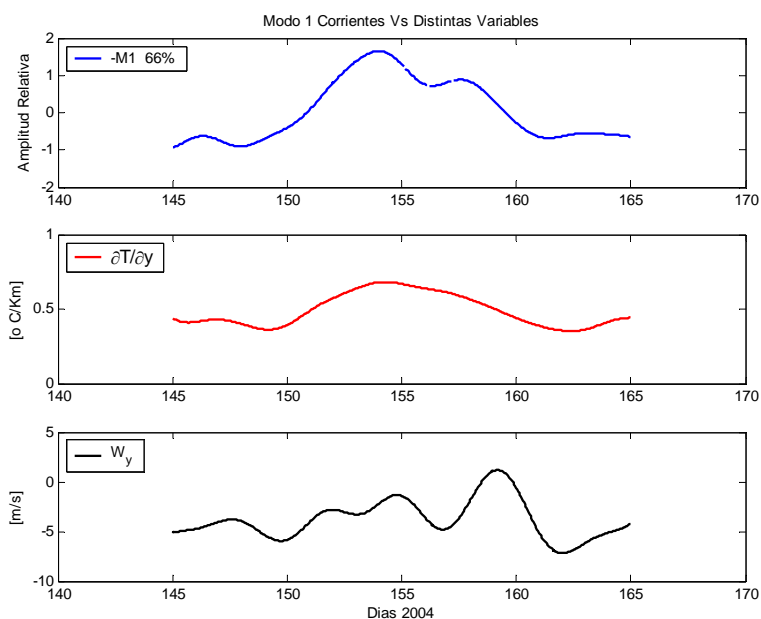


Figura 33.- Comparación del primer modo de las corrientes residuales contra gradiente de temperatura a lo largo del canal ($\partial T / \partial y$) y componente meridional del viento (W_y).

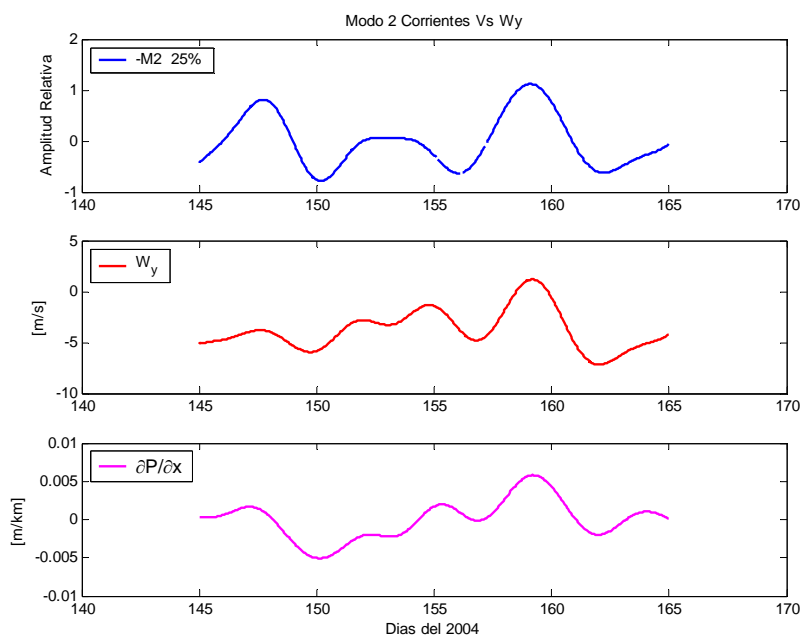


Figura 34.- Comparación del segundo modo de las corrientes residuales contra componente meridional del viento (W_y) y gradiente de presión a lo ancho del canal ($\partial P / \partial x$).

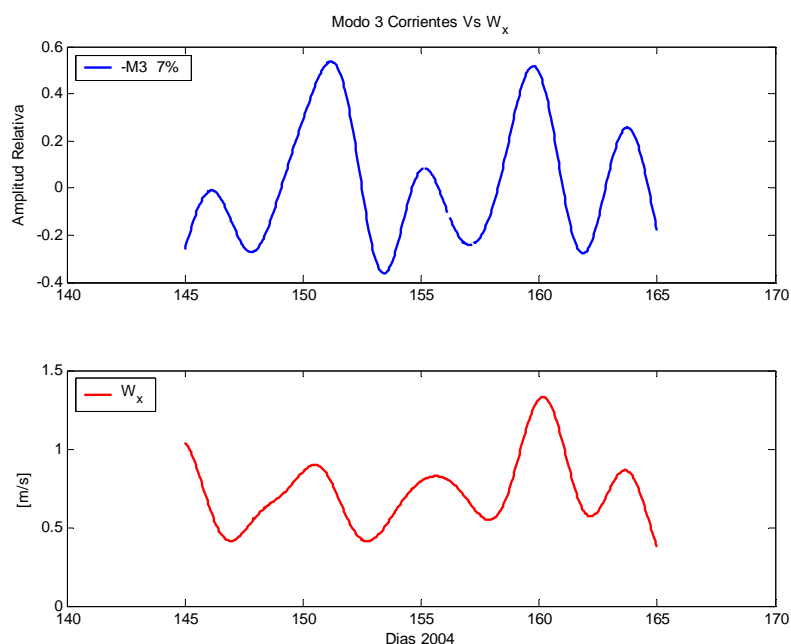


Figura 35.- Comparación del tercer modo de las corrientes residuales contra componente zonal del viento (W_x).

III.3. CORRIENTES EN EL INTERIOR DE LA BAHÍA.

En el interior de la bahía donde el canal principal de navegación bifurca en dos canales de acceso a los brazos conocidos como Bahía San Quintín (BSQ) y Bahía Falsa (BF), se instalaron dos ADCPs marca Nortek (Fig. 5 y 6b). Las estaciones de anclajes denominadas Nortek A (NA) y Nortek B (NB), se colocaron a una profundidad de 8 y 7 metros respectivamente, los cuales registraron datos de corrientes de manera continua durante el periodo del 23 Mayo al 13 Junio del 2004.

III.3.1. Corrientes Totales en el interior de la Bahía.

El comportamiento de las corrientes medidas durante 5 días del periodo de muestreo en las estaciones *NA* y *NB* se puede observar en la figura 36a-b. Se aprecia que la componente Norte-Sur (*v*) de la estación *NA* es la más energética comparada con la componente Este-Oeste (*u*). Lo contrario ocurre en la estación *NB*. Esto es debido a que las corrientes se encuentran estrechamente ligadas a la configuración del canal en donde se realizaron las mediciones. Las etapas de flujo y de reflujo como es de esperarse muestran una fuerte relación con el nivel medio del mar en ambas estaciones (Fig. 36a-b).

La estadística básica de la tabla VII y figuras 36a-c, muestra que las velocidades máximas se registraron en la superficie en ambas estaciones, mientras que las mínimas en el fondo para la estación *NA* y a media agua en la *NB*. Las corrientes en la estación *NB* fueron mayores comparada con la *NA*, esto puede ser debido a que la primera de ellas se localizó en un área de mayor exposición al forzamiento del viento (Fig. 5).

Las velocidades máximas en las estaciones *NA* y *NB* ocurrieron en las etapas de reflujo durante mareas vivas. Lo anterior puede ser explicado debido a que la marea por ser mixta semidiurna, sube durante un periodo de aproximadamente 18 horas desde el mínimo pasando por un máximo intermedio hasta alcanzar el nivel máximo y baja del nivel máximo al mínimo sólo en 6 horas durante las mareas vivas. Esto implica que la velocidad de reflujos registre intensidades más altas que el flujo (Ortiz *et al.*, 2003).

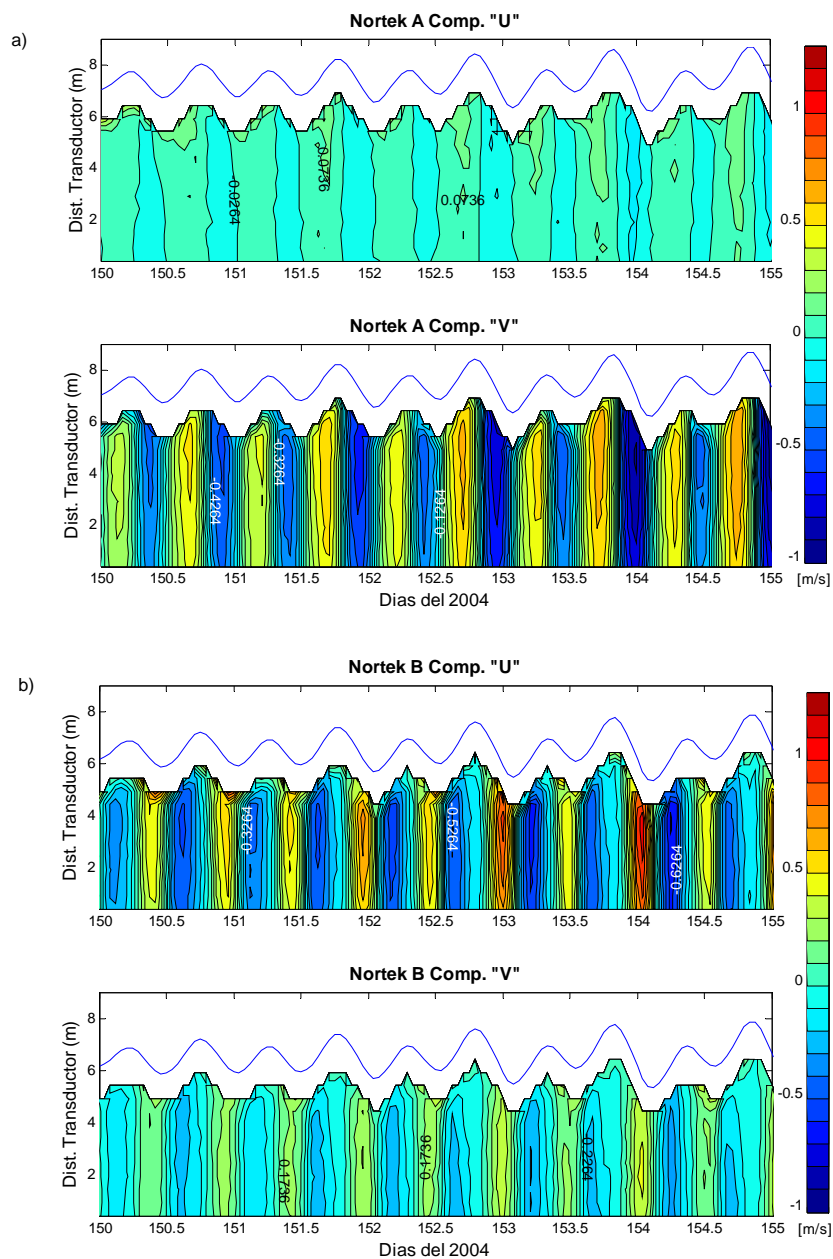


Figura. 36. a) Contornos de las corrientes absolutas en todos los niveles, para ambas componentes “ u y v ”, durante un periodo de cinco días obtenidos en la estación NA b) contornos de la estación NB . La barra de color representa la escala de la magnitud de las componentes en [m/s]. Los valores positivos indican hacia norte y este, y los negativos hacia sur y oeste respectivamente.

Tabla VII.- Estadística básica de las magnitudes de las corrientes obtenidas de los ADCPs en las estaciones *Nortek A* y *Nortek B* durante el periodo de muestreo del 23 mayo al 13 junio del 2004.

Estación	Máximo	Mínimo	Media	Dirección
<i>Nortek A</i>				
Magnitud [m/s]				
Superficie	1.03	0.00	0.08	<i>ESE</i>
Media Agua	1.00	0.00	0.02	<i>SSE-SSW</i>
Fondo	0.93	0.00	0.02	<i>SW</i>
<i>Nortek B</i>				
Magnitud [m/s]				
Superficie	1.34	0.02	0.11	<i>ENE-ESE</i>
Media Agua	1.22	0.00	0.04	<i>SSW-SW</i>
Fondo	1.15	0.00	0.06	<i>SW</i>

Las figuras 37a-37d sintetizan los resultados del comportamiento promedio y desviación estándar en cada uno de los niveles muestreados de las estaciones *NA* y *NB*. Excepto en la superficie en ambas estaciones el promedio temporal $\langle u \rangle$ y $\langle v \rangle$ es aproximadamente igual a cero (figuras 37a y 37c). La mayor variabilidad de la corriente se presenta en los dos primeros metros de la superficie (Fig. 37b y 37d). La desviación estándar calculada es mayor en la componente *v* de la estación *NA* y *u* de *NB*, lo cual indica que son las componentes de mayor variabilidad.

Los promedios de las velocidades observadas en la figura 38a-b muestran un cizallamiento en el sentido de las manecillas del reloj sobre todo en la estación *NA*, en virtud de que los vectores de velocidad cambian de dirección y sentido conforme se incrementa la profundidad. En la *NB* parece comportarse como un cuerpo de dos capas, con densidades probablemente diferentes y se dirigen en sentido opuesto. Sin embargo es necesario corroborar este resultado con registros de las características termohalina de la columna de agua. Lo anterior se puede explicar al considerar la acción del viento que fuerza la dinámica en la superficie, provocando un cizallamiento en los vectores de velocidad en superficie la cual puede desplazar el agua en un extremo de la bahía. En el fondo la dirección de las corrientes se rige principalmente

por la batimetría del lugar y presumiblemente a un balance de masas, como consecuencia del agua desplazada en superficie.

