



*Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología*  
Universidad Nacional Autónoma de México



## CORRIENTES INERCIALES AL SUR DEL GOLFO DE MÉXICO

### T E S I S

Que para obtener el grado académico de

Maestro en Ciencias  
(Oceanografía Física)

P r e s e n t a

**Gilberto Expósito Díaz**

Director de Tesis: Dr. David Alberto Salas de León

Comité Tutorial: Dr. Julio Candela Pérez

Dr. Rodolfo Silva Casarín

Dr. Felipe Vázquez Gutiérrez

Dra. María Adela Monreal Gómez

México, D. F., 2006



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## DEDICATORIA

*A mi hijo:*

*Gilberto Expósito Ramos, que siempre ha estado muy dentro de mi corazón, al que no he dejado de recordar un solo día a pesar de la distancia física que me mantuvo separado de él durante dos años. Por todos los días y noches que no lo acompañé de la mano debido a mi trabajo y no poder dedicarle todo el tiempo que hubiera querido en sus primeros años de infancia.*

*A mi esposa:*

*Oraidys Ramos Peláez, por estar siempre a mi lado compartiendo momentos de alegría y tristeza, por su apoyo incondicional, dedicación y confianza.*

*A mis padres:*

*Estrella Díaz Ponce y Gilberto Expósito Padrón, por el esfuerzo, amor y dedicación que siempre me han brindado. Sin su confianza jamás hubiera sido posible el comienzo de esta nueva etapa en mi vida.*

*A mi hermano:*

*Yordani Expósito Díaz, a quien quiero mucho. Recuerdo cada momento que compartimos, juegos, peleas, alegrías... y copas. Para el brother un fuerte abrazo.*

*A mi abuela:*

*María del Carmen Rodríguez Agramante, con mucho cariño.*

*A mi suegrita Magalis, por considerarme como un hijo más. A Tonito y Loreta.*

*A mis primos:*

*Baby y Tito, por sus sabios consejos y hacer grata mi estancia en La Habana desde el comienzo de mi carrera. Sin su apoyo incondicional se me hubiera dificultado dar inicio a mis estudios de maestría. ¡A ustedes, muchas gracias!*

*A todos los que de una forma u otra hicieron posible el desarrollo de este trabajo.*

*“El pesimista se queja del viento,  
el optimista espera que cambie,  
el realista ajusta las velas.”  
William Arthur Ward.*

## AGRADECIMIENTOS

*Con mucha admiración y respeto a los Dres. David Alberto Salas de León y María Adela Monreal Gómez por su dedicación, ayuda incondicional y enseñanzas brindadas todo este tiempo.*

*A los miembros del comité tutorial: Dr. David Alberto Salas de León, Dr. Rodolfo Silva Casarín, Dr. Felipe Vázquez Gutiérrez, Dra. María Adela Monreal Gómez y Dr. Julio Candela Pérez, por sus orientaciones y útiles comentarios que contribuyeron de forma positiva en el desarrollo y culminación de esta tesis.*

*A la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO, al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología (PCMyL) y al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL) de la UNAM por el apoyo económico brindado para la realización de este trabajo.*

*A todos los compañeros del Laboratorio de Oceanografía Física del ICMyL; en especial a Miguel A. Díaz Flores, Habacuc Velasco Mendoza, Ikebana S. Rosales Navarro y Javier Aldeco Ramírez por sus comentarios y ayuda que fue de gran utilidad para enriquecer el trabajo.*

*Al personal del Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología por la amabilidad y preocupación que los caracteriza para con los estudiantes.*

*Al Ing. Ignacio Palomar Morales por las veces que me sacó de apuros con el sistema de cómputo.*

*A mis amigos y compañeros del Centro de Estudios y Servicios Ambientales de Villa Clara, Cuba, sin que me quede ninguno, con mucha admiración a Ásela María y Rogelio Mora que siempre supieron guiarme a pesar de las circunstancias.*

*A mi hermano del mar Edelkis Rodríguez “El Pirata”, por sus enseñanzas y compartir conmigo los trabajos y aventuras más inolvidables.*

*A ti Roberto, te agradezco el haber podido estar en este admirable posgrado; tu ayuda y consejos me sirvieron para alcanzar la meta, nuevamente gracias.*

*A todos los colegas que de una forma u otra me brindaron su apoyo durante el desarrollo de la tesis, en especial quienes considero han sido mi familia en México: Miguel A. Díaz, Erick Márquez, Iván Penié, Víctor Martínez, Alicia Sandar y los Sres. María L. Matilde Rodríguez y Maurilio Durazno.*

*¡¡¡Gracias!!!*

## CONTENIDO

CONTENIDO.....	I
LISTA DE FIGURAS.....	III
LISTA DE TABLAS.....	VII
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
MOTIVACIÓN.....	3
CAPITULO I.....	4
INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS.....	4
1.1.1 Clima.....	4
1.1.2 Hidrología.....	5
1.1.3 Batimetría.....	6
1.1.4 Hidrodinámica.....	7
1.1.5 Marea.....	8
1.2 ANTECEDENTES.....	11
1.3 OBJETIVOS.....	13
1.3.1 Objetivo General.....	13
1.3.2 Objetivos Específicos.....	13
CAPITULO II.....	14
MARCO TEÓRICO.....	14
2.1 ASPECTOS DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS.....	14
2.1.1 Las Leyes de Newton en oceanografía (Ecuación de Movimiento).....	15
2.1.2 Movimiento inercial.....	15
2.1.3 Flujo geostrófico.....	18
2.1.4 La capa de Ekman.....	19
CAPITULO III.....	21
MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
3.1 MEDICIONES DE CAMPO.....	21

3.1.1 Ubicación de los sitios de medición.....	21
3.1.2 Instrumentos.....	22
3.1.3 Calidad y estadística de los datos.....	25
3.1.4 Estructura de los datos.....	26
3.2 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.....	26
3.2.1 Frecuencias de variación de las direcciones de la corriente.....	27
3.2.2 Análisis espectral mediante Transformada Rápida de Fourier (FFT).....	28
3.2.3 Análisis espectral mediante Transformada de Wavelet.....	28
3.2.4 Análisis armónico.....	29
CAPITULO IV.....	30
RESULTADOS.....	30
4.1 EVOLUCIÓN DE LAS SERIES DE TIEMPO.....	30
4.2 FRECUENCIAS DE VARIACIÓN DE LA MAGNITUD Y DIRECCIÓN DE LAS CORRIENTES.....	45
4.3 PERIODICIDAD DE LAS OSCILACIONES.....	53
4.3.1 Análisis espectral mediante Transformada Rápida de Fourier (FFT).....	53
4.3.2 Análisis espectral mediante Wavelet.....	65
4.4 MAREA Y CORRIENTES DE MAREA.....	70
4.4.1 Marea.....	70
4.4.2 Corrientes de marea.....	72
CAPITULO V.....	76
5.1 DISCUSIÓN.....	76
5.2 CONCLUSIONES.....	80
5.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	81
REFERENCIAS.....	82
ANEXO I.....	88
ANEXO II.....	90

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación del área de estudio.....	4
Figura 1.1.2.1. Principales ríos que vierten sus aguas a la Bahía de Campeche.....	5
Figura 1.1.3.1. Batimetría de la Bahía de Campeche. Isóbatas cada 100 m.....	6
Figura 1.1.4.1. Circulación inferida de la topografía dinámica de la superficie del mar.....	7
Figura 1.1.5.1. Características de la marea en la Bahía de Campeche.....	8
Figura 1.1.5.2. Ubicación de las estaciones mareográficas de la Bahía de Campeche.....	9
Figura 1.2.1. Sección transversal de temperatura en la Bahía de Campeche.....	11
Figura 1.2.2. Patrón de circulación en la Bahía de Campeche en la capa de 4 a 20 m.....	12
Figura 2.1.3.1. Dirección de corrientes alrededor de centros de alta y de baja presión en los hemisferios norte y sur.....	19
Figura 2.1.4.1. Variación de la dirección y velocidad de la corriente en la capa de Ekman en el hemisferio sur.....	20
Figura 3.1.1.1. Ubicación de las estaciones.....	22
Figura 3.1.2.1. Correntómetro RCM-7 Aanderaa y esquema de instalación.....	22
Figura 3.1.2.2. Mareógrafo WLR5 Aanderaa.....	24
Figura 4.1.1. Evolución de series de tiempo de la estación 1 en superficie.....	30
Figura 4.1.2. Evolución de series de tiempo de la estación 1 en fondo.....	31
Figura 4.1.3. Evolución de series de tiempo de la estación 2 en superficie.....	32
Figura 4.1.4. Evolución de series de tiempo de la estación 2 en media agua.....	33
Figura 4.1.5. Evolución de series de tiempo de la estación 2 en fondo.....	33
Figura 4.1.6. Evolución de series de tiempo la estación 3 en superficie.....	34
Figura 4.1.7. Evolución de series de tiempo de la estación 3 en fondo.....	35
Figura 4.1.8. Evolución de series de tiempo de la estación 4 en superficie.....	36
Figura 4.1.9. Evolución de series de tiempo de la estación 4 en media agua.....	36
Figura 4.1.10. Evolución de series de tiempo de la estación 4 en fondo.....	37
Figura 4.1.11. Evolución de series de tiempo de temperatura del agua y registro de marea de la estación 1.....	38