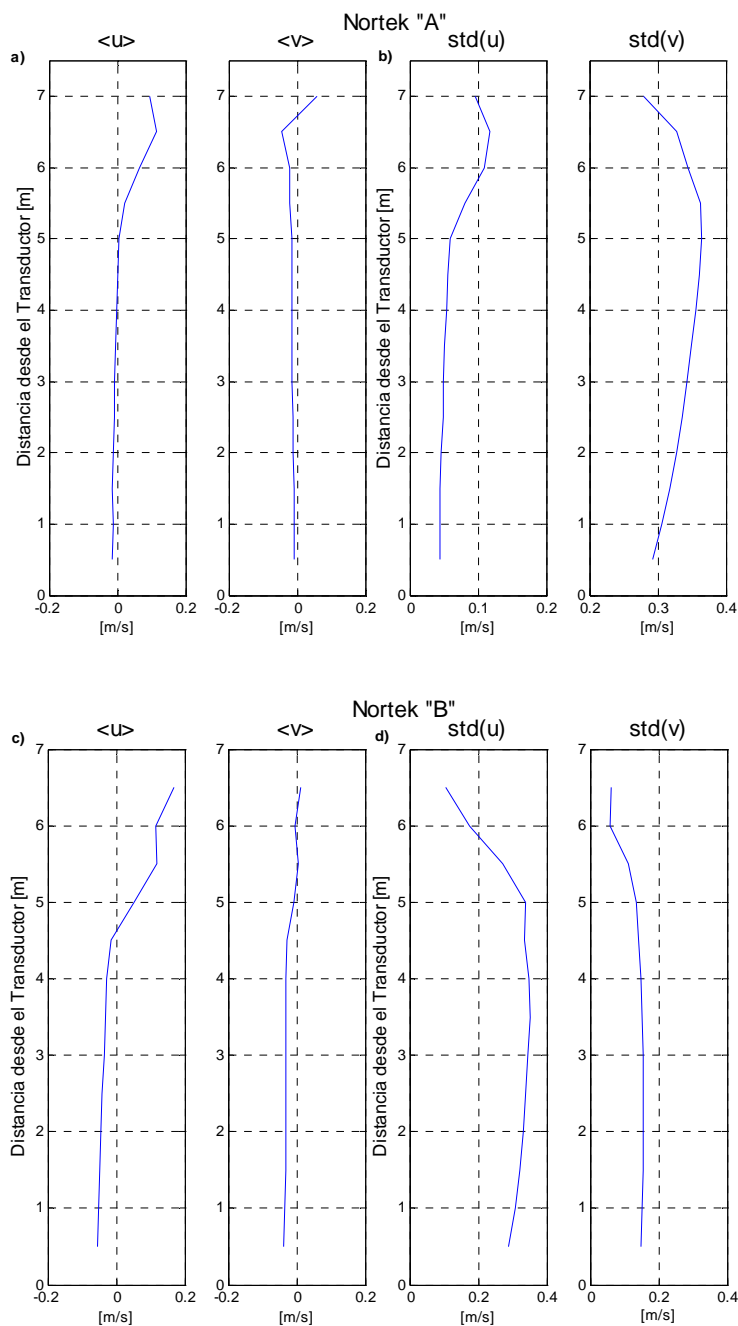


Figura 37.- a y c) Perfiles verticales del promedio temporal $\langle u \rangle$ y $\langle v \rangle$ y b-d) desviación estándar para ambas componentes de cada uno de los niveles muestreados en las estaciones NA y NB respectivamente. Los promedios en los niveles superficiales (por encima de 6 m en NA y de 5 m en NB) se encuentran sesgados, debido a que solo se contó con información durante las pleamares. La componente “y” indica la profundidad a partir del sensor del aparato.

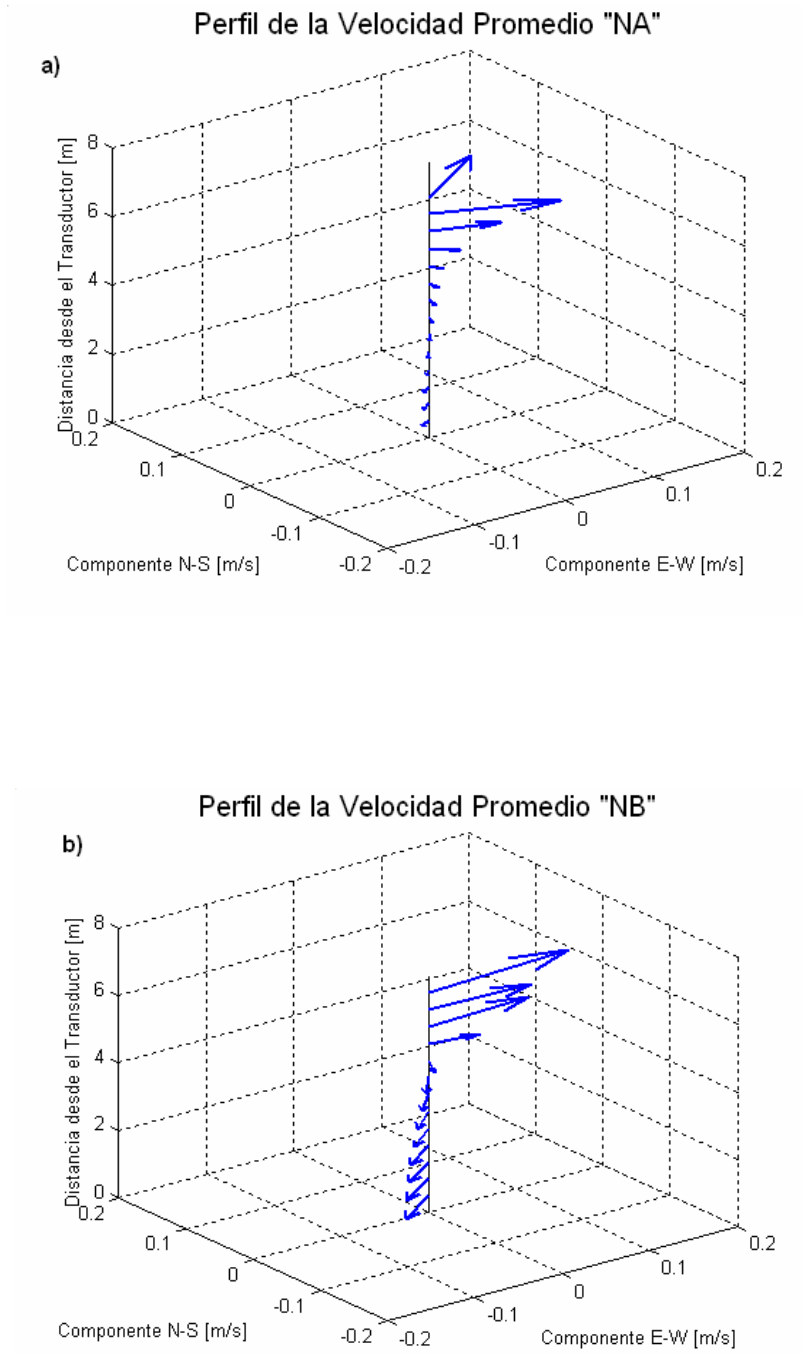


Figura 38a-b) Vectores de la velocidad promedio de la corriente de cada nivel muestreado. La escala de las componentes vectoriales se indica en sus correspondientes ejes horizontales en [m/s].

El espectro de potencia del promedio vertical de las corrientes de la componente más energética de las estaciones *NA* y *NB* (Fig. 39a-b), muestra que la mayor energía espectral se encuentra concentrada en las bandas semidiurna (M_2) y diurna (K_1), similar a lo observado en la estación RDI-Boca.

En la estación *NB* se observa que en las bandas terciurna (M_3) y cuartidiurna (M_4), tienen un mayor poder espectral comparado con la estación *NA*. Esto sugiere que la transferencia de energía de bandas de frecuencia dominantes hacia frecuencias más altas es más evidente en la estación *NB*. Probablemente en esta estación la fricción represente un término más importante en relación con la estación *NA*, aunado a que la estación *NB* se ubicó en un canal más somero sujeto a mayor interacción con el fondo marino.

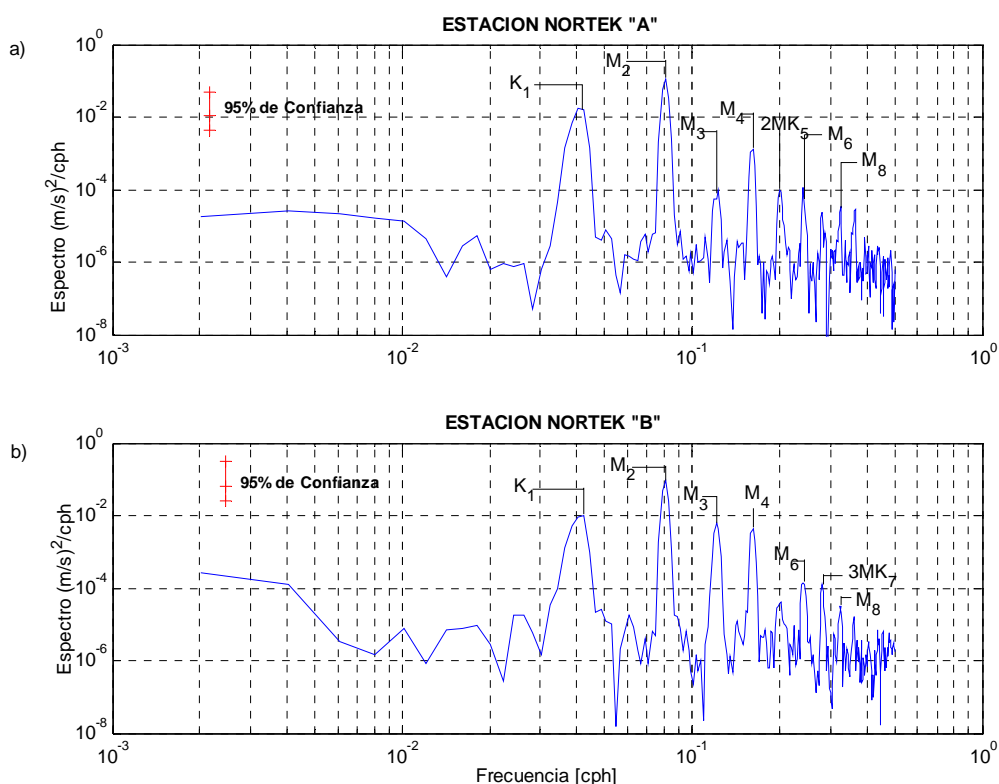


Figura 39. Espectro de potencia del promedio vertical de la corriente a) Componente más energética de la estación *NA* y b) Componente más energética de la estación *NB*. El espectro se calculó con 6 grados de libertad y 95% de confianza. El eje horizontal y vertical tiene una escala logarítmica.

En virtud de que las elipses componentes obtenidas de cada una de las estaciones (*NA* y *NB*) mostraron respuesta similar en casi toda la columna de agua, excepto en la superficie en donde el eje menor aumenta relativamente de magnitud debido aparentemente al efecto del viento (Fig. 40b y Fig. 40b), se calculó la elipse componente de la señal integrada en la vertical (Fig. 40a y Fig. 40a). Como es de esperarse en un sistema hidrodinámico delimitado por canales, el ángulo de inclinación de la elipse está relacionado estrechamente a la dirección de los canales en donde se efectuó la medición. En ambos casos al igual que en la estación RDI-Boca, las constituyentes armónicas de M_2 , K_1 , S_2 , y O_1 son las más energéticas, la M_2 resulta tener mayor energía espectral. Tanto el análisis espectral como el armónico efectuados dan claro indicio de que las corrientes presentan características predominantemente semidiurnas.

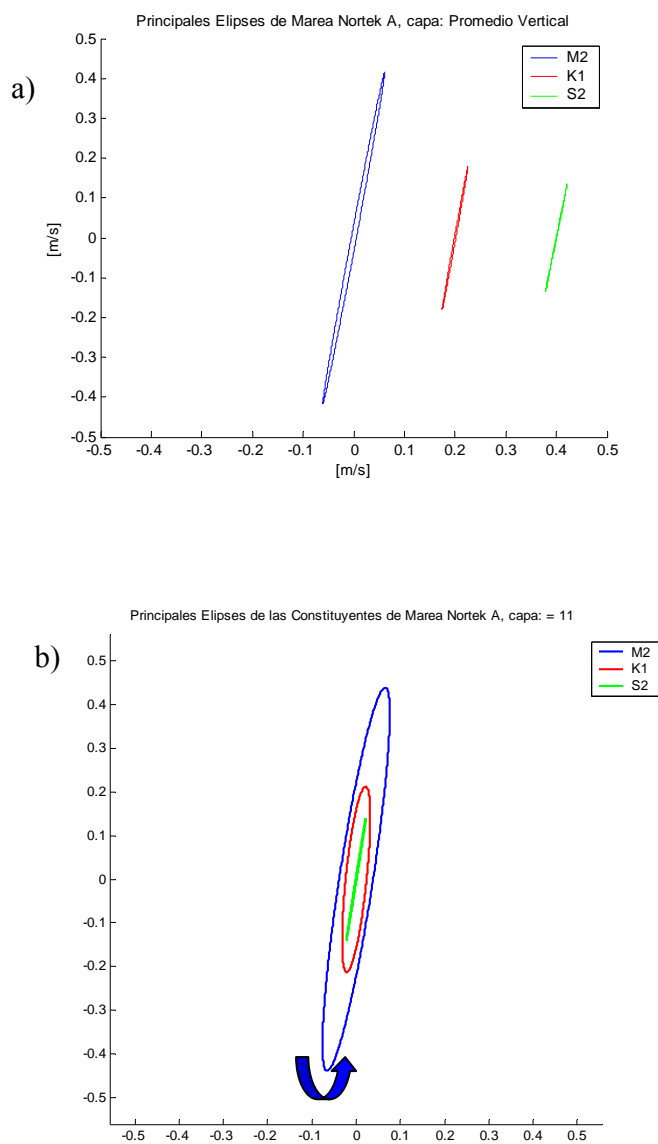


Figura 40.- a) Elipses de las principales constituyentes de marea del promedio vertical de las corrientes absolutas obtenidas en las estaciones *Nortek A*. b) Nivel superficial. Los ejes x y y están dados en [m/s]. La flecha indica el sentido de la rotación de la elipse.