Figura 4.1.12. Evolución de series de tiempo de temperatura del agua y registro de marea de la estación 4.....	38
Figura 4.1.13. Evolución de la velocidad y dirección de la corriente en la estación 1.....	39
Figura 4.1.14. Evolución de la velocidad y dirección de la corriente en la estación 2.....	39
Figura 4.1.15. Evolución de la velocidad y dirección de la corriente en la estación 3.....	39
Figura 4.1.16. Evolución de la velocidad y dirección de la corriente en la estación 4.....	40
Figura 4.1.17. Evolución de las componentes U y V de las series de tiempo de corrientes de la estación C2S y viento de la estación de Cd. Del Carmen.....	41
Figura 4.1.18. Evolución de las componentes U y V de series de tiempo de corrientes de la estación C4S y viento de la estación de Dos Bocas.....	41
Figura 4.1.19. Diagramas de vectores progresivos de corrientes de la estación 1.....	43
Figura 4.1.20. Diagramas de vectores progresivos de corrientes de la estación 2.....	43
Figura 4.1.21. Diagramas de vectores progresivos de corrientes de la estación 3.....	44
Figura 4.1.22. Diagramas de vectores progresivos de corrientes de la estación 4.....	44
Figura 4.2.1. Hodógrafos de corriente de la estación 1.....	45
Figura 4.2.2. Hodógrafos de corriente de la estación 2.....	46
Figura 4.2.3. Hodógrafos de corriente de la estación 3.....	47
Figura 4.2.4. Hodógrafos de corriente de la estación 4.....	47
Figura 4.2.5. Rosas de corrientes de la estación 1.....	48
Figura 4.2.6. Rosas de corrientes de la estación 2.....	49
Figura 4.2.7. Rosas de corrientes de la estación 3.....	50
Figura 4.2.8. Rosas de corrientes de la estación 4.....	51
Figura 4.2.9. Rosas de viento de las estaciones meteorológicas de CD. Del carmen, Dos Bocas y Coatzacoalcos.....	52
Figura 4.2.10. Ubicación de las estaciones meteorológicas.....	53
Figura 4.3.1.1. Espectros energéticos de las componentes U y V de la corriente para la estación 1.....	54
Figura 4.3.1.2. Espectros energéticos de las componentes U y V de la corriente para la estación 2.....	55

Figura 4.3.1.3. Espectros energéticos de las componentes U y V de la corriente para la estación 3.....	56
Figura 4.3.1.4. Espectros energéticos de las componentes U y V de la corriente para la estación 4.....	57
Figura 4.3.1.5. Espectro energético de variación del nivel del mar para la estación 1.....	58
Figura 4.3.1.6. Espectro energético de variación del nivel del mar para la estación 4.....	58
Figura 4.3.1.7. Espectros energéticos de temperatura del mar para la estación 1.....	59
Figura 4.3.1.8. Espectros energéticos de temperatura del mar para la estación 2.....	59
Figura 4.3.1.9. Espectros energéticos de temperatura del mar para la estación 3.....	60
Figura 4.3.1.10. Espectros energéticos de temperatura del mar para la estación 4.....	61
Figura 4.3.1.11. Espectro energético de salinidad para la estación 1.....	62
Figura 4.3.1.12. Espectros energéticos de salinidad para la estación 2.....	62
Figura 4.3.1.13. Espectros energéticos de salinidad para la estación 3.....	63
Figura 4.3.1.14. Espectros energéticos de salinidad para la estación 4.....	63
Figura 4.3.1.15. Espectros de energía de la serie de temperatura del aire de la estación meteorológica Cayo Arcas.....	65
Figura 4.3.1.16. Espectros de energía de la serie de magnitud del viento de la estación meteorológica Cayo Arcas.....	65
Figura 4.3.2.1. Series de tiempo de corrientes filtradas de la estación 1.....	66
Figura 4.3.2.2. Series de tiempo de corrientes filtradas de la estación 2.....	66
Figura 4.3.2.3. Series de tiempo de corrientes filtradas de la estación 3.....	67
Figura 4.3.2.4. Series de tiempo de corrientes filtradas de la estación 4.....	67
Figura 4.3.2.5. Espectros de las componentes U y V de la estación 1 mediante Wavelet.....	68
Figura 4.3.2.6. Espectros de las componentes U y V de la est. 2 mediante Wavelet.....	69
Figura 4.3.2.7. Espectros de las componentes U y V de la est. 3 mediante Wavelet.....	70
Figura 4.3.2.8. Espectros de las componentes U y V de la est. 4 mediante Wavelet.....	70
Figura 4.4.1.1. Esquema comparativo de las amplitudes y fases de los armónicos de marea para las estaciones T1B, T4B y C2S.....	72
Figura 4.4.2.1. Serie periódica de corriente de marea en superficie para la estación 1.....	74

Figura 4.4.2.2. Serie periódica de corriente de marea en superficie para la estación 2.....	74
Figura 4.4.2.3. Serie periódica de corriente de marea en superficie para la estación 3.....	74
Figura 4.4.2.4. Serie periódica de corriente de marea en superficie para la estación 4.....	74
Figura 4.4.2.5. Corrimiento de fase entre la variación del nivel y la corriente de marea. Estación 1.....	75
Figura 5.1.1. Superposición de las estaciones de muestreo sobre la circulación en la Bahía de Campeche obtenida mediante perfilador acústico.....	77
Figura II.1. Función periódica.....	90
Figura II.2. Representación gráfica de los componentes principales de marea y la función periódica resultante.....	93

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1.5.1. Amplitudes y fases de las principales constantes armónicas para la Bahía de Campeche.....	10
Tabla. 3.1.1.1. Coordenadas geográficas y profundidad total de los anclajes.....	21
Tabla 3.1.2.1. Especificaciones técnicas de los correntómetros.....	23
Tabla 3.1.2.2. Instrumentos sobre la línea de amarre correspondiente a la estación 1.....	24
Tabla 3.1.2.3. Instrumentos sobre la línea de amarre correspondiente a la estación 2.....	24
Tabla 3.1.2.4. Instrumentos sobre la línea de amarre correspondiente a la estación 3.....	24
Tabla 3.1.2.5. Instrumentos sobre la línea de amarre correspondiente a la estación 4.....	24
Tabla 4.4.1.1. Características de las armónicas analizadas.....	72
Tabla 4.4.1.2. Diferencia de fase de las armónicas analizadas entre las estaciones.....	72

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación del área de estudio.....	4
Figura 1.1.2.1. Principales ríos que vierten sus aguas a la Bahía de Campeche.....	5
Figura 1.1.3.1. Batimetría de la Bahía de Campeche. Isóbatas cada 100 m.....	6
Figura 1.1.4.1. Circulación inferida de la topografía dinámica de la superficie del mar.....	7
Figura 1.1.5.1. Características de la marea en la Bahía de Campeche.....	8
Figura 1.1.5.2. Ubicación de las estaciones mareográficas de la Bahía de Campeche.....	9
Figura 1.2.1. Sección transversal de temperatura en la Bahía de Campeche.....	11
Figura 1.2.2. Patrón de circulación en la Bahía de Campeche en la capa de 4 a 20 m.....	12
Figura 2.1.3.1. Dirección de corrientes alrededor de centros de alta y de baja presión en los hemisferios norte y sur.....	19
Figura 2.1.4.1. Variación de la dirección y velocidad de la corriente en la capa de Ekman en el hemisferio sur.....	20
Figura 3.1.1.1. Ubicación de las estaciones.....	22
Figura 3.1.2.1. Correntómetro RCM-7 Aanderaa y esquema de instalación.....	22
Figura 3.1.2.2. Mareógrafo WLR5 Aanderaa.....	24
Figura 4.1.1. Evolución de series de tiempo de la estación 1 en superficie.....	30
Figura 4.1.2. Evolución de series de tiempo de la estación 1 en fondo.....	31
Figura 4.1.3. Evolución de series de tiempo de la estación 2 en superficie.....	32
Figura 4.1.4. Evolución de series de tiempo de la estación 2 en media agua.....	33
Figura 4.1.5. Evolución de series de tiempo de la estación 2 en fondo.....	33
Figura 4.1.6. Evolución de series de tiempo la estación 3 en superficie.....	34
Figura 4.1.7. Evolución de series de tiempo de la estación 3 en fondo.....	35
Figura 4.1.8. Evolución de series de tiempo de la estación 4 en superficie.....	36
Figura 4.1.9. Evolución de series de tiempo de la estación 4 en media agua.....	36
Figura 4.1.10. Evolución de series de tiempo de la estación 4 en fondo.....	37
Figura 4.1.11. Evolución de series de tiempo de temperatura del agua y registro de marea de la estación 1.....	38

Figura 4.1.12. Evolución de series de tiempo de temperatura del agua y registro de marea de la estación 4.....	38
Figura 4.1.13. Evolución de la velocidad y dirección de la corriente en la estación 1.....	39
Figura 4.1.14. Evolución de la velocidad y dirección de la corriente en la estación 2.....	39
Figura 4.1.15. Evolución de la velocidad y dirección de la corriente en la estación 3.....	39
Figura 4.1.16. Evolución de la velocidad y dirección de la corriente en la estación 4.....	40
Figura 4.1.17. Evolución de las componentes U y V de las series de tiempo de corrientes de la estación C2S y viento de la estación de Cd. Del Carmen.....	41
Figura 4.1.18. Evolución de las componentes U y V de series de tiempo de corrientes de la estación C4S y viento de la estación de Dos Bocas.....	41
Figura 4.1.19. Diagramas de vectores progresivos de corrientes de la estación 1.....	43
Figura 4.1.20. Diagramas de vectores progresivos de corrientes de la estación 2.....	43
Figura 4.1.21. Diagramas de vectores progresivos de corrientes de la estación 3.....	44
Figura 4.1.22. Diagramas de vectores progresivos de corrientes de la estación 4.....	44
Figura 4.2.1. Hodógrafos de corriente de la estación 1.....	45
Figura 4.2.2. Hodógrafos de corriente de la estación 2.....	46
Figura 4.2.3. Hodógrafos de corriente de la estación 3.....	47
Figura 4.2.4. Hodógrafos de corriente de la estación 4.....	47
Figura 4.2.5. Rosas de corrientes de la estación 1.....	48
Figura 4.2.6. Rosas de corrientes de la estación 2.....	49
Figura 4.2.7. Rosas de corrientes de la estación 3.....	50
Figura 4.2.8. Rosas de corrientes de la estación 4.....	51
Figura 4.2.9. Rosas de viento de las estaciones meteorológicas de CD. Del carmen, Dos Bocas y Coatzacoalcos.....	52
Figura 4.2.10. Ubicación de las estaciones meteorológicas.....	53
Figura 4.3.1.1. Espectros energéticos de las componentes U y V de la corriente para la estación 1.....	54
Figura 4.3.1.2. Espectros energéticos de las componentes U y V de la corriente para la estación 2.....	55