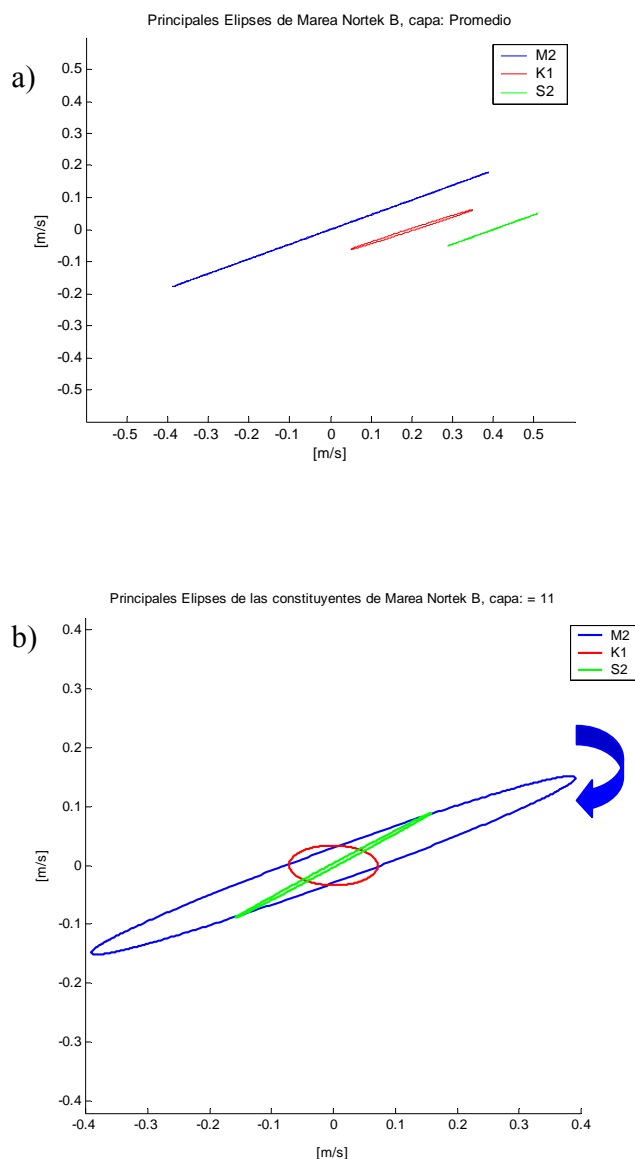


Figura 41.- a) Elipses de las principales constituyentes de marea del promedio vertical de las corrientes absolutas obtenidas en las estaciones *Nortek B*. b) Nivel superficial. Los ejes x y y están dados en [m/s]. La flecha indica el sentido de la rotación de la elipse.

Se aplicaron *FEOs* a las series de tiempo de los datos de corrientes obtenidos de las estaciones *NA* y *NB*, con el fin de identificar posibles estructuras que permitan entender la dinámica del interior de la bahía. A diferencia de lo observado en la boca donde el primer modo asociado con la corriente de marea explica el 99 % de la variabilidad, en el interior de la bahía apenas los tres primeros modos representan el 76.5 % y 85% de la variabilidad explicada de la

estación *NA* y *NB* respectivamente. El primer modo sólo explica el 50% de la variabilidad en ambos casos (Fig. 42 y 43). La variación espacial y temporal de ambas estaciones, muestra un comportamiento barotrópico que también sugiere estar relacionado con la señal de marea, y aunque esto indique que esta señal sea el principal forzamiento, la marea en el interior de la bahía no es tan determinante como sucede en la boca. Muy probablemente el viento sea la causa de esa disminución en la variabilidad explicada por la marea, respuesta que puede ser observada de manera más clara en el comportamiento de las corrientes residuales que serán explicadas en la siguiente sección. En ambos casos la dirección de los vectores graficados en las figuras 42b y 43b, denotan una aparente relación con el sentido del canal en donde se efectuó la medición.

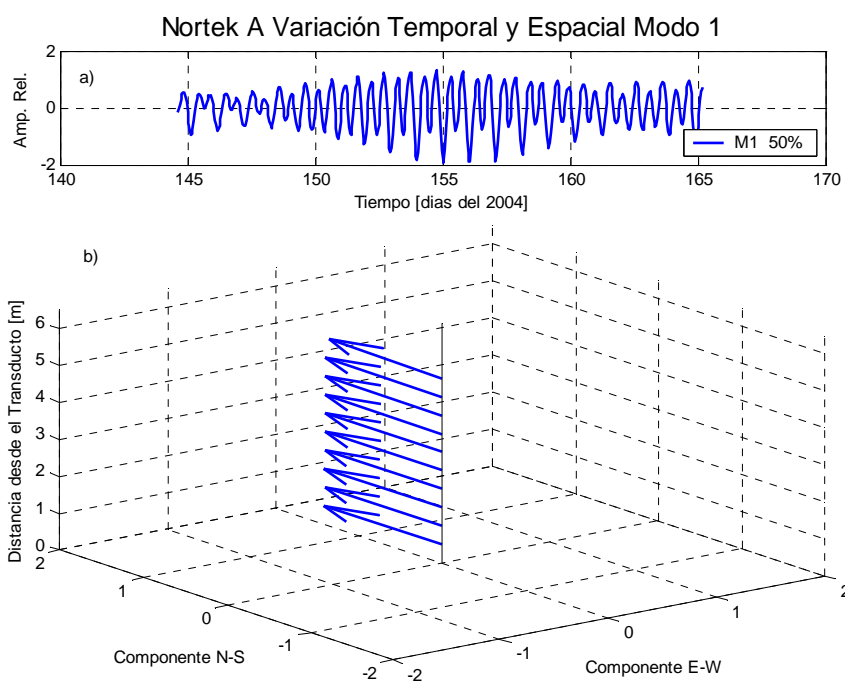


Figura 42. a) Variabilidad temporal y b) espacial arrojada del *primer modo* (M1) obtenido de las *FEOs* aplicadas a los datos de corrientes del anclaje *Nortek A*. La escala de las componentes vectoriales se indica en su correspondiente eje horizontal y con amplitud relativa.

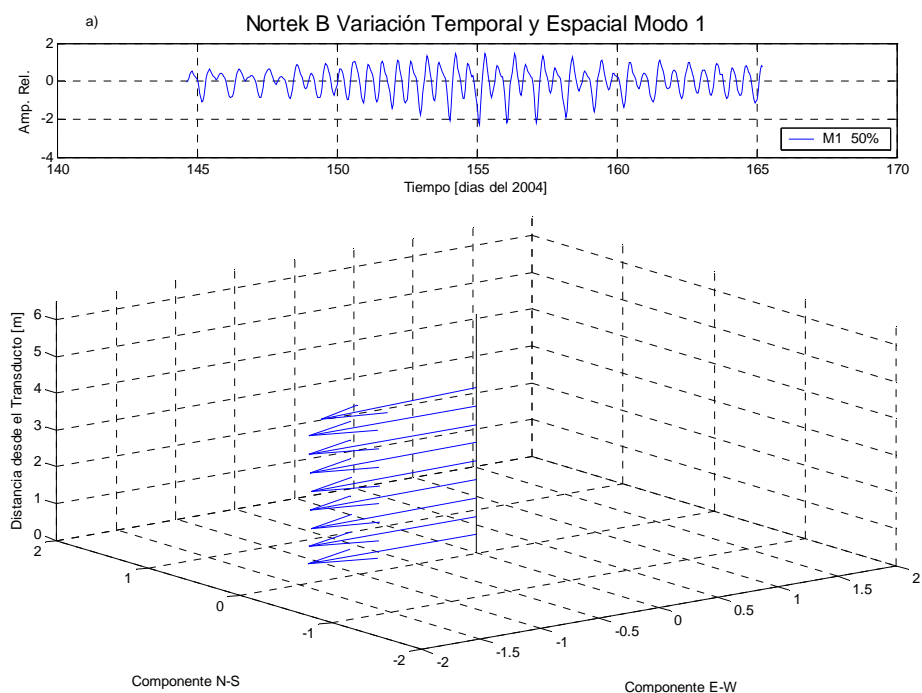


Figura 43. a) Variabilidad temporal y b) espacial arrojada del *primer modo* (M1) obtenido de las *FEOs* aplicadas a los datos de corrientes del anclaje *Nortek B*. La escala de las componentes vectoriales se indica en su correspondiente eje horizontal y con amplitud relativa.

III.3.2. Corrientes Residuales (bajas frecuencias) en el Interior de la Bahía.

Similar a la sección III.2.2., se obtuvieron las corrientes residuales (baja frecuencia) con la finalidad de poder observar estructuras en las series tiempo de corrientes, que permitan entender mejor los procesos físicos que se involucran en la dinámica de la bahía. Las figuras 44 y 45 correspondientes a las estaciones *NA* y *NB* respectivamente, muestran los contornos de velocidades de las corrientes residuales de cada una de las componentes de las series de tiempo. Las figuras 46 y 47 complementan la información de las dos figuras anteriores e indican el vector promedio de las velocidades residuales de cada uno de los niveles, en donde es posible apreciar su magnitud y dirección.

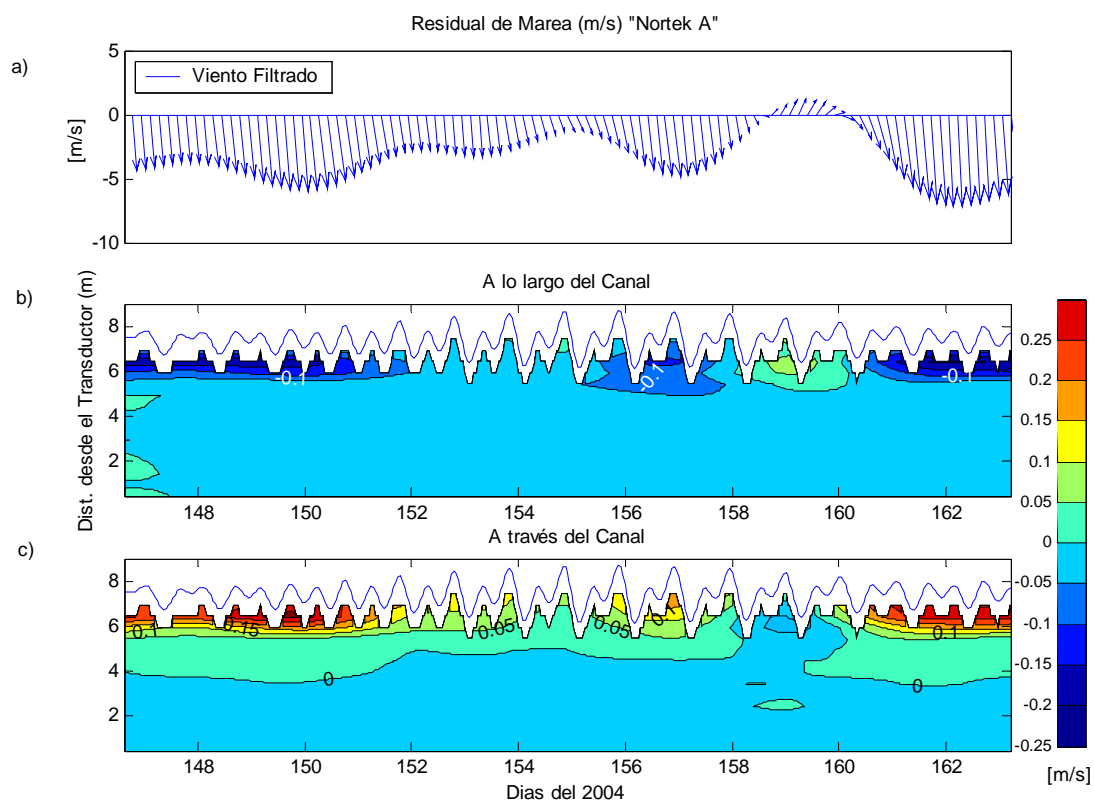


Figura 44. a) Diagrama de astillas de la serie de tiempo del viento filtrado mediante un filtro pasa baja. Cada vector representa un promedio de cada 4 horas de registro. b) contornos de de corrientes de baja frecuencia en la estación *NA* a lo largo del canal. c) Contornos a través del canal. La línea azul continua representa la superficie del agua medida por el sensor de presión. La escala vertical en colores indica magnitud de las componentes. Los valores positivos son hacia el norte y este y los negativos hacia el sur y oeste.

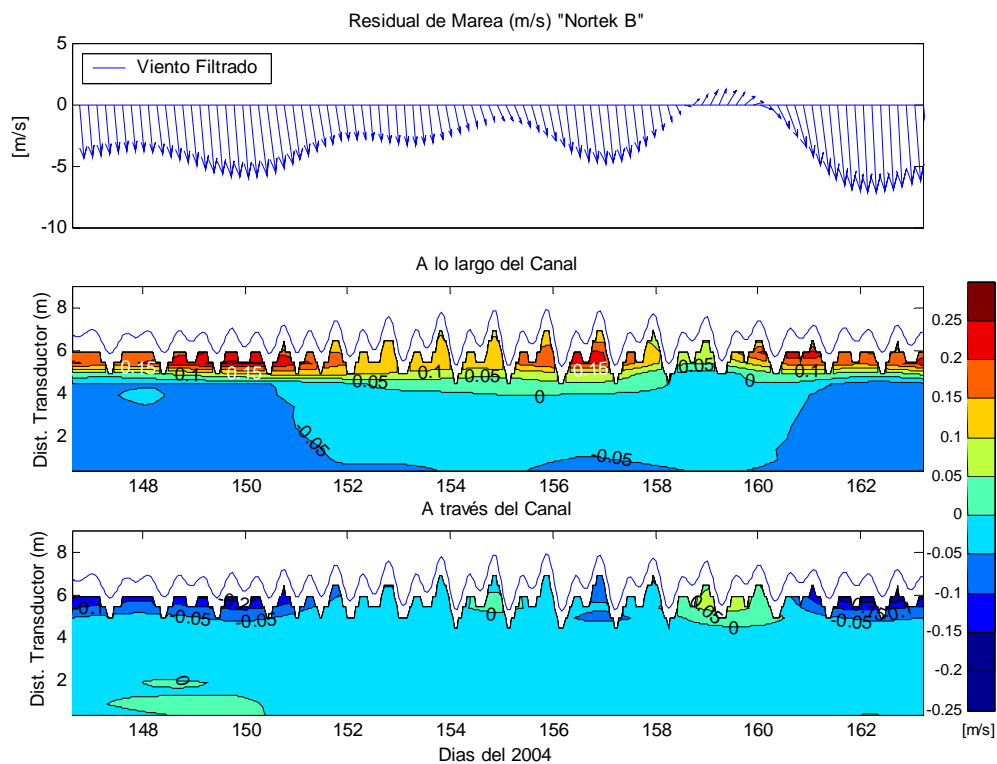


Figura 45.- a) Diagrama de astillas de la serie de tiempo del viento filtrado mediante un filtro pasa baja. Cada vector representa un promedio de cada 4 horas de registro. b) contornos de corrientes de baja frecuencia en la estación NB a lo largo del canal. c) Contornos a través del canal. La línea azul continua representa la superficie del agua medida por el sensor de presión. La escala vertical en colores indica magnitud de las componentes. Los valores positivos son hacia el norte y este y los negativos hacia el sur y oeste.

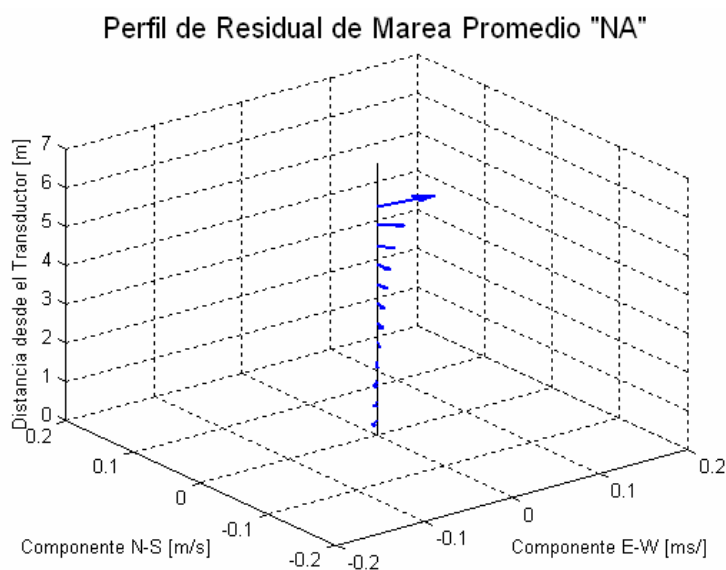


Figura 46.- Perfil de las corrientes residuales de marea promediadas en cada uno de los niveles medidos durante todo el periodo de muestreo en la estación *Nortek A*. La escala de las componentes vectoriales se indica en su correspondiente eje horizontal en [m/s].

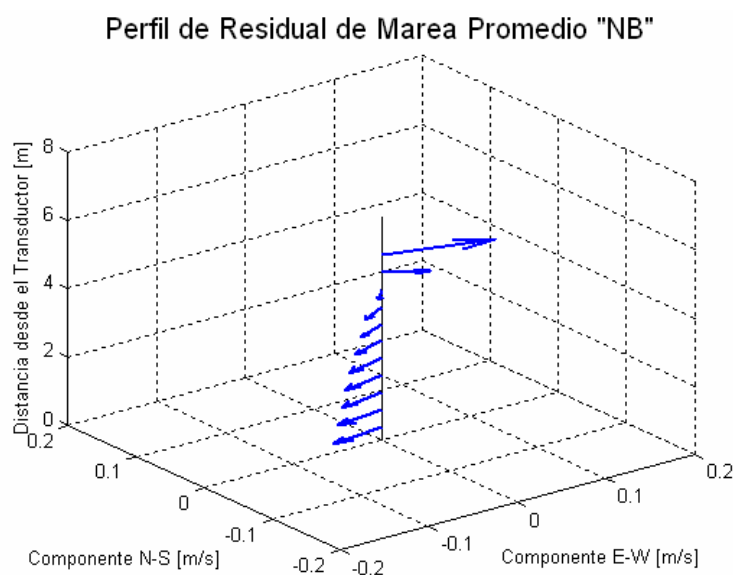


Figura 47.- Perfil de las corrientes residuales de marea promediadas en cada uno de los niveles medidos durante todo el periodo de muestreo en la estación *Nortek B*. La escala de las componentes vectoriales se indica en su correspondiente eje horizontal en [m/s].

Las corrientes residuales en la estación *NA* (Fig. 44), muestran estructuras en la superficie que sugieren estar relacionadas con la magnitud y dirección del viento, sobre todo durante mareas muertas; se aprecian núcleos de máxima intensidad (0.18 m/s) con dirección muy similar a la mostrada por el viento. Sin embargo los días 158-160 cuando se inicia la transición de mareas vivas a mareas muertas y la dirección del viento cambia, el sentido del flujo residual se invierte hacia una dirección *NE* con una corriente de 0.04 m/s. En los niveles subsuperficiales se presentan estructuras más estables y de menor intensidad (0.01 a 0.04 m/s) con dirección predominantemente hacia el *SE* y *SW* en el fondo (Fig. 46).

De manera similar, la estación *NB* (Fig. 45), muestra estructuras superficiales semejantes a las observadas en la estación *NA*, debido a que presentan núcleos de máxima corriente superficial (0.16-0.18 m/s) hacia *ENE*. Esto también ocurre durante los periodos de mayor intensidad del viento. A diferencia de la estación *NA*, el flujo residual presente durante las mareas vivas tiende a disminuir de 0.13 a .04 m/s. En los niveles inferiores las intensidades de la corriente residual son muy pequeñas (del orden de 0.02-0.09 m/s) con dirección hacia el *SSW* durante mareas vivas y *SW* en mareas muertas.

La disminución de las velocidades residuales de superficie y el fondo en la estación *NB* durante mareas vivas puede ser explicada debido a la gran influencia que ejerce el viento sobre las corrientes residuales en esta estación de registro, ya que al disminuir la intensidad de la magnitud del viento coincidentemente durante mareas vivas, también disminuye las intensidades de la corriente sobre todo en superficie. De los niveles subsuperficiales hasta el fondo parece indicar que el flujo residual es compensado como consecuencia del agua desplazada en superficie pero en sentido contrario. En la componente a lo largo del canal, se observa un pequeño incremento en el flujo residual en superficie y en el fondo cercano al día 157 (Fig. 45), probablemente debido a la relativa intensificación del viento durante ese día.

En las figuras 48 y 49 se observan la estrecha correlación vectorial que existe entre el viento y las corrientes residuales de las estaciones *NA* y *NB* en cada uno de los diferentes niveles de profundidad. En ambas estaciones la correlación entre viento y corriente en los primeros niveles es alta y directamente proporcional a la dirección del viento. Conforme la profundidad aumenta el ángulo entre la serie del viento y las corrientes cambia cerca de 180°, y las amplitudes de correlación entre estas variables van de 0.88 en superficie hasta -0.75 en el fondo en la estación *NA* (Fig. 48c) y de 0.74 en superficie hasta -0.85 en el fondo de *NB* (Fig. 49c). Esto representa una clara evidencia de la importancia del viento en la dinámica de las corrientes residuales en el interior de la bahía.

Lo anterior sugiere que aunque la marea sea un forzamiento muy importante en el patrón de circulación de las estaciones *NA* y *NB*, el forzamiento debido al viento determina la dirección y sentido del flujo residual en las capas superficiales, mientras que a media agua y en el fondo responde a un balance de masas que restablece el agua desplazada en la superficie, lo que provoca que la corriente en los niveles más profundos sea redireccionada en el sentido del canal correspondiente (Fig. 46 y 47), es decir de manera directa ó indirecta el viento actúa en toda la columna de agua.

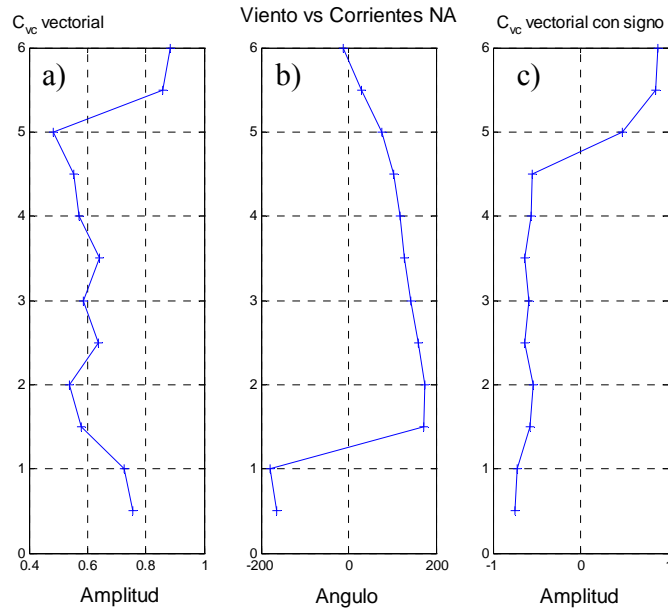


Figura 48.- a) Correlación vectorial entre el viento y la corriente residual *NA* en los diferentes niveles muestreados. b) Angulo de correlación entre el viento y la corriente, valores positivos indican que la primera serie (corrientes) es rotada en contra de las manecillas del reloj con respecto de la serie dos (viento). c) similar al inciso a), pero con signo (signo negativo indica correlación inversa).

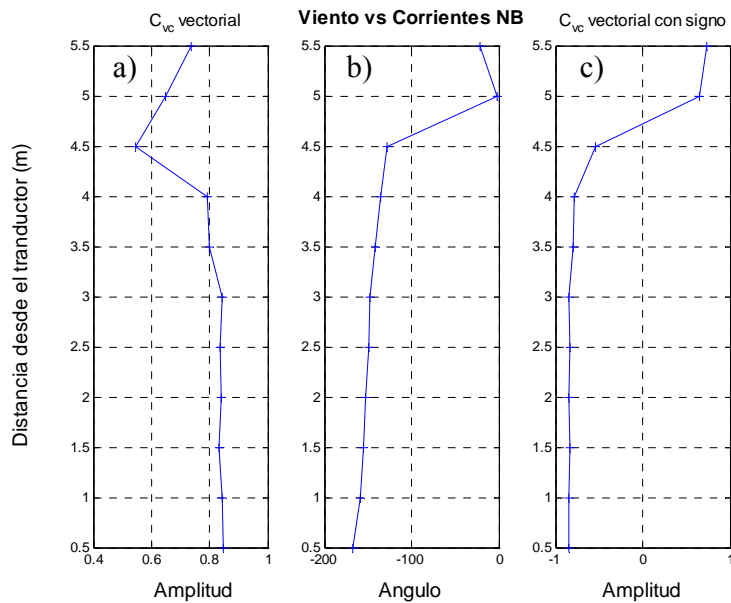


Figura 49.- a) Correlación vectorial entre el viento y la corriente residual *NB* en los diferentes niveles muestreados. b) Angulo de correlación entre el viento y la corriente, valores positivos indican que la primera serie (corrientes) es rotada en contra de las manecillas del reloj con respecto de la serie dos (viento). c) similar al inciso a), pero con signo (signo negativo indica correlación inversa).

Con la finalidad de profundizar acerca de que otros forzamientos intervienen además de la marea y del viento en la dinámica del interior de la bahía, así como el ponderar el grado de importancia de cada uno de ellos, se aplicaron *FEOs* a las series de corrientes filtradas (baja frecuencia) de las estaciones *NA* y *NB*, se efectuaron también correlaciones cruzadas entre las corrientes residuales y las series filtradas de los gradientes de temperatura, gradientes de presión y el viento.

De los resultados obtenidos con *FEOs*, en la estación *NA* y *NB* los dos primeros modos son suficientes para explicar el 85 y 87 % de la varianza total, respectivamente (Fig. 50 y 51). El primer modo de la variación temporal en ambas estaciones (Fig. 50a y 51a), presenta estructuras cuyas modulaciones coinciden en el tiempo, aunque sus amplitudes relativas difieren un poco. Estas modulaciones sugieren estar relacionadas con las variaciones de los gradientes de temperatura ($\partial T / \partial y$), que son modificados durante el periodo de mareas vivas y muertas (Fig. 52b) y con el incremento y disminución de la magnitud del viento durante las mediciones (Fig. 52c). Como se mencionó en la sección *III.1.4.3.*, las temperaturas por sí solas no generan circulación, pero sí producen cambios de densidad las cuales a su vez pueden producir cambios de presión que intervienen en el movimiento del agua de un cuerpo costero. Por lo tanto, los gradientes horizontales de temperatura ejercen de manera indirecta influencia en la circulación horizontal de la bahía. Las tablas VIII y IX indican un alto coeficiente de correlación entre el primer modo temporal de las corrientes residuales de las estaciones *NA* y *NB* con las componentes del viento y los gradientes de temperatura longitudinales ($\partial T / \partial y$).

La variación espacial del primer modo en ambas estaciones (*NA* y *NB*) se muestra en las figuras 50c y 51c. Estas distribuciones reflejan una aparente relación entre el comportamiento del

viento y las corrientes en toda la columna de agua, aunque en el sentido de rotación de los vectores es inverso.

La varianza explicada por el segundo modo temporal y espacial de la estación *NA*, representa el 20 % de la variabilidad total de las corrientes residuales (Fig. 50b-d). Las correlaciones cruzadas realizadas entre los principales modos ortogonales de las corrientes residuales de esta estación y las diferentes variables (Tabla VIII) durante el periodo de muestreo parece indicar que, el segundo modo presenta relativa correlación con las componentes zonal (W_x) y meridional (W_y) del viento, lo que sugiere que este forzamiento también modula el segundo modo de variabilidad (Fig. 53).

El segundo modo temporal de la corrientes residuales de la estación *NB* (Fig. 51b) presenta similitud con la variación temporal del primer modo (Fig. 51a), aunque las amplitudes varían significativamente. La variación espacial del segundo modo de *NB* muestra un comportamiento casi en el mismo sentido en toda la columna de agua. La tabla IX muestra el coeficiente de correlación entre el segundo modo temporal de las corrientes residuales en esta estación y el gradiente de presión a lo ancho del canal ($\partial P/\partial x$). Estos resultados sugieren que el forzamiento ocasionado por el gradiente de presión modula este segundo modo (Fig. 55).