Figura 4.3.1.3. Espectros energéticos de las componentes U y V de la corriente para la estación 3.....	56
Figura 4.3.1.4. Espectros energéticos de las componentes U y V de la corriente para la estación 4.....	57
Figura 4.3.1.5. Espectro energético de variación del nivel del mar para la estación 1.....	58
Figura 4.3.1.6. Espectro energético de variación del nivel del mar para la estación 4.....	58
Figura 4.3.1.7. Espectros energéticos de temperatura del mar para la estación 1.....	59
Figura 4.3.1.8. Espectros energéticos de temperatura del mar para la estación 2.....	59
Figura 4.3.1.9. Espectros energéticos de temperatura del mar para la estación 3.....	60
Figura 4.3.1.10. Espectros energéticos de temperatura del mar para la estación 4.....	61
Figura 4.3.1.11. Espectro energético de salinidad para la estación 1.....	62
Figura 4.3.1.12. Espectros energéticos de salinidad para la estación 2.....	62
Figura 4.3.1.13. Espectros energéticos de salinidad para la estación 3.....	63
Figura 4.3.1.14. Espectros energéticos de salinidad para la estación 4.....	63
Figura 4.3.1.15. Espectros de energía de la serie de temperatura del aire de la estación meteorológica Cayo Arcas.....	65
Figura 4.3.1.16. Espectros de energía de la serie de magnitud del viento de la estación meteorológica Cayo Arcas.....	65
Figura 4.3.2.1. Series de tiempo de corrientes filtradas de la estación 1.....	66
Figura 4.3.2.2. Series de tiempo de corrientes filtradas de la estación 2.....	66
Figura 4.3.2.3. Series de tiempo de corrientes filtradas de la estación 3.....	67
Figura 4.3.2.4. Series de tiempo de corrientes filtradas de la estación 4.....	67
Figura 4.3.2.5. Espectros de las componentes U y V de la estación 1 mediante Wavelet.....	68
Figura 4.3.2.6. Espectros de las componentes U y V de la est. 2 mediante Wavelet.....	69
Figura 4.3.2.7. Espectros de las componentes U y V de la est. 3 mediante Wavelet.....	70
Figura 4.3.2.8. Espectros de las componentes U y V de la est. 4 mediante Wavelet.....	70
Figura 4.4.1.1. Esquema comparativo de las amplitudes y fases de los armónicos de marea para las estaciones T1B, T4B y C2S.....	72
Figura 4.4.2.1. Serie periódica de corriente de marea en superficie para la estación 1.....	74

Figura 4.4.2.2. Serie periódica de corriente de marea en superficie para la estación 2.....	74
Figura 4.4.2.3. Serie periódica de corriente de marea en superficie para la estación 3.....	74
Figura 4.4.2.4. Serie periódica de corriente de marea en superficie para la estación 4.....	74
Figura 4.4.2.5. Corrimiento de fase entre la variación del nivel y la corriente de marea. Estación 1.....	75
Figura 5.1.1. Superposición de las estaciones de muestreo sobre la circulación en la Bahía de Campeche obtenida mediante perfilador acústico.....	77
Figura II.1. Función periódica.....	90
Figura II.2. Representación gráfica de los componentes principales de marea y la función periódica resultante.....	93

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1.5.1. Amplitudes y fases de las principales constantes armónicas para la Bahía de Campeche.....	10
Tabla. 3.1.1.1. Coordenadas geográficas y profundidad total de los anclajes.....	21
Tabla 3.1.2.1. Especificaciones técnicas de los correntómetros.....	23
Tabla 3.1.2.2. Instrumentos sobre la línea de amarre correspondiente a la estación 1.....	24
Tabla 3.1.2.3. Instrumentos sobre la línea de amarre correspondiente a la estación 2.....	24
Tabla 3.1.2.4. Instrumentos sobre la línea de amarre correspondiente a la estación 3.....	24
Tabla 3.1.2.5. Instrumentos sobre la línea de amarre correspondiente a la estación 4.....	24
Tabla 4.4.1.1. Características de las armónicas analizadas.....	72
Tabla 4.4.1.2. Diferencia de fase de las armónicas analizadas entre las estaciones.....	72

## **RESUMEN**

Se realizó un estudio para determinar las características de la circulación en la plataforma continental del este de la Bahía de Campeche, en el sur del Golfo de México, a partir de datos de corriente, temperatura, salinidad y variación del nivel del mar obtenidos con correntómetros RCM-4 y RCM-7 de la marca Aanderaa, en el período comprendido entre el 1<sup>o</sup> de marzo y 17 de junio de 1997.

Los resultados muestran que las corrientes más intensas se presentan en el sector suroeste del área estudiada, donde las mayores amplitudes corresponden a la componente este-oeste. En general la dirección predominante de las corrientes es paralela a la costa, coincidiendo con las isóbatas. La corriente generada por la componente de marea es muy pequeña en comparación con la intensidad de la corriente de la serie original, concentrándose la energía en las bajas frecuencias. Por lo que se asegura que el mecanismo de generación de las corrientes en la zona está influenciado por una circulación de mayor escala, que en la Bahía de Campeche es dominada básicamente por un giro ciclónico de mesoescala y una circulación anticiclónica en la región nororiental de la Bahía. Mediante análisis espectral con transformada rápida de Fourier y transformada de Wavelet, se encontró una componente de baja frecuencia en la circulación que corresponde a procesos inerciales, presentándose de forma irregular con una duración aproximada entre dos y tres días. Algunas de estas oscilaciones también se observaron en los diagramas de vectores progresivos, coincidiendo en tiempo y fecha con las observadas mediante transformada de Wavelet.

## **ABSTRACT**

Data from March 1 to June 17, 1997 of currents, water temperature, salinity, and sea level in the southern Bay of Campeche were used to describe tidal and inertial currents. Data were low pass filtered using a Lanczos type filter, and transformed to the frequency space with classical Fast Fourier Transform (FFT), and Morlet Wavelets Method (MWM). Results presented the strongest currents in the southwestern part of the bay, with a dominant east-west component. The predominant direction of the current was parallel to the coast, and followed the bathymetry, depicting the strong barotropic effect. The amplitude of tidal current was very small when compared to total amplitudes. The spectral energy was concentrated at the low frequencies band, correspond to inertial periods, with an approximate duration between two to three days. Some of these oscillations were also observed in the progressive vectors diagrams. The dominance of the spectral energy at low frequencies demonstrated the influence of the mesoscale cyclonic and the small anticyclonic eddies, of the northeastern Bay of Campeche, in southwestern currents.

## **MOTIVACIÓN**

La Bahía de Campeche es una región de gran importancia desde el punto de vista económico, ecológico y social. Es una zona con reconocido valor pesquero, siendo una de las más importantes de México (Secretaría de Pesca, 1990). También resalta su importancia por contener importantes yacimientos petroleros, cuya exploración y extracción han generado conflictos de intereses entre recursos renovables y no renovables (Nehring, 1978; Stewart-Gordon, 1979). La explotación petrolera en la Sonda de Campeche ocupa el primer lugar en la preocupación frente a los efectos que puede causar en el área debido a la contaminación por hidrocarburos.

La circulación en el sur de la Bahía de Campeche está básicamente forzada por el viento y la marea, sin embargo, existe una componente de la circulación de baja frecuencia denominada corrientes inerciales que no han sido objeto de estudio. Se ha observado en otros lugares, que las corrientes inerciales son importantes en el transporte de partículas a escalas espacio-temporales grandes. Es por eso que este trabajo se enfocó a determinar la parte inercial de las corrientes en el sur del Golfo de México.

## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN

El área de estudio corresponde a la plataforma continental del este de la Bahía de Campeche, situada en la región sur del Golfo de México. La región se localiza entre los 18° y 21.5° de latitud Norte y los 90.5° y 95° de longitud Oeste (Fig. 1.1).

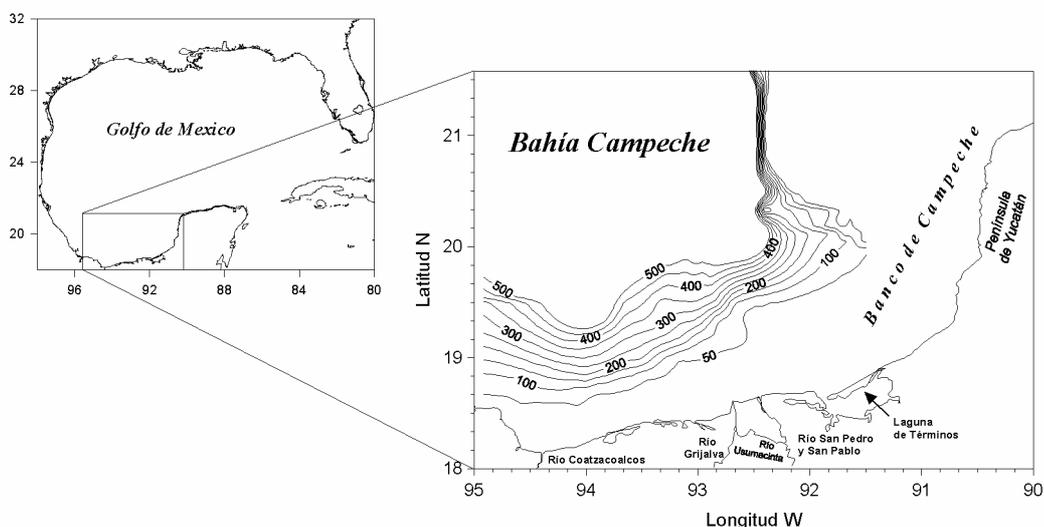


Figura 1.1. Ubicación del área de estudio.

Es una zona abierta, que limita al sur con la costa del Estado de Tabasco y al sureste con las costas del Estado de Campeche, ubicado al oeste de la Península de Yucatán.

### 1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS

#### 1.1.1 Clima

Debido a su posición geográfica dentro del trópico y a su vecindad con el Mar Caribe, predomina la presencia de climas cálidos, húmedos y subhúmedos con lluvias en el verano. La temperatura media anual es superior a 22°C con una precipitación total anual que varía de menos de 1000 milímetros en el noreste hasta cerca de 2000 milímetros en el suroeste del golfo.

Producto de las condiciones atmosféricas sobre el Golfo de México, generadas por el intercambio entre masas de aire frío y seco que provienen del continente y las masas de aire propias del golfo de origen marítimo y tropical se generan fuertes frentes atmosféricos llamados localmente “nortes”, principalmente entre los meses de octubre a abril (Tápanes y Gonzáles-Coya, 1980). Durante el verano, esta región es afectada por tormentas tropicales, de las cuales más del 50% alcanzan intensidades de huracán.