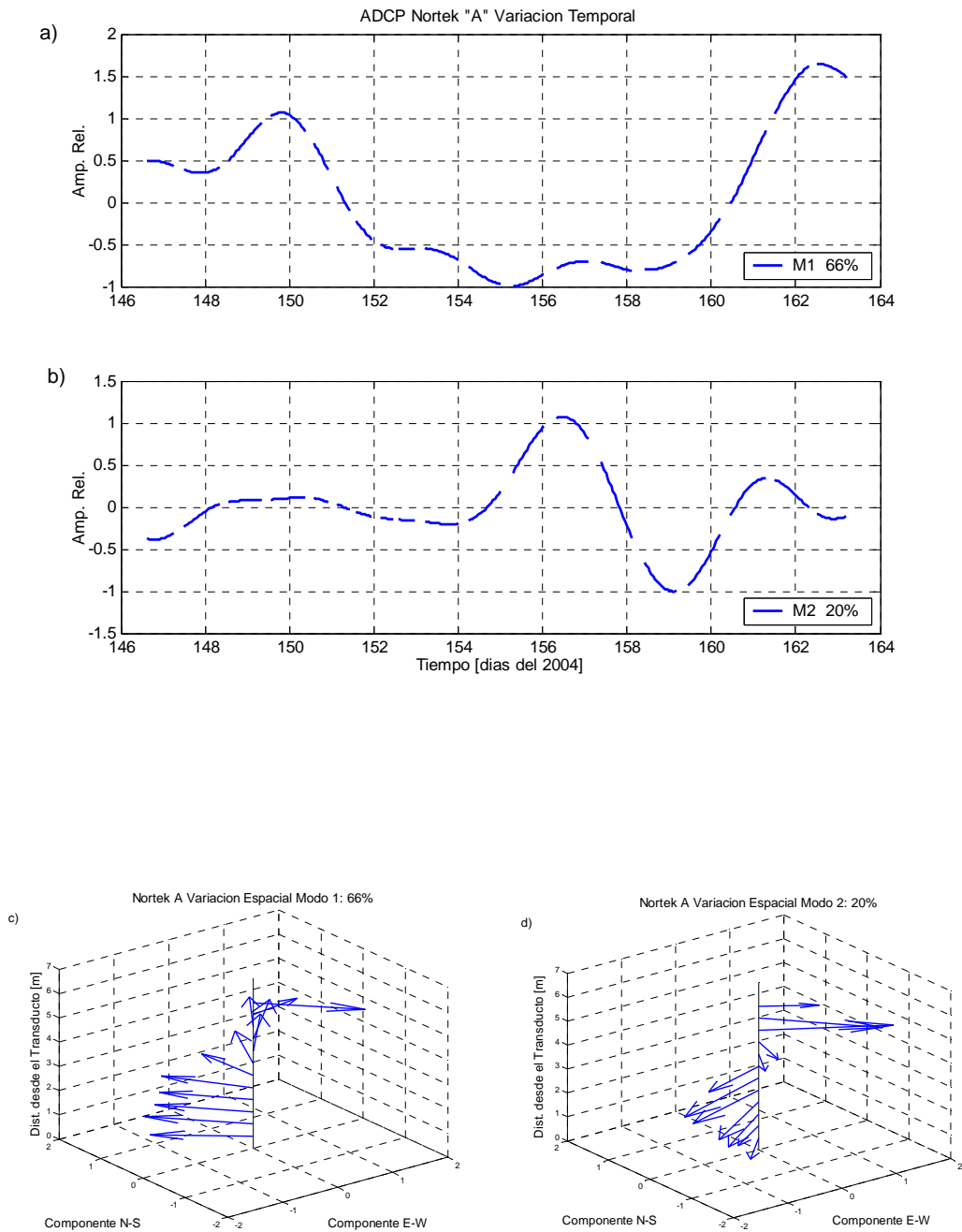


Figura 50. a-b) Variación temporal de la amplitud relativa de los dos primeros modos ortogonales aplicados a las series de tiempo de las corrientes residuales obtenidas en la estación NA. c-d) Variación espacial los dos primeros modos ortogonales. La escala de las componentes vectoriales se indica en su correspondiente eje horizontal con magnitud relativa.

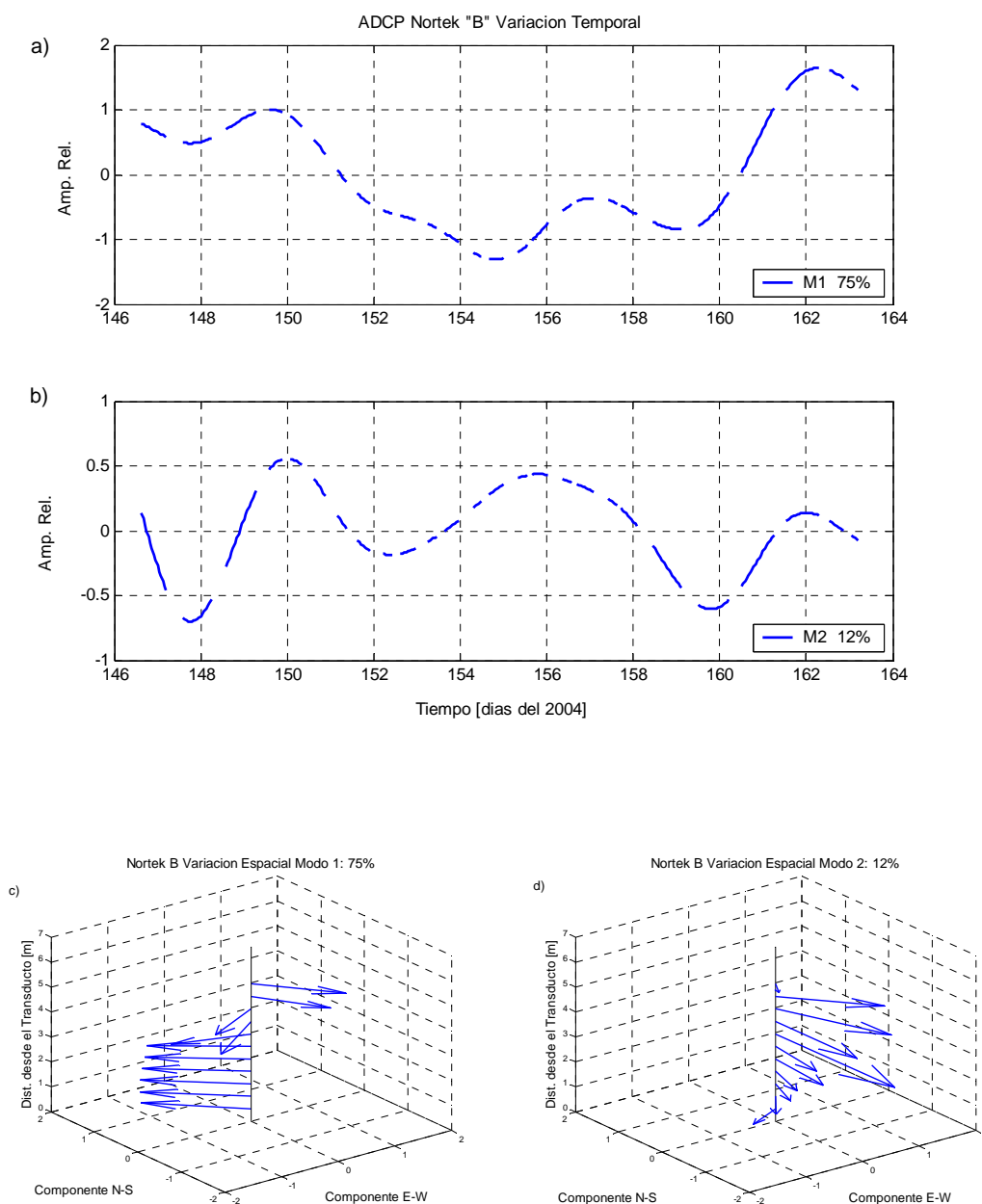


Figura 51. a-b) Variación temporal de la amplitud relativa de los dos primeros modos ortogonales aplicados a las series de tiempo de las corrientes residuales obtenidas en la estación NB. c-d) Variación espacial los dos primeros modos ortogonales. La escala de las componentes vectoriales se indica en su correspondiente eje horizontal con magnitud relativa.

Tabla VIII.- Correlaciones entre principales modos obtenidos mediante la aplicación de *funciones empíricas ortogonales FEOs* a los datos de corrientes residuales "Nortek A" vs Gradientes de Temperaturas ($\partial T/\partial x$, $\partial T/\partial y$), componentes zonal y meridional del viento (W_x y W_y) y gradientes de presión ($\partial P/\partial x$, $\partial P/\partial y$).

PRINC. MODOS	$\frac{\partial T}{\partial x}$	$\frac{\partial T}{\partial y}$	W_x	W_y	$\frac{\partial P}{\partial x}$	$\frac{\partial P}{\partial y}$
Modo 1	0.604	-0.882	0.815	-0.773	0.505	-0.512
Modo 2	0.113	0.196	0.538	-0.517	0.391	-0.127
Modo 3	0.003	0.292	0.120	-0.249	0.130	-0.103

Tabla IX.- Correlaciones entre principales modos obtenidos mediante la aplicación de *funciones empíricas ortogonales FEOs* a los datos de corrientes residuales "Nortek B" Vs Gradientes de Temperaturas ($\partial T/\partial x$, $\partial T/\partial y$), componentes zonal y meridional del viento (W_x y W_y) y gradientes de presión ($\partial P/\partial x$, $\partial P/\partial y$).

PRINC. MODOS	$\frac{\partial T}{\partial x}$	$\frac{\partial T}{\partial y}$	W_x	W_y	$\frac{\partial P}{\partial x}$	$\frac{\partial P}{\partial y}$
Modo 1	0.634	-0.893	0.843	-0.808	-0.468	-0.478
Modo 2	-0.055	0.297	0.382	-0.387	-0.505	0.182
Modo 3	-0.066	-0.040	-0.042	0.086	-0.386	-0.164

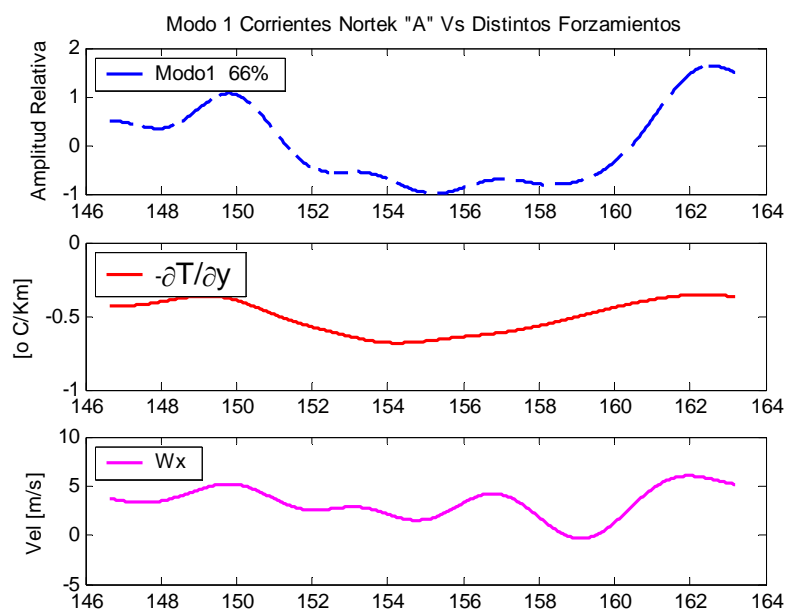


Figura 52. a) Variación Temporal del Modo 1 de la corrientes residuales de la estación NA. b) Comportamiento del gradiente de temperatura a lo largo de Bahía San Quintín $-(\partial T/\partial y)$. c) Componente zonal del viento filtrado (W_x).

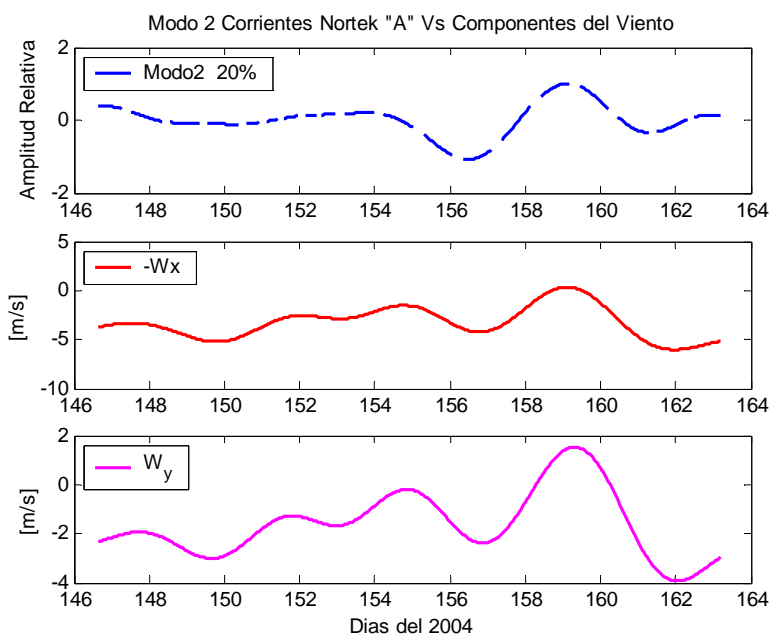


Figura 53. a) Variación Temporal del Modo 2 de las corrientes residuales de la estación *NA*. b) Componente zonal del viento filtrado (W_x). c) Componente meridional del viento filtrado (W_y).

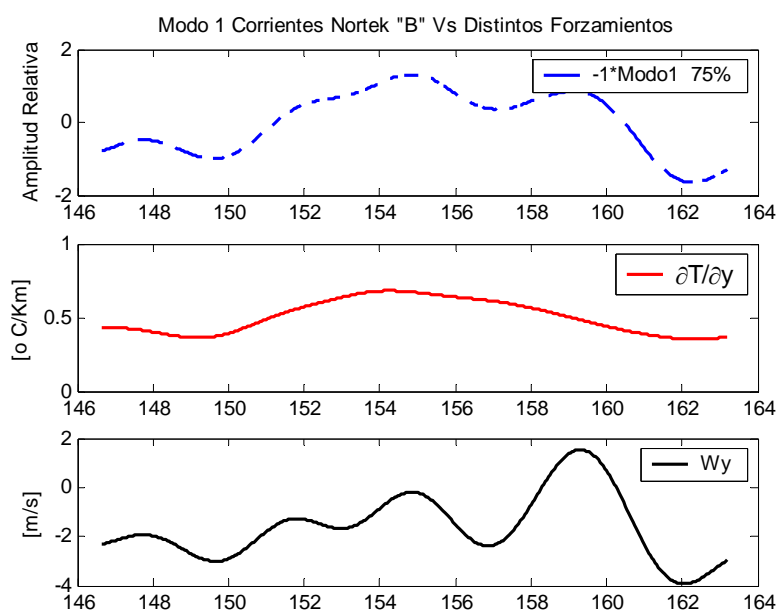


Figura 54. a) Variación Temporal del Modo 1 de la corrientes residuales de la estación *NB* (multiplicado por -1 a fin de facilitar la comparación visual). b) Comportamiento del gradiente de temperatura a lo largo de Bahía San Quintín ($\partial T/\partial y$). c) Componente zonal del viento filtrado (W_x).