### 1.1.2 Hidrología

Son ocho los principales ríos que vierten sus aguas a la Bahía de Campeche; Coatzacoalcos, Grijalva, Usumacinta, San Pedro y San Pablo, Champotón, Candelaria, Palizada y Chumpán. Los tres últimos desembocan en la Laguna de Términos, el mayor sistema estuarino-lagunar del sur del Golfo de México (Fig. 1.1.2.1).

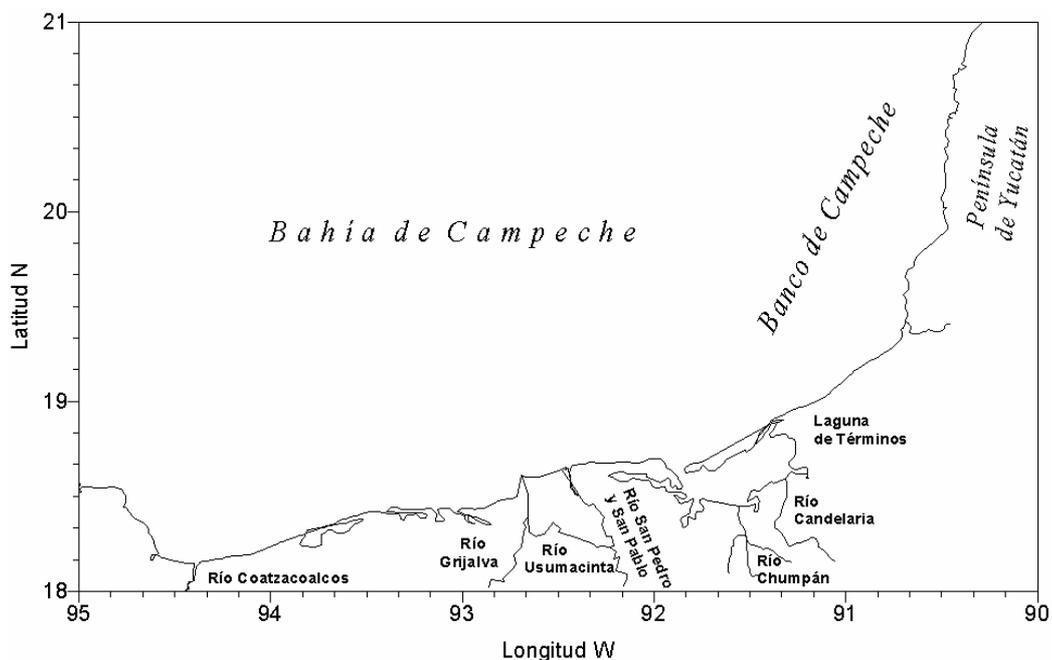


Figura 1.1.2.1. Principales ríos que vierten sus aguas a la Bahía de Campeche.

### 1.1.3 Batimetría

En el Golfo de México la batimetría varía considerablemente, alcanzando profundidades cercanas a los 3000 m en la Fosa de Sigsbee, localizada en la región central. El banco de Campeche se caracteriza por tener una plataforma extensa con una pendiente suave y regular. En la bahía de Campeche las mayores profundidades se localizan al centro, alcanzando en algunos lugares hasta 2700 m de profundidad. A partir de la isobata de los 200 m la pendiente del fondo varía bruscamente en la porción noreste de la bahía, alcanzando profundidades de 2700 m a menos de 3.7 km (2 millas náuticas) de distancia en muchos lugares, mientras que al sur de la bahía esta misma profundidad se logra en una distancia de 24 km (13 millas náuticas) aproximadamente a partir de la isobata de 200 m (Fig. 1.1.3.1).

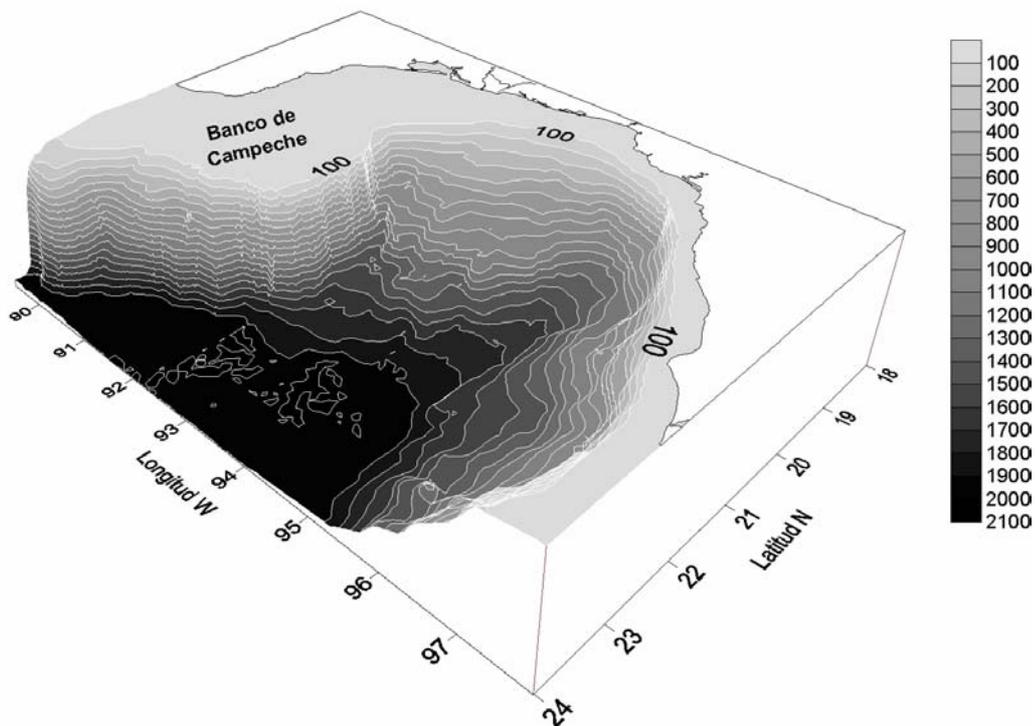


Figura 1.1.3.1. Batimetría de la Bahía de Campeche. Isóbatas cada 100 m.

### 1.1.4 Hidrodinámica

La circulación en la Bahía de Campeche está influenciada por la circulación de gran escala del Golfo de México, la que está dominada por dos características semi-permanentes, la Corriente de Lazo y un gran giro anticiclónico (Behringer *et al.*, 1977), los cuales se localizan en la parte oriental y occidental del golfo, respectivamente (Fig. 1.1.4.1). A su vez esta circulación está condicionada tanto por el viento, como por el transporte de masas que entra por el Canal de Yucatán y por la presencia de surgencias en la plataforma de Yucatán (Cochrane, 1972; Nowlin, 1972; Merrell y Morrison, 1981; Padilla-Pilotze *et al.*, 1985; Salas de León y Monreal Gómez, 1986; Vidal *et al.*, 1988; Velasco Mendoza, 1989; Padilla Pilotze *et al.*, 1990).

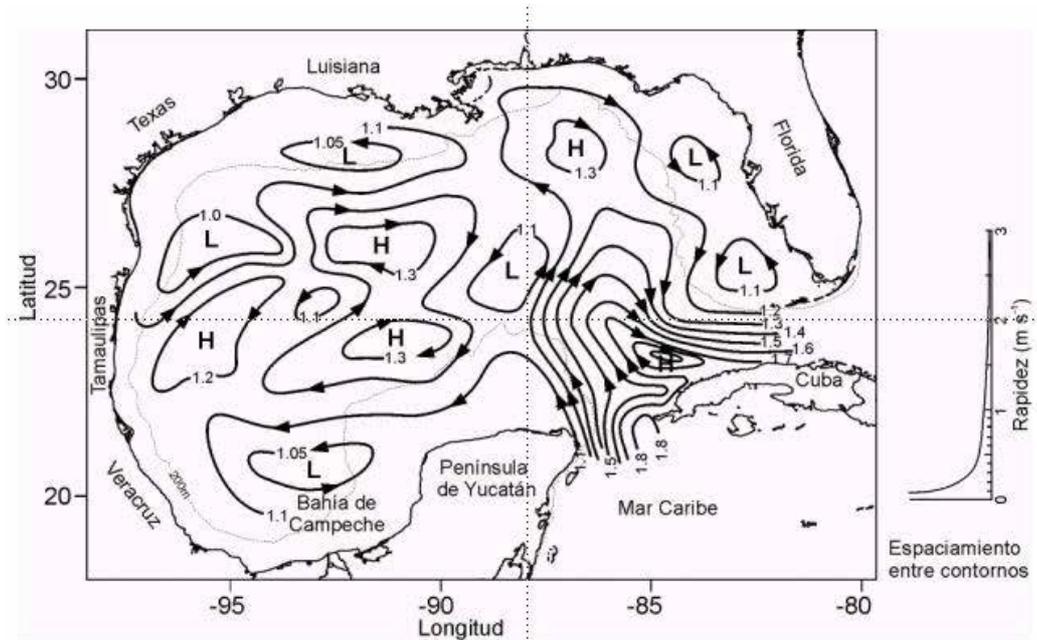


Figura 1.1.4.1. Circulación inferida de la topografía dinámica (m din) de la superficie del mar relativa a 1000 db (citado en Monreal-Gómez *et al.*, 2004).

En la dinámica del golfo también se distinguen giros fríos o ciclónicos, los que se presentan generalmente en la periferia de la Corriente de Lazo y del gran giro anticiclónico; este tipo de circulación es la que se encuentra en la Bahía de Campeche durante el otoño, originándose al este de la bahía para luego comenzar a trasladarse en dirección oeste. Estos giros son más pequeños que el anticiclónico del oeste del golfo, alcanzando diámetros máximos de 150 km (Salas de León y Monreal Gómez, 1997). Según Vukovich y Maul (1975), la presencia de los

giros ciclónicos está asociada con el desprendimiento del gran giro anticiclónico, pues antes de desprenderse el giro anticiclónico, se forman giros ciclónicos en la zona entre el Banco de Campeche y la plataforma de Florida. El giro ciclónico de la Bahía de Campeche no solo está asociado al desprendimiento del giro anticiclónico, pues también se atribuye su existencia al movimiento del agua en la surgencia de Yucatán, ya que esta corriente debe de conservar su momento angular (Cochrane, 1963). También los giros ciclónicos pueden ser producidos por los anticiclónicos, al encontrarse estos últimos con la costa (Smith, 1986; Hurlburt y Thompson, 1980).

### 1.1.5 Marea

En el Golfo de México las mareas son generalmente del tipo diurno, encontrándose básicamente tres tipos, una con características diurnas, otra del tipo mixta con dominancia diurna y la última de tipo mixta con dominancia semi-diurna.

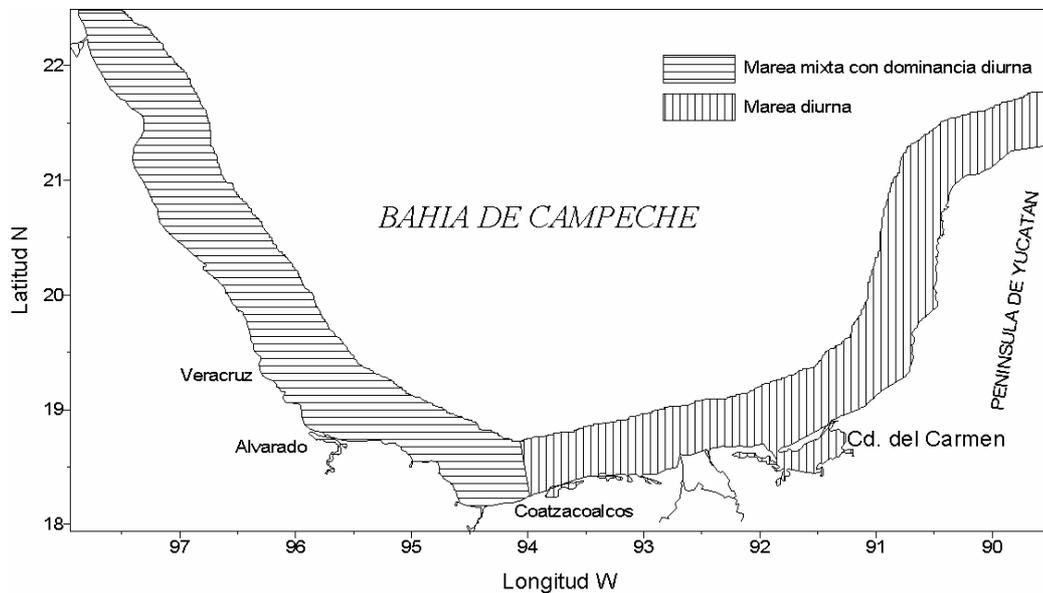


Figura 1.1.5.1. Características de la marea en la Bahía de Campeche. (Salas-de-León *et al.*, 1997).

En la Bahía de Campeche se presentan dos tipos de marea, la marea diurna que se localiza desde el noreste de Yucatán hasta Coatzacoalcos y marea mixta con dominancia diurna que se encuentra desde el noroeste de Coatzacoalcos hasta un poco al norte de Matamoros (Fig. 1.1.5.1). Existen algunas áreas donde la marea es semi-diurna, como por ejemplo frente a Campeche (Salas de León y Monreal Gómez, 1997).

La tabla 1.1.5.1 muestra las amplitudes y las fases de la marea para las principales constantes armónicas de las estaciones mareográficas ubicadas en la Bahía de Campeche (Fig. 1.1.5.2), obtenidas de las tablas numéricas de predicción de marea de la Dirección General de Oceanografía Naval de la Secretaría de Marina de México.

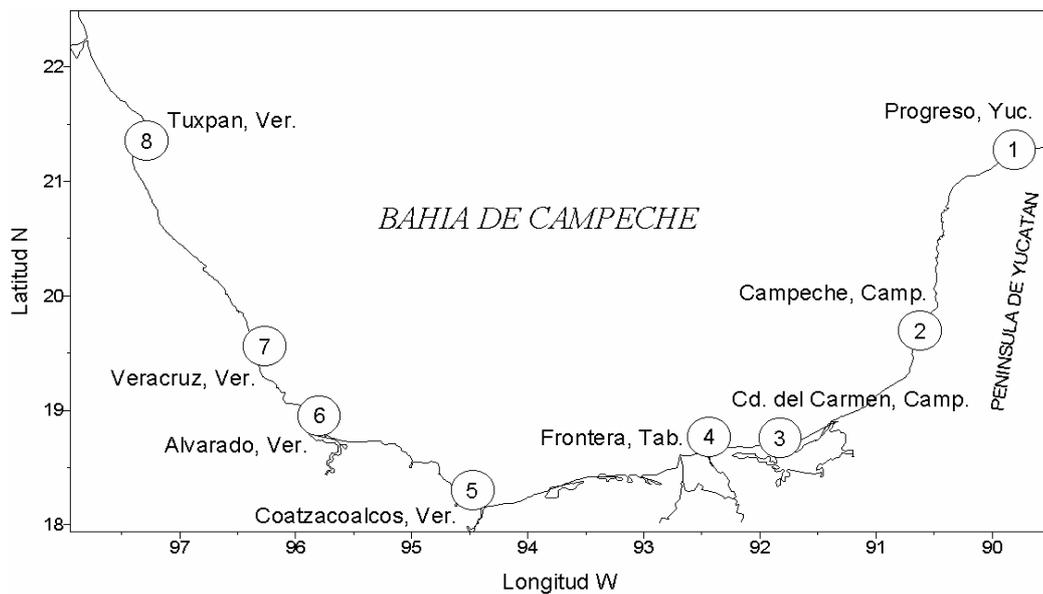


Figura 1.1.5.2. Ubicación de las estaciones mareográficas de la Bahía de Campeche.

Tabla 1.1.5.1. Amplitudes y fases de las principales constantes armónicas para la Bahía de Campeche.  
Hora del meridiano 90° W.

No	M <sub>2</sub>		S <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>		K <sub>1</sub>		O <sub>1</sub>		P <sub>1</sub>	
	Ampl. (m)	Fase (Grad.)										
1	0.058	95.72	0.017	98.40	0.021	77.18	0.180	299.81	0.168	297.55	0.052	306.88
2	0.216	91.1	0.099	87.8	0.060	87.8	0.164	310.5	0.182	298.0	0.054	309.6
3	0.076	78.58	0.019	73.63	0.021	67.35	0.111	315.07	0.120	318.93	0.036	321.44
4	0.087	59.32	0.024	57.35	0.023	44.75	0.149	286.69	0.148	295.39	0.148	295.39
5	0.074	70.99	0.021	69.24	0.020	59.73	0.138	296.18	0.137	294.66	0.043	297.17
6	0.059	86.17	0.016	80.19	0.014	78.58	0.120	302.22	0.118	299.27	0.038	308.66
7	0.088	69.10	0.027	71.14	0.023	56.23	0.154	287.36	0.151	291.37	0.046	292.52
8	0.081	78.07	0.025	78.84	0.020	65.85	0.145	290.72	0.148	296.44	0.048	297.01

Las mareas en el Golfo de México presentan amplitudes pequeñas. Sin embargo, el desnivel de la superficie del mar genera transportes de masa relativamente fuertes, los cuales juegan un papel importante en el transporte de material en suspensión (Salas de León, Monreal Gómez, 1997).

## 1.2 ANTECEDENTES

En la Bahía de Campeche se han realizado varios estudios de hidrodinámica y otros de carácter, químicos, geológicos y biológicos. En estos se hace referencia a la circulación en la región por ser esta el principal mecanismo físico que afecta la distribución de los sedimentos y las comunidades de zooplancton e ictioplancton.

Padilla Pilotzote *et al.* (1990), mostraron la existencia de un giro ciclónico en el sur de la Bahía de Campeche (Figura 1.2.1).

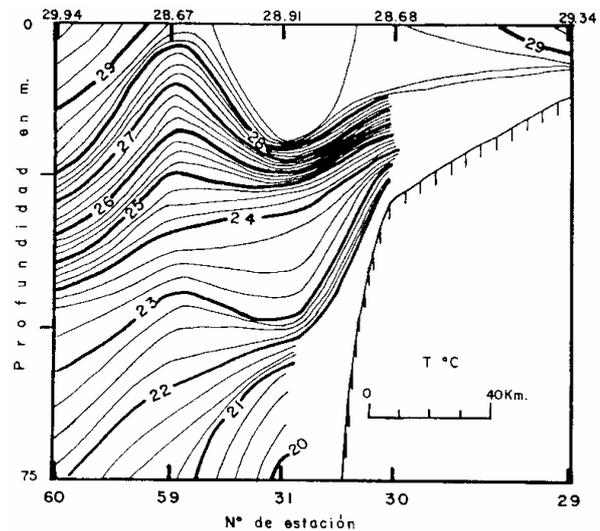


Figura 1.2.1. Sección transversal de temperatura (°C) de un transecto realizado en la Bahía de Campeche (Padilla-Pilotze *et al.*, 1990).

Salas de León *et al.*, (1992) muestran la formación de frentes semi-permanentes, inducidos por el efecto de las descargas de los ríos, de aguas de menor temperatura y salinidad, y encuentran un giro ciclónico en la zona de estudio. El giro reportado por Padilla-Pilotze *et al.*, (1990) y Salas-de-León *et al.*, (1992) es de menor tamaño que el gran giro ciclónico reportado por Vázquez-de-la-Cerda (1975), Monreal-Gómez (1986) y Velasco-Mendoza (1989).

En 1996, Salas de León *et al.*, encuentran que debido a la formación del giro ciclónico en la bahía, la pluma del sistema Grijalva-Usumacinta y los organismos planctónicos muestran una tendencia a desplazarse de acuerdo a la posición del giro, facilitándose así el transporte y distribución de los organismos planctónicos.

La distribución de los sedimentos suspendidos, sugieren que fuera de la boca del Grijalva-Usumacinta la dirección de la corriente es hacia el este. Bajas concentraciones de material total suspendido son localizadas hacia el este de la laguna de Términos. Estos están probablemente asociados a la circulación ciclónica en la zona (Carranza-Edwards *et al.*, 1993).

Los resultados de Díaz Flores (2004) muestran la presencia de un giro ciclónico de mesoescala que se extiende en casi toda la bahía (Figura 1.2.2), con centro en 20.27° N y 94.24° O cuya profundidad de influencia alcanza los 180 m, con radio de 200 km, una velocidad tangencial de 0.25 m s<sup>-1</sup> y velocidad máxima de 0.29 m s<sup>-1</sup>. La velocidad de traslación del centro del giro en 6.1 km día<sup>-1</sup> hacia el oeste. También se observó que parte del giro anticiclónico característico de la circulación en el oeste del Golfo de México afecta el noroeste de la Bahía de Campeche.