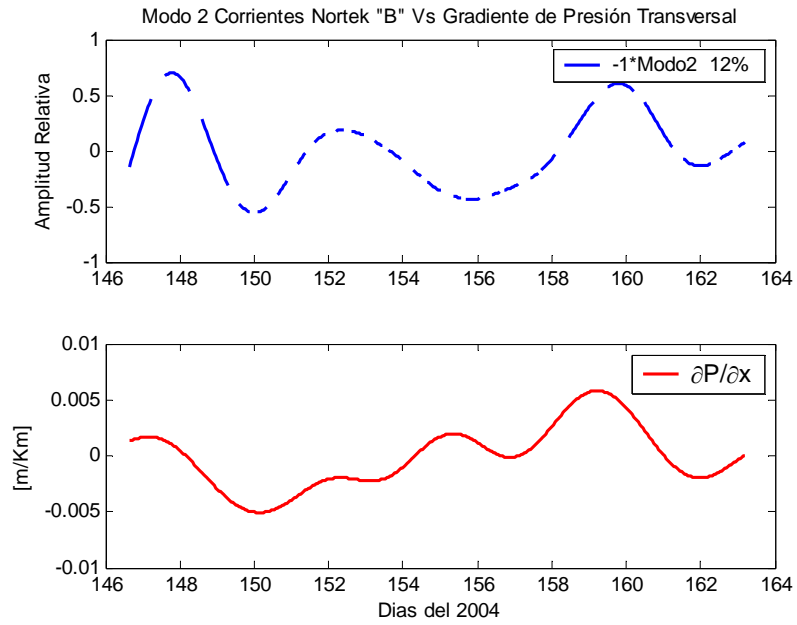


Figura 55. a) Variación Temporal del Modo 2 de las corrientes residuales de la estación NB. b) Gradiente de presión a lo ancho del canal ($\partial P/\partial x$).

IV. DISCUSIONES

La dinámica de corrientes en Bahía San Quintín ha sido estudiada con mediciones de alta resolución temporal en varios puntos dentro del cuerpo costero. En los capítulos anteriores, los resultados presentados han mostrado la hidrodinámica interna en términos de los diferentes mecanismos físicos asociados.

En la boca se mostró que las *corrientes totales* se encuentran estrechamente relacionadas con la señal de marea la cual tiene un régimen mixto semidiurno. Las velocidades máximas alcanzaron intensidades de poco más de 1 m/s con dirección *NNW-SSE* en los niveles superficiales. Las *corrientes totales* en esta misma área reflejan una estructura barotrópica debida a la marea. En general se observó un flujo residual que entra a *BSQ* con velocidades menores a 0.1 m/s con dirección *NNW* desde la superficie hasta media agua, mientras que en el fondo se desvía ligeramente hacia el *NNE*.

En el interior de la bahía las *corrientes totales* observadas presentaron velocidades máximas en superficie con intensidades mayores de 1 m/s y dirección *ESE (NA)* y *ENE-ESE (NB)*. Las *corrientes residuales* mostraron una circulación barotrópica de dos capas inducida principalmente por la marea y el viento. En la estación *NA* las *corrientes residuales* presentaron velocidades máximas de 0.18 m/s con dirección hacia el *ENE* en la superficie, y de ~ 0.02 m/s con dirección hacia *SW* cerca del fondo. La estación *NB* registró corrientes residuales superficiales máximas de 0.18 m/s hacia el *ENE* y en el fondo de 0.09 m/s con dirección *SSW*.

La distribución de temperaturas revelan una estrecha relación con la circulación residual presente en la bahía, dilucidando un flujo que entra a la misma por la boca con temperaturas bajas de 14.7 °C en promedio por el canal oeste (más profundo) y sale de ésta con temperaturas más altas de 17.6 °C en promedio por el extremo este (zona más somera), producto del calentamiento que ocurre en el interior de la bahía ocasionado por la radiación solar.

La distribución de los gradientes de presión y la alta correlación con el viento (máxima correlación con un desfase de ~26 hrs.), sugieren la influencia del viento sobre las capas superficiales del agua al interior de *BSQ*, dando lugar a un apilamiento de éstas al sur de la bahía que es capaz de originar corrientes débiles en el fondo con dirección contraria hacia el interior de la misma.

La resolución espacial y temporal en las mediciones efectuadas en este trabajo permite dilucidar otros procesos físicos que contribuyen al avance del entendimiento de la dinámica del interior de la bahía. En este contexto se discuten los resultados a continuación.

IV.1. Influencia de la Marea sobre las Corrientes.

El movimiento dominante en la mayoría de los mares costeros alrededor del mundo es un flujo oscilatorio inducido por las mareas de las cuencas oceánicas adyacentes (Robinson, 1983). En un cuerpo costero en donde no existen aportes

permanentes de agua dulce, la marea, el viento y los gradientes de densidad generados por el calentamiento del agua debido a la radiación solar, generalmente son los forzamientos más importantes en la generación de movimiento, Bahía de San Quintín no es la excepción. De acuerdo con los datos de corrientes analizados de la estación RDI-Boca, los resultados permitieron confirmar que las *corrientes* en la boca de la bahía son dominadas por las mareas mixtas semidiurnas. Las mareas explican el 99% de la variabilidad presente en esta estación de muestreo, con una respuesta barotrópica en la columna de agua. Estos resultados resaltan la importancia de la marea en la circulación a través de la boca, lo cual concuerda con estudios previos [Monreal (1980) y Martori (1989)]. En el interior de la bahía, el efecto del forzamiento ocasionado por la marea explica el 50% de la variabilidad de las corrientes totales. Esta diferencia se atribuye a otros factores físicos que intervienen en el balance dinámico al interior de este cuerpo costero, como son: el viento y los gradientes longitudinales de temperatura y gradientes de presión, mismos que fueron ponderados mediante la aplicación de correlaciones entre la variación temporal de las corrientes residuales con las series de los principales forzamientos.

El análisis espectral y armónico efectuado a las corrientes medidas en *BSQ*, mostraron un alto contenido de energía en las bandas diurna y semidiurna atribuidas a la señal de marea, con predominancia de los constituyentes armónicos M_2 , K_1 , S_2 y O_1 . La generación de subarmónicos en las corrientes como M_4 y M_6 en la boca y en el interior de la bahía (Fig. 23 y 38), resulta ser una clara evidencia del efecto de rectificación de marea que ocurre en este cuerpo costero, dado a que existe transferencia de energía de las

frecuencias dominantes (ejem. M_2) hacia constituyentes de más altas frecuencia (M_4 y M_6). Esto se debe al efecto de la fricción que ocurre en el fondo, debido a la reducida profundidad de la bahía. Resultados similares han sido reportados previamente en *BSQ* [c.f. Ocampo (1980); Del Valle y Cabrera (1981)].

IV.2. Circulación Residual.

IV.2.1. Circulación Barotrópica en la Boca de la Bahía y Efectos de la Amplitud de la Marea en el flujo residual.

El conocimiento y el entendimiento de la dinámica de la marea no son suficientes para determinar el transporte de propiedades asociadas con el agua, tales como calor, sales disueltas, contaminantes, materiales suspendidos, etc. La distribución promedio de estas propiedades, está fuertemente influenciada por el flujo oscilatorio de la marea, actuando para dispersar su concentración mediante procesos de difusión mareal y su transporte promedio de marea es controlado por el flujo residual (Robinson, 1983). De ahí la importancia de determinar el flujo residual, también conocido como submareal o de baja frecuencia, en virtud de que permite conocer el transporte neto de propiedades hacia dentro o fuera del cuerpo costero. Mientras que el bombeo de marea permite el intercambio horizontal de estas propiedades. Las bases del bombeo de marea es la amplificación de la corriente de marea y asocia la turbulencia a través de los efectos topográficos (Tomczak, 1998).

Las corrientes residuales medidas en la boca de BSQ muestran en toda la columna de agua un flujo barotrópico que se dirige hacia el interior de la bahía, más intenso y homogéneo durante el periodo de mareas vivas (Fig. 28). Durante mareas muertas se observó una estratificación débil en las corrientes, con velocidades mínimas en la superficie, probablemente en respuesta a que los efectos de fricción se ven reducidos durante esta etapa de la marea, lo cual permite la estratificación; y a la pequeña influencia del esfuerzo del viento en las capas superficiales en este sitio de muestreo, que se opone a la dirección del flujo residual, que se manifiesta en la disminución de la intensidad de la corriente en los primeros niveles.

La interacción topográfica con el flujo es capaz de producir fuerte mezcla dentro del ciclo de marea (Dyer, 1988). Lo anterior fue observado en *BSQ* durante mareas vivas al presentarse velocidades homogéneas más intensas en toda la columna de agua (Fig. 28), estas características homogéneas son atribuidas a la turbulencia generada por la fricción con el fondo y las paredes laterales. Linden y Simpson (1988), sugieren una modulación mareas vivas - mareas muertas de la corriente submareal debido a la variación de la fuerza de la turbulencia, surgida de la mezcla por marea. El análisis de los registros en este trabajo sugiere que las *corrientes residuales* obtenidas en la boca (fig. 28) son inducidas por la marea y la modulación observada en este sitio durante los periodos de mareas vivas y muertas, es producto de las interacciones no lineales de la corriente de marea. como es la advección y la fricción (Rady *et al.*, 1998), esta segunda es capaz de generar variación temporal de la turbulencia vertical (Linden y Simpson, 1988), que permite la homogenización de la corriente en toda la columna de agua.

Los efectos de las variaciones quincenales de la amplitud de la marea en el flujo residual de la boca, se observan en la diferencia de velocidades registradas durante mareas vivas-muertas. En mareas vivas se registraron velocidades de hasta 0.1 m/s, mientras que durante mareas muertas de 0.07 m/s. Los resultados sugieren que el mecanismo dominante en el incremento del flujo neto de entrada (Fig. 28) durante mareas vivas, es producto de las interacciones no lineales provocadas por forzamiento barotrópico de la marea y la turbulencia que ocurre durante este periodo debido a que los efectos de fricción homogeniza las velocidades de las corrientes en toda la columna de agua, esta turbulencia es generada por el estrés del fondo y de las paredes laterales, lo cual ocasiona una fuerte mezcla; mientras que durante mareas muertas existe una relajación de los procesos turbulentos que favorece a una ligera estratificación de las corrientes en la superficie. Algunos autores como Li y O'Donnell (1997) y Li *et al.* (1998) han demostrado que el flujo medio inducido por la marea dentro de un estuario incrementa con la amplitud de marea en la boca (Ver fig. 1). Li *et al.* (*op cit.*) consideran que la componente barotrópica de la corriente residual es proporcional a la amplitud de la marea.

IV.2.2. Efecto del Viento y gradientes de densidad en el interior de la Bahía.

En el interior de la bahía se observó una circulación residual principalmente inducida por el viento, la cual puede ser corroborada con la alta correlación vectorial (~ 0.8 superficie y ~ 0.8 fondo) que existe entre el viento y las corrientes residuales las

estaciones *NA* y *NB* (Fig. 48 y 49). Existe una correlación directa en los niveles superficiales, es decir la velocidad de la corriente aumenta al aumentar la velocidad del viento. Cerca del fondo esta correlación se comporta de manera inversa debido a que la correlación es negativa y con una dirección casi opuesta ($\sim 180^\circ$). Lo anterior ocasiona una circulación en dos capas, similar a lo reportado por Rady *et al.* (1998) en el Golfo de Suez, Egipto y Valle Levison *et al.* (2004) en Bahía Concepción, Chile. En ambos casos se observaron una circulación de dos capas debido a los gradientes de presión producto del apilamiento de agua en superficie provocado por la influencia del viento sobre esta capa; mientras que en el fondo induce flujos compensatorios en sentido contrario para mantener el balance de masas.

El papel que juega el esfuerzo del viento en la circulación del interior de la *BSQ* es mucho más importante comparado con su débil contribución en la boca. Si bien anteriormente se mencionó que la marea explica un 50 % de la variabilidad de las *corrientes totales* en el interior de la bahía, el análisis de las corrientes sugieren que la marea y el viento es el principal forzamiento en las *corrientes residuales*, ocasionado en general una circulación barotrópica en ambas estaciones. Las *corrientes residuales* observan un cizallamiento forzado por la fricción del viento sobre la columna de agua, lo que conduce a flujos residuales en superficie casi en la misma dirección a este forzamiento, lo cual ocasiona apilamiento del agua en la parte sur de la bahía y de manera indirecta y en sentido contrario en los niveles más profundos al inducir flujos compensatorios de fondo (figura 48, 49 y 56). Un desplazamiento de agua superficial genera apilamiento en aguas someras provocando gradientes de presión horizontal

(Figura 6b-d) que por conservación de masa redirecciona las corrientes del fondo con velocidades débiles (Figura 45 y 46).

En la estación *NB* durante mareas muertas cuando los efectos de la fricción son menos importantes y generan menor turbulencia, los resultados sugieren una estratificación de dos capas con posible circulación baroclínica en el interior de la bahía durante esta etapa de la marea, muy probablemente debida a los gradientes de densidad longitudinal que pueden existir en la bahía producto de los gradientes de temperatura.

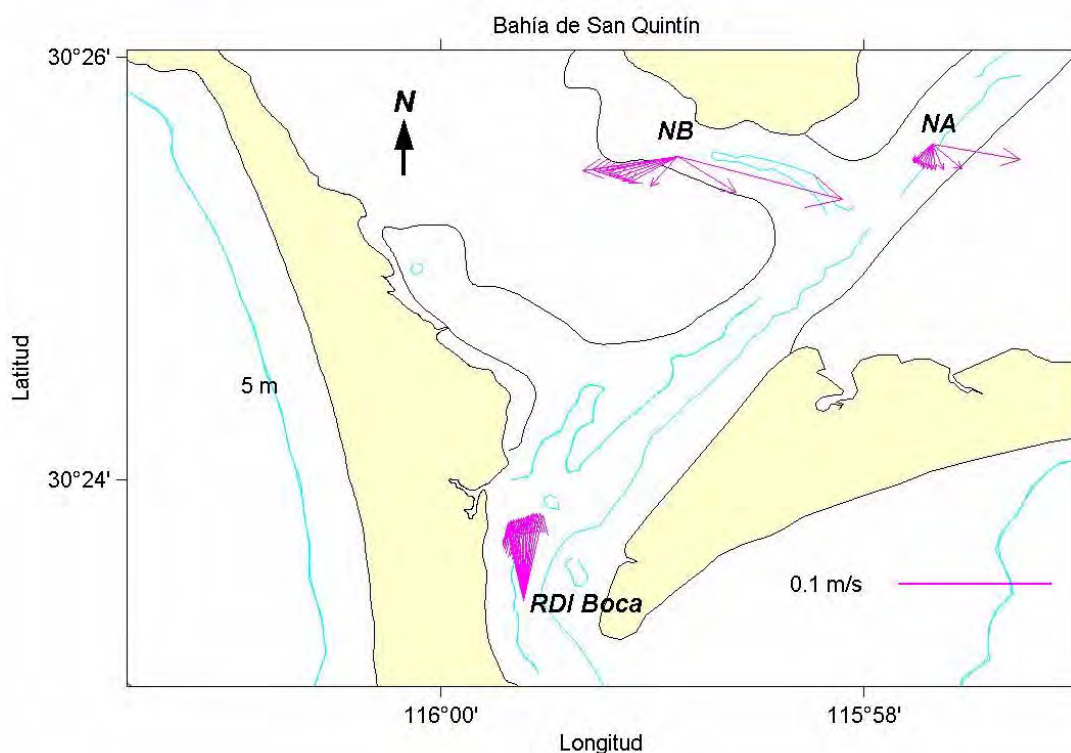


Figura 56. Vectores de las corrientes residuales en la boca e interior de Bahía de San Quintín, B. C.

En estudios prospectivos realizados en diferentes puntos de la bahía durante mareas vivas y muertas, se observó que las características termohalinas de la columna de agua se comportaron de manera homogénea. Fue esta la razón por la que sólo se midieron

las características térmicas de un punto de la columna de agua durante el período de muestreo que se analiza en este estudio. Sin embargo el análisis de los gradientes de temperaturas muestra que existe estratificación longitudinal entre la boca del sistema y las cabezas de ambos brazos, BF y BSQ (Figura 21a-b), que permiten inferir la existencia de gradientes longitudinales de densidad.

Los gradientes longitudinales de densidad pueden implicar circulación por gravedad durante mareas muertas, y pueden explicar también la circulación de las corrientes residuales. Linden y Simpson (1988), efectuaron experimentos en laboratorio en donde observaron que a niveles bajos de turbulencia la circulación baroclínica se acelera y la columna de agua tiende a estratificarse. Ribeiro *et al.* (2004) observaron en un estuario parcialmente mezclado (Southampton, Inglaterra), donde el mecanismo dominante para la generación de circulación en eventos de mareas vivas y mareas muertas fue el forzamiento baroclínico asociado al gradiente horizontal de densidad. Lo anterior puede explicar el porque las corrientes residuales obtenidas en la estación NB (fig. 45) en los niveles de media agua y fondo, son relativamente más fuertes durante mareas muertas que durante mareas vivas, lo cual sugiere la posibilidad de que exista un flujo con comportamiento baroclínico durante los períodos mareas muertas, en virtud de que las condiciones no se favorece la mezcla vertical (menor fricción), aunado a la relativa intensificación del viento durante este periodo de muestreo, que forzó a las corrientes en el interior de la bahía de manera directa (superficie) e indirecta (fondo). Sin embargo, es necesario aclarar que se requiere de observaciones de las características

termohalinas de la columna de agua a lo largo de toda la laguna, durante ambos períodos de marea y bajo diferentes condiciones de viento para corroborar estas inferencias.

IV.2.3. Efecto de la Batimetría y de la longitud del canal en el Intercambio Océano-Bahía.

La batimetría juega un papel muy importante en la dinámica de una laguna, sobre todo en la estructura transversal de flujos de intercambio en la boca de conexión con el mar adyacente y puede determinar la dirección de entrada y salida de los flujos de agua. Kasai *et al.* (2000) y Valle-Levison *et al.* (2003) demostraron que el patrón de flujos de un estuario está fuertemente ligado al número de Ekman vertical (E), que caracteriza la competencia entre la fricción y la rotación de la tierra. Estos autores mencionan que con un número de Ekman grande ($E > 1$), el flujo de entrada neta tiende a ser concentrados en la zona más profunda del canal, mientras que los flujos que salen se presentan en las zonas más someras.

De acuerdo lo observado en *BSQ*, se puede concluir que la competencia entre los efectos de fricción y de la rotación de la tierra, el primero de ellos predomina en la dinámica de la boca, al dar como resultado un aparente número de Ekman grande, dado que se existe un flujo residual que entra a la bahía por el canal situado en el extremo oeste de la boca (zona más profunda) a través de toda la columna de agua, y se sugiere que existe un flujo residual que sale de la bahía por el extremo este de la misma (zona más somera). Esta última aseveración se propone en base a las observaciones y análisis de los

resultados de los gradientes de temperatura obtenidos a lo ancho de la entrada a la bahía, los cuales muestran valores mas altos en el extremo este, es decir el flujo de agua que sale de la bahía tiene temperaturas más altas en relación al canal, debido al calentamiento del agua que ocurre en el interior de la bahía, sobre todo en las cabezas de *BF* y *BSQ* producto de la radiación solar y que tiende a salir de la laguna por las partes más someras, como una respuesta a la conservación de masas del cuerpo costero.

El cálculo del parámetro δ propuesto por Li y O'Donnell (2005) permitió en este estudio corroborar la hipótesis referente a la salida del agua por la zonas más somera, en virtud de que el resultado arroja la clasificación del canal principal de *BSQ*, como un canal corto por lo tanto tiene un transporte que entra por las zonas más profundas y sale por las más someras.

IV.3. Efecto de las Surgencias del Mar Adyacente en la Boca de la Bahía.

El transporte de nutrientes en las lagunas costeras puede ser forzado por el acoplamiento de surgencia costera y del bombeo de marea de las aguas superficiales en el sistema lagunar (Figura 57) El bombeo de marea es un importante contribuidor al intercambio horizontal. Con base en observaciones de temperatura y nutrientes, varios autores (Álvarez Borrego *et al.*, 1975; Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1982; Álvarez-Borrego, 2004) han argumentado que las surgencias costeras en Baja California proveen de aguas ricas en nutrientes cerca de la boca de *BSQ*, y las corrientes de marea son las encargadas de transportar estas a lo largo de toda la bahía. Sin embargo, se sabe

que a largo plazo, los movimientos oscilatorios de marea no afectan directamente el transporte neto de masas de agua, calor, sal, nutrientes sedimentos y contaminantes. Este transporte es ocasionado primordialmente por las *corrientes residuales*.

Álvarez-Borrego (*op cit.*) atribuye que en la boca de la laguna las surgencias son la principal causa de la variabilidad de todas las propiedades físicas y químicas, con excepción de la temperatura que es afectada principalmente por las mareas semidiurnas. También en esta tesis se considera que la alta variabilidad que ocurre en los registros de temperatura están estrechamente relacionados con el régimen de mareas, pero los descensos notorios en los registros de los días 150-151, no son sólo consecuencia del ascenso del nivel del mar, sino además de un pulso de surgencia moderada ocurrido en el mar adyacente de la bahía, cuya señal térmica ingreso al cuerpo costero a través de las corrientes de marea.

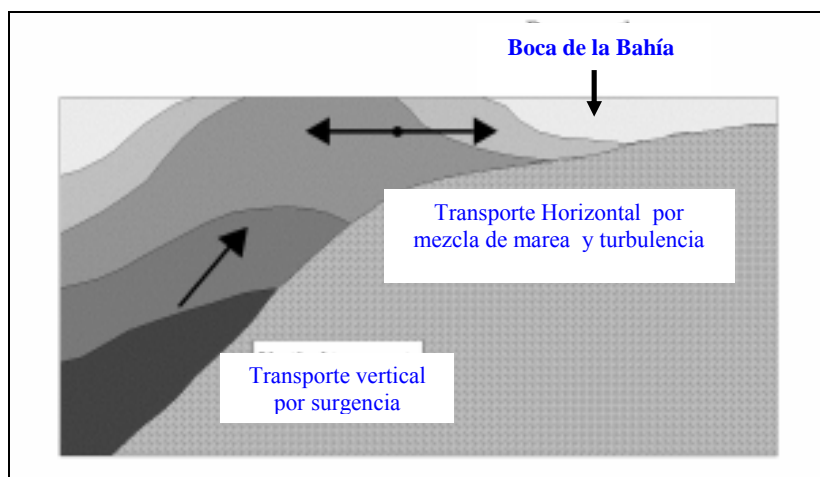


Figura. 57. Esquema conceptual del principal mecanismo de transporte de nutrientes dentro de las lagunas costeras. Los nutrientes de las surgencias se mueven dentro del sistema lagunar debido a los flujos de las corrientes de mareas a la par con la mezcla turbulenta. Figura tomada de Zaytsev, *et al.* (2003).

En *BSQ* el transporte de nutrientes está estrechamente ligado a la corriente de mareas, como al flujo neto residual que ingresa a la bahía por el canal oeste. En un experimento realizado en Mayo del 2004, consistente en serie de tiempo de medición de nutrientes realizado en la boca de la bahía, los valores de nitratos registraron variaciones de 14 μM (etapa de flujo) a 3 μM (en reflujos). Disminución que es atribuida a los procesos biológicos de retención de nutrientes que tienen lugar en el interior de la bahía (Dr. Víctor Camacho Ibar, comunicación personal).

De acuerdo con el análisis realizado entre las serie de tiempo de viento, temperatura, nivel medio del mar y los datos de muestreos de nutrientes registrados en Mayo-Junio del 2004 en *BSQ*, se observó que durante los días en que intensificó el viento (períodos ~ 3 días), en algunas ocasiones se presentó posterior a la intensificación, un descenso de la temperatura del agua de mar en la boca del sistema. La máxima correlación entre las series de viento y temperatura se presentan después de ~ 22 hrs. en superficie y ~ 28 hrs. en fondo (Fig. 20). Cuando esto coincidió con mareas vivas ó durante la transición de mareas muertas a vivas, se registran los mayores descensos de temperatura e incrementos de nutrientes en este mismo sitio. Variaciones que son atribuidas a pulsos de surgencia ocurridos en el mar adyacente, que ingresan durante la etapa de flujo de la marea. Cabe señalar que algunos días existieron vientos intensos, pero no fueron muy persistentes y además coincidió con mareas muertas, por lo tanto la respuesta en el descenso de la temperatura no fue tan notoria, como se observa en los días 161-162 (Ver figuras 13d y 19).

Las propiedades físico-químicas que ocurren durante una surgencia costera han sido ampliamente documentadas para las costas que abarca el Sistema de la Corriente de California. En la bahía de Monterey, California, Pennington y Chávez (2000) describen observaciones efectuadas en el período 1989-1996, y reportan temperaturas típicas de $\sim 10\text{-}11\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $33.4 < S \leq 33.8$, y altas concentraciones de nitratos en superficie ($10\text{-}20\text{ }\mu\text{M}$). Para la costa de Baja California, Álvarez-Borrego (2004) reporta temperaturas típicas de $\sim 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ y concentraciones de nitratos hasta $>12\text{ }\mu\text{M}$.

Los valores más bajos de temperatura ($10.9\text{ }^{\circ}\text{C}$) y más altos de nitratos ($14.6\text{ }\mu\text{M}$) registrados en *BSQ*, durante la campaña de muestreo efectuada en los meses de Mayo-Junio del 2004, pueden ser considerados como registros típicos de surgencias costeras. Estos valores son muy similares a los reportados durante surgencias en la literatura citada anteriormente. Sin embargo, los registros alcanzados en *BSQ* fueron muy esporádicos a lo largo del experimento. Lo anterior, sugiere que se presentaron señales de pulsos de surgencias moderadas, las cuales ingresaron al interior de la bahía durante esas fechas transportadas por las corrientes de mareas. Estos pulsos moderados son producto de la combinación de la intensificación del viento, el cual fue medianamente persistente durante el periodo de muestreo y de la etapa de la marea en la que ocurrió (transición de vivas a muertas).

A través de este estudio se muestran evidencias de la presencia de pulsos de surgencias moderadas durante la etapa de muestreo, que enriquecen de nutrientes de manera importante la *BSQ*; así mismo la existencia de un flujo residual que ingresa a la

bahía por el canal más profundo, que favorece constantemente el transporte de nutrientes provenientes del mar adyacentes, que permiten fertilizar el interior del cuerpo costero de manera permanente contribuyendo a la alta productividad primaria que caracteriza a *BSQ*. Los nutrientes que ingresan a la bahía son retenidos en el interior de la misma principalmente al ser consumidos por los organismos que habitan en esta y a los procesos geoquímicos que tienen lugar.

V. CONCLUSIONES

Los resultados revelan que la dinámica de Bahía de San Quintín es dominada en general por las interacciones de la marea, el viento y en menor medida por los gradientes de presión y densidad. Durante el muestreo se identificaron dos áreas de interés dinámico. La primera “la boca de la bahía” (canal de acceso) cuyo comportamiento es forzado básicamente por el efecto de la marea en donde los efectos de fricción y la topografía determinan las características y la dirección del flujo residual. La segunda área de interés en el “interior de la bahía” (los dos canales principales), donde la marea y el viento son los principales forzamientos, con una relativa contribución de los gradientes de presión y densidad. En esta área el viento determina la dirección de las corrientes en la superficie y de manera indirecta en el fondo. En ambas áreas se observa rectificación de la marea lo cual se evidencia por la generación de subarmónicos como M_4 y M_6 , mismos que aumentan su amplitud en el interior de la bahía.