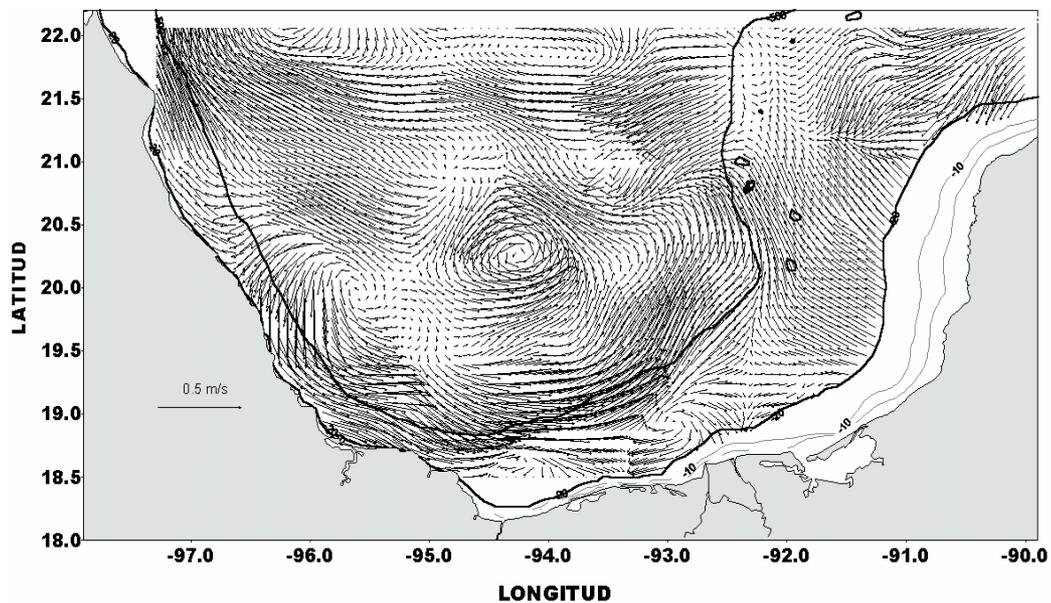


Figura 1.2.2. Patrón de circulación en la Bahía de Campeche en la capa de 4 a 20 m de profundidad entre el 14 de agosto y el 1 de septiembre de 1996 (Díaz-Flores, 2004).

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo General**

Determinar las características de la circulación inercial en el sur del Golfo de México.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Identificar las escalas espacio-temporales de las oscilaciones de la corriente, temperatura, salinidad y variación del nivel del mar.
- Evaluar los procesos físicos que se detecten, en términos de frecuencia y energía.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ASPECTOS DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS

La ecuación que describe el movimiento en el océano se deriva de la Segunda Ley de Newton, la cual expresa la conservación del momento (es decir, el producto de masa por aceleración) de la siguiente forma:

$$F = m \cdot a$$

donde:

$F$  – Fuerza (Vector)

$m$  – Masa (Escalar)

$a$  – Aceleración (Vector)

En los fluidos esta ecuación se expresa en términos de fuerzas por unidad de masa  $F' = F / m$ , así que:

$$F' = dv / dt,$$

donde  $v = (u, v, w)$  es la velocidad expresada en sus componentes a lo largo de los ejes  $x, y, z$  con  $x$  hacia el este,  $y$  hacia el norte y  $z$  hacia abajo ( $a = dv/dt$  es la aceleración). Si hay más de una fuerza, la Segunda Ley de Newton se aplica a la suma de todas las fuerzas involucradas. La ley es válida en un sistema de coordenadas absoluto, es decir, un sistema inercial. En la oceanografía, los sistemas de coordenadas generalmente se definen con su origen en algún lugar sobre la superficie de la Tierra (por ejemplo, en el polo norte). Por lo tanto no son estacionarios ni se mueven con velocidad constante, sino más bien giran conjuntamente con la Tierra. Si se aplica la Segunda Ley de Newton en un sistema de coordenadas en rotación, es necesario incluir una fuerza aparente o virtual para tomar en cuenta los efectos de la rotación.

### 2.1.1 Las Leyes de Newton en oceanografía (Ecuación de Movimiento)

Al sumar todas las fuerzas que actúan en el océano, la Segunda Ley de Newton toma la forma:

Aceleración de la partícula = - gradiente de presión  
+ fuerza de Coriolis  
+ fuerza de marea por unidad de masa  
+ fricción  
+ gravedad

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{a} = -2\Omega \times \vec{V} - g \hat{k} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{3} \frac{\mu}{\rho} \nabla(\nabla \cdot \vec{V}) + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{V} \quad (1)$$

La fuerza de Coriolis es una fuerza aparente y existe sólo para un observador en un sistema de referencia en rotación. En la oceanografía, las corrientes siempre se expresan con respecto al fondo del océano - el cual gira con la tierra - y por lo tanto las mismas pueden ser analizadas correctamente sólo si la fuerza de Coriolis se toma en cuenta en la sumatoria de fuerzas. La magnitud de la fuerza de Coriolis es proporcional a la velocidad de flujo y se dirige perpendicularmente a la dirección del flujo. Actúa hacia la izquierda del flujo en el hemisferio sur y hacia la derecha en el hemisferio norte.

### 2.1.2 Movimiento inercial

Si a una porción de agua se le comunica algo de momento (la porción de agua es empujada) y luego no se le perturba más, el mecanismo de forzamiento desaparece pero el mar sigue en movimiento. En estos casos el agua de los océanos se mueve solo bajo la influencia de la fuerza de Coriolis y de la gravedad terrestre, por lo que se tiene un balance entre la fuerza de Coriolis y la fuerza gravitacional de la tierra. Bajo estas condiciones se dice que el movimiento es inercial, ya que la masa de agua continúa moviéndose debido a su inercia. La Segunda Ley de Newton entonces estipula que la porción de agua debe acelerarse constantemente. Puesto que la aceleración es producida por la fuerza de Coriolis, se dirige

perpendicularmente a la trayectoria de la porción de agua; en otras palabras, la aceleración toma la forma de un cambio constante de dirección. El resultado es que la porción de agua se mueve sobre una circunferencia.

Considérense las ecuaciones de movimiento para un océano sin fricción:

$$\begin{aligned}\frac{dv}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega v \sin \varphi \\ \frac{du}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\Omega u \sin \varphi \\ \frac{dw}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + 2\Omega u \cos \varphi - g\end{aligned}\quad (2)$$

Donde  $p$  es la presión,  $\Omega = \frac{2\pi}{T}$ ,  $T$  es el día sidereal y  $\varphi$  es la latitud.  $\Omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$ .

Para encontrar la solución de (2) primero se deben hacer algunas simplificaciones. Como solo actúan las fuerzas de gravedad y Coriolis, entonces no debe haber gradiente de presión horizontal, por lo tanto:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Además se puede suponer que la velocidad vertical es pequeña,  $w \ll u, v$ , y que  $2\Omega u \cos \varphi \ll g$ . Por lo tanto (2) se reduce a:

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= 2\Omega v \sin \varphi = fv \\ \frac{dv}{dt} &= -2\Omega u \sin \varphi = -fu\end{aligned}\quad (4)$$

donde:

$$f = 2\Omega \sin \varphi \quad (5)$$

$f$  es conocido como el Parámetro de Coriolis y depende de la latitud ( $\varphi$ ).

Las ecuaciones en (4) es un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas de primer orden, lineal, que se pueden resolver fácilmente. Despejando de la segunda ecuación  $u$  e insertando el resultado en la primera ecuación, se obtiene:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{f} \frac{d^2v}{dt^2} = fv \quad (6)$$

Rescribiendo la ecuación (6) se reconoce la ecuación para el oscilador armónico, dada por:

$$\frac{d^2v}{dt^2} + f^2v = 0 \quad (7)$$

Cuya solución está dada por:

$$\begin{aligned} u &= V \sin ft \\ v &= V \cos ft \end{aligned} \quad (8)$$

Donde  $V^2 = u^2 + v^2$ . Las corrientes cuyos movimientos se pueden describir mediante el sistema de ecuaciones en (8) son llamadas corrientes inerciales u oscilaciones inerciales. Note que  $V^2 = (u^2 + v^2)$  y por lo tanto (8) es la ecuación paramétrica. Las partículas van a describir un círculo con diámetro  $D_i = \frac{2V}{f}$  y período  $T_i = \frac{2\pi}{f} = \frac{T}{2\sin\varphi}$ . Donde  $T$  es un día sideral.

$T_i$  es el período inercial y es la mitad del tiempo requerido para efectuar una rotación en una superficie plana proyectada sobre la superficie de la tierra. La dirección de rotación es anticiclónica, esto es en el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio norte y en sentido

contrario a las agujas del reloj en el hemisferio sur. Las corrientes inerciales corresponden a movimientos libres (no forzados) de grandes cantidades de agua en un plano en rotación.

El movimiento inercial es muy común en el océano, donde se encuentra generalmente sobrepuesto a otro movimiento (como el flujo geostrófico o el flujo que resulta de los vientos).

### **2.1.3 Flujo geostrófico**

En el interior del océano, debajo de unos 100 m de profundidad y a más de 100 km de cualquier costa, las fuerzas de fricción se pueden despreciar. La circulación en el estado estacionario entonces es determinada por el equilibrio entre la fuerza del gradiente de presión y la fuerza de Coriolis. Este equilibrio se conoce como flujo geostrófico. En el flujo geostrófico, las partículas se mueven a lo largo de isóbaras (contornos de presión constante), con la presión mayor hacia su lado izquierdo en el hemisferio sur y hacia su lado derecho en el hemisferio norte. Puesto que la presión a cualquier profundidad está determinada por el peso del agua de arriba, las presiones mayores o menores corresponden a niveles del mar mayores o menores. El flujo geostrófico, por lo tanto, está relacionado con la forma de la superficie del mar.