Las corrientes residuales registradas en el extremo oeste de la boca (canal de acceso) tienen un comportamiento barotrópico a lo largo de la columna de agua y son atribuidas principalmente, a las interacciones no lineales de las oscilaciones de la marea. Existe un flujo residual hacia el interior de la bahía que durante mareas vivas incrementa su intensidad y es muy homogéneo en la vertical; durante mareas muertas ingresa con magnitudes menores. Este flujo residual de marea permite el ingreso constante de nutrientes que enriquecen de manera permanente la bahía. En presencia de pulsos de surgencia del mar adyacente, los nutrientes se incrementan y los registros de temperatura decrecen de manera importante en condiciones de flujo, mientras que en reflujos ocurre lo contrario.

En la boca de la *BSQ*, la competencia entre los efectos viscosos dominan sobre los efectos de rotación de la tierra. Se observó que existe un número de Ekman vertical grande ($E > 1$), lo cual favorece a que exista un flujo de entrada neto por las zonas más profundas del canal. Los flujos de salida, con aguas de relativamente mayor temperatura, ocurren en las zonas más someras.

Las corrientes residuales en el interior de la bahía muestran un cizallamiento vertical a favor de las manecillas del reloj forzado por el viento. Esto induce un flujo de dos capas, una superficial con dirección y sentido similar al viento, mientras que en el fondo ocurre un flujo compensatorio con sentido casi opuesto que permite restablecer el balance de masas. En esta área la circulación es predominantemente barotrópica. Sin embargo, en la estación *NB* ubicada en el canal principal del brazo oeste (*BF*), en condiciones de baja turbulencia (menor fricción, cuando se favorece la estratificación), los resultados sugieren una contribución aparente de corrientes de gravedad asociadas a los gradientes longitudinales de densidad inferidos a partir de los gradientes longitudinales de temperatura, que pueden ocasionar una circulación baroclínica durante mareas muertas. Para poder corroborar éstas inferencia, es conveniente efectuar perfiles termohalinos que permitan calcular los gradientes de densidad en esta área, a fin de precisar si existe ó no circulación baroclínica durante esta etapa de la marea.

BIBLIOGRAFIA.

- Almeida Vega, M. 1998. Análisis de Datos Aeromagnéticos de la Planicie Costera del Valle de San Quintín B. C, México. Tesis Profesional. Facultad de Ciencia Marinas de la Universidad de Baja California. 53 pp.
- Álvarez-Borrogo, S., G. Ballesteros, y A. Chee, 1975. Estudio de algunas variables fisicoquímicas superficiales en la Bahía de San Quintín en verano, otoño e invierno. *Ciencias Marinas*, 2: 1-9.
- Álvarez-Borrogo, S., 2004. Nutrient and phytoplankton dynamics in a coastal lagoon strongly affected by coastal upwelling. *Ciencias Marinas* 30(1A), 1-19.
- Barnard, J.L., 1962. Benthic marine exploration of Bahía San Quintín, Baja California. *Pacific Naturalist*, 3: 249-274.
- Camacho-Ibar, V.F., Carriquiry, J.D., Smith, S.V., 1999. Bahía San Quintín, Baja California: N/P budgets within compartments in a coastal lagoon. In: *Mexican and Central American Coastal Lagoon Systems: Carbon, Nitrogen and Phosphorous fluxes*. LOICZ reports and studies No. 13, LOICZ, Texel, the Netherlands. IN PRESS.
- Castro, C. G., C. A. Collins, P. Walz, J. T. Pennington, R. P. Michisaki, Friederich, F. P. Chávez, 2002. Nutrient variability during El Niño 1997-98 in the California current system off central California. *Progress in Oceanography*. 54: 171-184.
- Clancy E. P., 1968. The tides. *Pulse of the Earth*. Anchor Books Doubleday and company, inc. Garden City, New York. 228 pp
- Del Valle L.I., 1979. Aplicación de un Modelo Numérico y Análisis de Condiciones Hidrodinámicas en Bahía de San Quintín, B.C. Tesis de Maestría. Centro de Estudios Superiores de Ensenada. México.
- Del Valle, L.I. y H. R. Cabrera M., 1981. Análisis estadístico de condiciones hidrodinámicas en la Bahía de San Quintín, B. C. Verano de 1977. *Ciencia Marina*. Vol. 7 (1). 17-29.
- Delgado, C. J. A., 1997. Dinámica No-Lineal inducida por mareas en la Ensenada de La Paz, Baja California Sur. Tesis maestría en ciencias. Centro de Investigación
- Dyer, K. 1973. *Estuaries: A physical Introduction*. John Wiley Científica Superior de Ensenada. México. 56 pp and Sons, Inc., New York. 140 pp.

- Dyer, K. R. 1988. Tidally Generated Estuarine Mixing Processes. Hydrodynamics of Estuaries. Volumen I. Estuarine Physics. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida. pp 41-57.
- Elliott, A. J., 1978. Observations of Meteorologically Induced Circulation in the Potomac Estuary. Estuarine and Coastal Marine Science (1978) 6,285-299.
- Emery J. W. y R. E. Thompson, 2001. Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Elsevier Science. Printed in The Netherlands. 638 pp.
- García-Esquivel, Z., Z., González-Gómez, M.A., Ley-Lou, F., Mejía-Trejo, A., 2004. Potencial ostrícola del brazo oeste de Bahía San Quintín: Biomasa actual y estimación preliminar de la capacidad de carga. Ciencias Marinas (2004), 30(1A): 61-74
- Gill A. E., 1982 Atmosphere-Ocean Dynamics, Volume 30. International Geophysics Series, 662 pp.
- Godin, G., 1972. The Analysis of Tides. University of Toronto Press. Toronto, 264pp.
- Gorsline, D. S. y R. A. Stewart, 1962. Benthic Marine exploration of Bahía de San Quintín, B. C. 1960-61. Pacific Naturalist. 2:275-280.
- Hernández-Ayón, J. M., M. S. Galindo-Bect, V. F. Camacho-Ibar, Z. García-Esquivel, M.A. González-Gómez y F. Ley-Lou, 2004. Dinámica de los nutrientes en el brazo oeste de Bahía San Quintín, Baja California, México, durante y después de El Niño 1997/1998. Cienc. Mar. 30(1A): 129-142.
- Jiménez, H. S. B. 2005. Análisis de procesos físico-biológicos acoplados en la Bahía de San Quintín, B. C., México. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencia Marinas. Universidad Autónoma de B. C. Ensenada, B. C. México. 95 pp.
- Juárez, V. M. 1982. Modelo Unidimensional de Dispersión para un Estuario Ramificado y su Aplicación a Bahía de San Quintín. Tesis de Maestría, División de Oceanología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. México 79 pp.
- Kasai, A., A. E. Hill, T. Fujiwara y J. H. Simpson, 2000. Effect of the Earth's rotation on the circulation in regions of freshwater influence. Journal of Geophysical Research, Vol 105, No C7. pp 16 961-16 969.
- Kjerfve, B., 1994. Coastal Lagoon Processes. In: B. Kjerfve (ed.), Coastal Lagoon Processes, Elsevier, Amsterdam, pp. 1-15.
- Lara-Lara, J. R., 1979. Variability and tidal exchange of ecological properties in a coastal lagoon. Tesis de Maestría. Universidad del Estado de Oregon, U.S.A.

- Lara-Lara, J. R., S. Alvarez-Borrego y L. F. Small, 1980. Variability and tidal exchange of ecological properties in a coastal lagoon. *Est. Coast. Shelf Sci.*, 11: 613–637.
- Li, C., A. Valle-Levinson, Wong, K.C., K. M. M. Lwiza, 1998. Separating baroclinic flow from tidally induced flow in estuaries. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, No. CS. pp 10,405-10,417.
- Li, C. y J. O'Donnell, 1997. Tidally driven residual circulation in shallow estuaries with lateral depth variation. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102. No. C13. December 15. pp 27,915-27,929.
- Li C. y J. O'Donnell, 2005. The Effect of Channel Length on the Residual Circulation in Tidally Dominated Channels. *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 35, 1826-1840.
- Linden, P.F. y J. E. Simpson, 1988. Modulated mixing and frontogenesis in shallow seas and estuaries. *Continental Shelf Research*. Gran Bretaña. Vol. 8 No. 10. pp. 1107-1127.
- Martori O., J.I., 1989. Variabilidad de la Circulación y sus Causas en Bahía San Quintín, B. C. Tesis de Maestría, División de Oceanología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, BC, México, 110 pp.
- Menzies, R.J., 1962. The Marine Isopod Fauna of Bahía, B. C. *Pacific Naturalist*, 3:337-348.
- Millan-Núñez, R., S. Alvarez-Borrego y M. D. Nelson, 1982. Effects of physical phenomena on the distribution of nutrients and phytoplankton productivity in a coastal lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 15:317-335.
- Monreal, G. M. 1980. Aplicaciones de un Modelo de Dispersión en Bahía San Quintín, Baja California, México. Tesis de Maestría, División de Oceanología, CICESE. 84 pp.
- Ocampo, T. F. J., 1980. Análisis de mareas y predicción de velocidad mediante un modelo unidimensional en Bahía San Quintín, B. C. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B. C., México. 96 pp.
- Officer, C. B., 1976. *Physical Oceanography of Estuaries (and Associated Coastal Waters)* John Wiley & Sons. 465 pp.
- Ortiz, M., 2001. Notas del curso de Análisis de Datos. CICESE.

- Ortiz, M., Huerta-Tamayo, L. y A. Hinojosa, 2003. Transporte de sedimento por tracción de marea en el estero de Punta Banda, Baja California, México. GEOS, Volumen 23. Número 3. p. 283-294.
- Parker, B. B., 1991. Tidal Hydrodynamics. John Wiley and Sons, Inc. pp. 237-255.
- Pawlowicz, R., B. Beardsley, y S. Lentz, 2002. Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE. Computers and Geosciences, 28: 929-937.
- Pennington, J. T. y F. P. Chavez, 2000. Seasonal fluctuations of temperature, salinity, nitrate, chlorophyll and primary production at station H3/ M1 over 1989-1996 in Monterey Bay, California., 2002. Deep-Sea Research. Part II. 47: 947-973.
- Preisendorfer, R. W., F. W. Zwiers y T. P. Barnett, 1977. Foundations of principal component selection rules. SIO Rep. 81-4, May 1981, Scripps Institution of Oceanography, 192 pp.
- Pugh, D.T., 1987. Tides, Surges and Mean Sea-Level. Wiley, Chichester, 472pp.
- Rady, M.A., M. I. El-Sabh, T. S. Murty y J. O. Backhaus, 1998. Residual Circulation in the Gulf of Suez, Egypt. Estuarine, Coastal and Shelf Science (1998) 46, 205-220.
- Ribeiro, C. H. A., J. J. Wanick, J. Sharples, 2004. Observations of the spring-neap modulation of the gravitational circulation in a partially mixed estuary. Ocean Dynamics. 54: 299-306
- Robinson, I. S., 1981. Tidal vorticity and residual circulation. Deep-Sea Research. Vol. 28 A. No.3, pp 195-212.
- Robinson, I. S., 1983. Tidally induced residual flows. Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas. B. Johns, Ed., Elsevier, 321-356 pp.
- Sanay, R. y A. Valle-Levison, 2005. Wind-Induced circulation in semienclosed homogeneous, rotating basins. Journal of Physical Oceanography, 35, 2520-2531.
- Simons, T. J., 1980. Circulation models of lakes and inland seas. Bull. 203, Dept. of Fisheries and Oceans, Ottawa, Ontario, Canada, 146 pp.
- Souza, A.J., 1994. Controls on stratification in the Rhine ROFI system. Ph. D. University College of North Wales, School of Ocean Sciences.
- Souza, A.J., J.H. Simpson y F. Schirmer, 1997. Current structure in the Rhine region of freshwater influence. Journal of Marine Research, 55, 277-292.

- Souza, A.J., Dickey, T.D., y Chang, G.C., 2001. Modeling water column structure and suspended particulate matter on the Middle Atlantic continental shelf during the passages of Hurricanes Edouard and Hortense. *Journal of Marine Research*, 59, 1021–1045.
- Souza, A.J., J. y Pineda, 2001. Tidal mixing modulation of sea-surface temperature and diatom abundance in Southern California. *Continental Shelf Research* 21, 651–666
- Tomczak, M., 1998. *Shelf and Coastal Oceanography*. Versión 1.0.
- Tomczak, M., 2000. *Una Introducción a la Oceanografía Física*. Versión 2.0
- Valle–Levinson A., J. Moraga, J. Olivares y J. L. Blanco, 2000. Tidal and residual circulation in a semi-arid bays Coquimbo Bay, Chile. *Continental Shelf Research*. Vol. 20 (15). Pp. 2009-2028.
- Valle-Levinson, A., C. Reyes y R. Sanay, 2003. Effects of bathymetry, friction, and rotation on estuary-ocean exchange. *Journal of Physical Oceanography*. Volume 33, 2375-2393.
- Valle–Levinson A., W. Schneiderb, M. Sobarzob, M. Bello L. Bravo, M. Castillo, L. Duarte, R. Fuenzalidab, J.M. Gallegos, J. Garcés–Vargas, J. González, D. Gutiérrez, C. Molinetf, M.S. Navarro, J. Pierinig, E. Rodríguez–Rubio, A. Valdenegro, L. Verah y L. Zenteno, 2004. Wind-induced exchange at the entrance to Concepción Bay, an equatorward facing embayment in central Chile. *Deep-Sea Research II*. Elsevier. 51 (2004) 2371–2388.
- Ward, D. H., 2000. U. S. Geological Survey, Alaska Science Center.
- Winant, C. D. y G. G. Gutiérrez, 2003. *Tidal Dynamics and Residual Circulation in a Well-Mixed Inverse Estuary*. American Meteorological Society. 1365 p
- Yasuda, H., 1996. Tide-Induced Residual Currents Generated by the Stokes Layer in the Rotating Tidal Basin. *Mixing in Estuaries and Coastal Seas*. Coastal and Estuarine Studies. American Geophysical Union. Volumen 50. 95-109.
- Zaytsev, O., R. Cervantes-Duarte, O. Montante y A. Gallegos-García, 2003. Coastal Upwelling Activity on the Pacific Shelf of the Baja California Peninsula. *Journal of Oceanographic*, Volumen 59, 489-502.