La fuerza de Coriolis y la fuerza del gradiente de presión actúan sobre todas las partículas de agua. El flujo geostrófico es, por lo tanto, parte del campo de corriente oceánico en todas las profundidades y ubicaciones. Por debajo, cerca de los 100 m de profundidad y aproximadamente a 100 km lejos de las líneas de costa, todas las corrientes pueden ser consideradas como geostróficas; más cerca de la superficie y de las fronteras, las corrientes geostróficas son modificadas por fuerzas adicionales.

Un aspecto importante del flujo geostrófico se relaciona con la circulación alrededor de giros. La figura 2.1.3.1 muestra la forma de rotación y la nomenclatura para los giros. Se aplica igualmente a remolinos oceánicos y atmosféricos.

La circulación alrededor de centros de baja presión se llama ciclónica, la circulación alrededor de centros de alta presión se llama anticiclónica (independientemente del hemisferio).

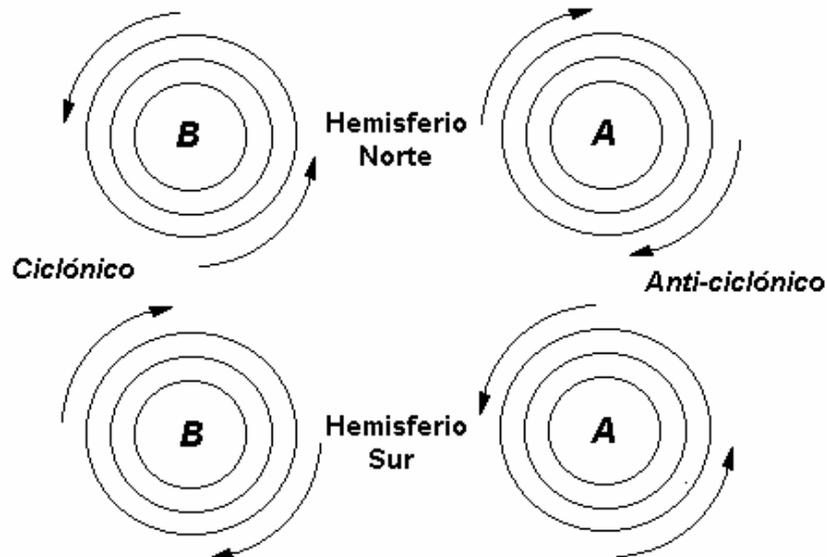


Figura 2.1.3.1. Dirección de corrientes alrededor de centros de alta y de baja presión en los hemisferios norte y sur.

Los términos "horario" y "anti-horario" se usan a menudo, pero no son independientes del hemisferio:

- el movimiento ciclónico es anti-horario en el hemisferio norte, horario en el hemisferio sur (horario: que sigue las manecillas del reloj).
- el movimiento anti-ciclónico es horario en el hemisferio norte, anti-horario en el hemisferio sur.

#### 2.1.4 La capa de Ekman

Las corrientes en la capa superficial del océano de unos 150 m son afectadas directamente por el viento, es decir, la transferencia de momento de la atmósfera al océano. La sumatoria de fuerzas, por lo tanto, debe incluir las fuerzas de fricción, lo que produce un movimiento diferente del simple flujo geostrófico; el agua fluye cruzando las isóbaras desde las áreas de

alta presión a las de baja presión. La capa en la cual el flujo no es geostrófico se conoce como la capa Ekman.

La dirección de movimiento del agua en la capa de Ekman varía con la profundidad (Figura 2.1.4.1). Cuando se considera el estado estacionario, un resultado importante es que el transporte neto (es decir, promediado verticalmente) en la capa de Ekman se dirige perpendicularmente a la dirección del viento, a la izquierda en el hemisferio sur y a la derecha en el hemisferio norte.

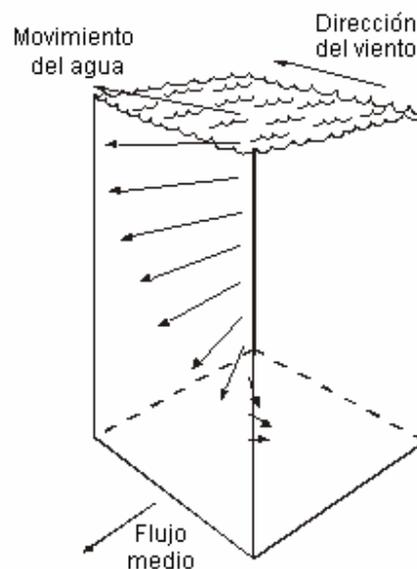


Figura 2.1.4.1. Variación de la dirección y velocidad de la corriente en la capa de Ekman en el hemisferio sur.

Ekman demostró que, en el supuesto de que la profundidad sea bastante grande para que el fondo no ejerza influencia alguna, la corriente toma en la superficie una dirección que forma un ángulo de  $45^\circ$  con el viento y que sigue siendo desviada a medida que disminuye su velocidad, de modo que al llegar a la profundidad en que la corriente se anula debido a la fricción, su dirección es opuesta en  $180^\circ$  a la de la superficie. La profundidad en que tiene lugar la inversión completa, es la profundidad de la capa de Ekman.

## CAPITULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de este trabajo se contó con series de tiempo de corrientes, temperatura, salinidad del agua y variación del nivel del mar, obtenidos de cuatro arreglos de correntómetros. Las mediciones se llevaron a cabo entre los meses de marzo y junio de 1997.

#### 3.1 MEDICIONES DE CAMPO

##### 3.1.1 Ubicación de los sitios de medición

La posición de los correntómetros y los instrumentos de medición del nivel del mar en el sur de la Bahía de Campeche (Fig. 3.1.1.1), están dadas en la tabla 3.1.1.1. Las posiciones fueron medidas en el campo con el sistema de posicionamiento global (GPS) del buque y la profundidad de las estaciones mediante ecosonda al arribar al sitio.

Tabla. 3.1.1.1. Coordenadas geográficas y profundidad total de los anclajes.

Estación	Ubicación geográfica	Latitud N	Longitud O	Prof. (m)
1	Cerca de Cayo Arcas, en la sección norte.	20° 08.035'	92° 02.601'	77.0
2	En el área de las plataformas petroleras de PEMEX, en la sección media.	19° 26.762'	92° 08.957'	51.3
3	Cerca del Puerto Dos Bocas, en la sección sureste.	18° 37.199'	93° 12.337'	28.0
4	Cerca de Laguna del Carmen, en la sección sur.	18° 32.868'	94° 01.216'	75.5

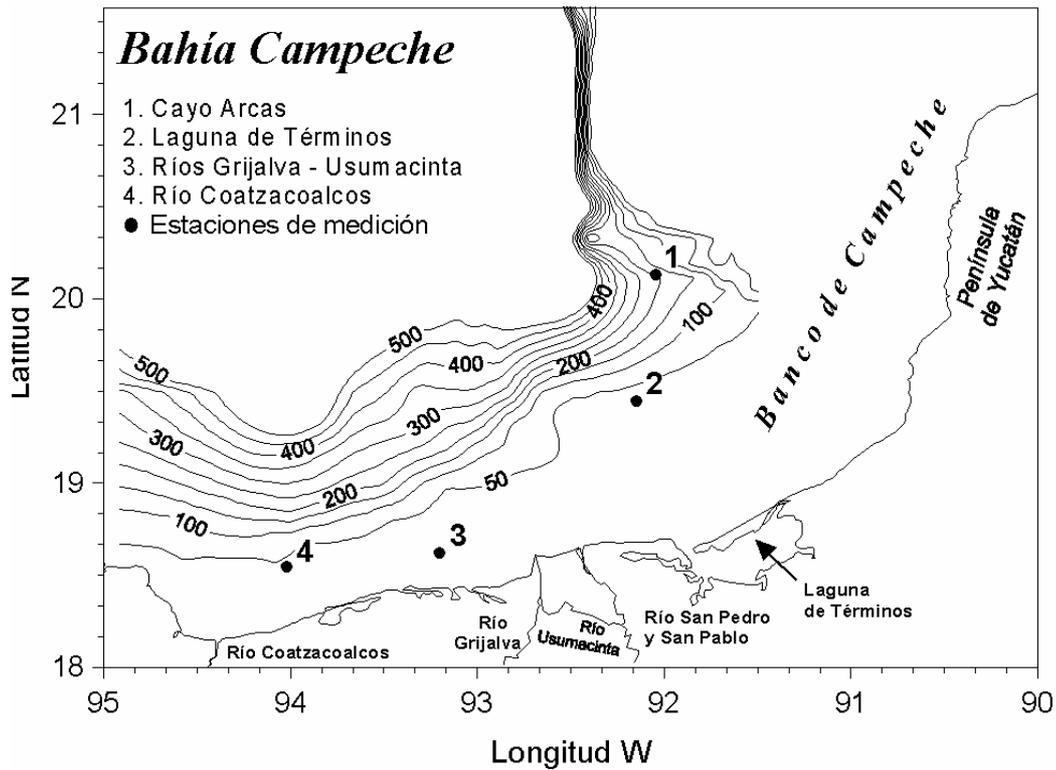


Figura 3.1.1.1. Ubicación de las estaciones.

### 3.1.2 Instrumentos

Fueron colocados un total de 12 instrumentos en los sitios de amarre. La velocidad de la corriente, dirección, temperatura, salinidad y presión hidrostática fueron medidas mediante el uso de dos correntómetros RCM-7 (Fig. 3.1.2.1), tres RCM-4 y cinco RCM-4S de la marca Aanderaa.

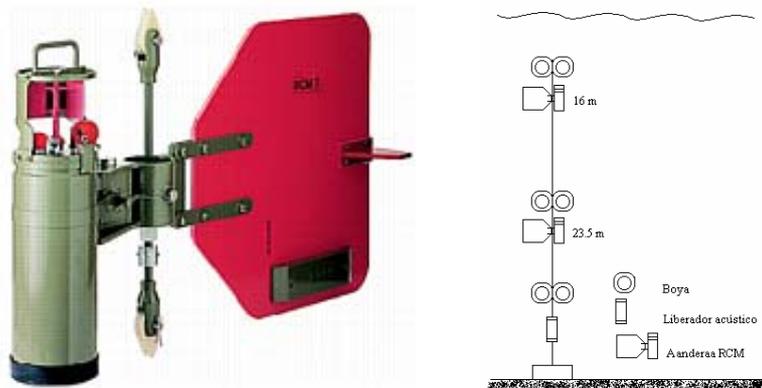


Figura 3.1.2.1. Correntómetro RCM-7 Aanderaa y esquema de instalación.

Tabla 3.1.2.1. Especificaciones técnicas de los correntómetros.

Parámetros	Especificaciones
Temperatura-Rango de Selección	Rango bajo: -2.46 a 21.48 °C Rango amplio: -0.34 a 32.17 °C Rango alto: 10.08 a 36.04 °C Resolución: 0.1% de rango de selección Incertidumbre: $\pm 0.05$ °C
Conductividad (opcional)	Rango: 0 a 74 mS/cm Resolución: 0.1% de rango Incertidumbre: +0.1 de rango
Dirección	Tipo de sensor: Compás magnético con aguja sujeta al anillo del potenciómetro. Resolución: 0.35° Incertidumbre: +5° para velocidades entre 5 y 100 cm/s. +7.5 ° para velocidades de corriente entre 2.5 a 5 cm/s
Velocidad	Tipo de sensor: Rotor con acoplamiento magnético Rango: 2 a 295 cm/s Incertidumbre: +1 cm/s o +2% de la velocidad real
Sistema Magnetofónico	Archivo DSU 2990 10900 Archivo DSU 2990OE 43600
Telemetría	Acústico 16.384 khz + 5Hz
Batería	Leclanche 821-9v 2.2 Ah Suficiente para 7716 datos (53 días para 10 min de intervalos). Lithium 3382-7.2v 10-14 Ah suficiente para 30835 datos (214 días para 10 min de intervalos).
Profundidad máxima	2000 metros

Las variaciones del nivel del mar fueron medidas en las estaciones 1 y 4 mediante el empleo de instrumentos Aanderaa WLR5 (Fig. 3.1.2.2) y WLR7. En las tablas 3.1.2.2, 3.1.2.3, 3.1.2.4 y 3.1.2.5 se muestran los despliegues de los instrumentos por estaciones.



Figura 3.1.2.2. Mareógrafo WLR5 Aanderaa.

Tabla 3.1.2.2. Instrumentos sobre la línea de amarre correspondiente a la estación 1, número de serie, profundidad, tiempos de comienzo de grabación e intervalo de medición.

Est.	Instrumento	Nº de serie	Prof.	Comienzo (GMT-6hr)	Intervalo
C1S	Aanderaa RCM-7	10330	36.5 m	10:40 / 06 / 03 / 1997	20 min.
C1B	Aanderaa RCM-4	2202	70.5 m	10:40 / 06 / 03 / 1997	20 min.
T1B	Aanderaa WLR5	1009	77.0 m	09:40 / 06 / 03 / 1997	20 min.

Tabla 3.1.2.3. Instrumentos sobre la línea de amarre correspondiente a la estación 2, número de serie, profundidad, tiempos de comienzo de grabación e intervalo de medición.

Est.	Instrumento	Nº de serie	Prof.	Comienzo (GMT-6hr)	Intervalo
C2S	Aanderaa RCM-7	10328	23.0 m	10:20 / 04 / 03 / 1997	20 min.
C2M	Aanderaa RCM-4S	3791	34.5 m	09:20 / 04 / 03 / 1997	20 min.
C2B	Aanderaa RCM-4	2203	44.5 m	09:20 / 04 / 03 / 1997	20 min.

Tabla 3.1.2.4. Instrumentos sobre la línea de amarre correspondientes a la estación 3, número de serie, profundidad, tiempos de comienzo de grabación e intervalo de medición.

Est.	Instrumento	Nº de serie	Prof.	Comienzo (GMT-6hr)	Intervalo
C3S	Aanderaa RCM-4S	8505	16.0 m	08:20 / 03 / 03 / 1997	20 min.
C3B	Aanderaa RCM-4S	8506	23.5 m	08:20 / 03 / 03 / 1997	20 min.

Tabla 3.1.2.5. Instrumentos sobre la línea de amarre correspondiente a la estación 4, número de serie, profundidad, tiempos de comienzo de grabación e intervalo de medición.

Est.	Instrumento	Nº de serie	Prof.	Comienzo (GMT-6hr)	Intervalo
C4S	Aanderaa RCM-4S	3711	17.3 m	13:40 / 01 / 03 / 1997	20 min.
C4M	Aanderaa RCM-4S	3713	47.5 m	13:40 / 01 / 03 / 1997	20 min.
C4B	Aanderaa RCM-4	2204	66.0 m	09:20 / 02 / 03 / 1997	20 min.
T4B	Aanderaa WLR-7	1340	75.5 m	13:20 / 01 / 03 / 1997	20 min.

Las series de tiempo en las tablas 3.1.2.2, 3.1.2.3, 3.1.2.4 y 3.1.2.5 están identificadas como se explica a continuación. Las series medidas por correntómetros comienzan con una “C”, y las series medidas con mareógrafos con una “T” de su palabra en inglés “Tide”. Estas letras están seguidas por el número de la estación (1 a 4). Finalmente, las series medidas cerca de la superficie terminan con una “S”, las medidas a media agua terminan con una “M” y las próximas al fondo con una “B” de bottom, en inglés.

### **3.1.3 Calidad y estadística de los datos**

Se realizó una inspección a los 20 minutos de obtención de datos originales mostrando lo siguiente:

- Las conductividades, y por consiguiente las salinidades en las estaciones C1B y C4B no fueron grabadas propiamente por los instrumentos en ellas localizados. Estos instrumentos fueron originalmente comprados con sensores de conductividad cuyo rango estaba por debajo de las conductividades encontradas en el Golfo de México. Los equipos fueron prestados por la Universidad de Québec en Canadá.
- Los sensores de presión de los correntómetros ubicados en las estaciones C1B, C2M, C2B, C3S, C3B, C4S, C4M y C4B no funcionaron correctamente y al parecer quedaron bloqueados; por lo que los datos de variación de la superficie libre de estas estaciones no fueron confiables.
- Muchos instrumentos registraron velocidades de la corriente de 0 cm s<sup>-1</sup> en varios intervalos. En varios casos, por la deposición de carbonato de calcio o la acumulación de micro-algas en el rotor propiciaron que este fuera detenido completamente, registrando velocidades de 0 cm s<sup>-1</sup>. En algunos instrumentos, las velocidades de 0 cm s<sup>-1</sup> aparecen solo al final de las grabaciones, lo que probablemente pueda estar ocasionado por la disminución del voltaje en las baterías. Las series con mayores

huecos en las mediciones de velocidad de la corriente son C2B, C3B, y C4B. Estas series fueron medidas cerca del fondo, donde las corrientes son más débiles y las aguas contienen más sedimentos finos en suspensión.

### 3.1.4 Estructura de los datos

La información original fue almacenada en archivos ASCII, obteniéndose un total de 12 archivos de datos, cada uno corresponde a un instrumento, 10 archivos de correntómetros y 2 de mareógrafos.

## 3.2 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

1. Los datos se limpiaron para eliminar los errores obtenidos al comienzo y final de la serie, los cuales corresponden al momento del anclaje y a la recuperación del equipo.
2. Posteriormente se representaron gráficamente en forma escalar (x, y), lo que permitió detectar las componentes esenciales en la serie como puntos o valores que se escapan de lo normal producto a un comportamiento anormal del fenómeno (sin incidencias futuras) o a un error de medición.
3. Los datos se filtraron mediante un promedio para eliminar las altas frecuencias de la serie. Lo que se busca con esto es definir a partir de la serie observada una nueva serie que suaviza los efectos ajenos a la tendencia (estacionalidad, efectos aleatorios). El método consiste primeramente en suavizar los datos tomados cada 20 minutos en cada serie de tiempo, usando el promedio móvil descrito por Godin (1972). Considerando una serie de tiempo  $Z(i)$ ,  $Z=1, \dots, N$ , para un intervalo de tiempo de 20 minutos, esta operación está definida como:

$$X(i) = \frac{(Z(i) + Z(i+1) + Z(i+2))}{3} \quad i = 1, \dots, N-2$$
$$Y_j = \frac{(X_j + X(j+1) + X(j+2))}{3} \quad j = 1, \dots, N-4 \quad (9)$$
$$Z_k = \frac{(Y_k + Y(k+1) + Y(k+2) + Y(k+3))}{4} \quad k = 1, \dots, N-7$$

4. A las series se le aplicó análisis espectral mediante Transformada Rápida de Fourier. El objetivo de este análisis es conocer los períodos característicos de las oscilaciones de los parámetros observados.
5. Las series obtenidas en (3) se filtraron mediante un filtro pasa bajas de Lanczos para separar los eventos asociados a los diferentes procesos. Estos fueron dos conjuntos de series, uno con procesos cuyas frecuencias corresponden a mareas y mayores, y otro con frecuencias menores.
6. Con los resultados de (5) se repitió el procedimiento (2). A estas series se les aplicó nuevamente el análisis espectral.

### 3.2.1 Frecuencias de variación de las direcciones de la corriente

Para mostrar la información sobre las distribuciones de velocidad y la frecuencia de variación de las direcciones de la corriente, se representaron gráficamente las rosas de corrientes basadas en los datos de magnitud y dirección.

La rosa se dividió en 16 sectores, abarcando cada uno  $22.5^\circ$ , proporcionándonos información sobre las velocidades y las frecuencias relativas de los parámetros en diferentes direcciones, es decir, que porcentaje del tiempo la corriente mantuvo esa dirección.

Cabe mencionar, que a diferencia de las rosas de vientos, que dan información de la dirección desde donde sopla el viento, las rosas de corrientes proporcionan información de hacia donde se dirige la corriente, o sea, el viento entra a la rosa y la corriente sale de la rosa.

### **3.2.2 Análisis espectral mediante Transformada Rápida de Fourier (FFT)**

Con el objetivo de conocer los períodos característicos y los máximos de densidad espectral de las oscilaciones de los parámetros observados, se efectuó análisis espectral a las series obtenidas, usando Transformada Rápida de Fourier (FFT), (Anguiano-Rojas, 1996; Alejandro-Nava, 2002), (Anexo II).

### **3.2.3 Análisis espectral mediante Transformada de Wavelet**

La descomposición de series de tiempo en tiempo y frecuencia permite identificar la variabilidad de los procesos dominantes y como estos varían en el tiempo. Esto puede hacerse usando el método de Transformada Rápida de Fourier o Transformada de Wavelet. Sin embargo, una limitación del método estándar mediante Transformada de Fourier es que no proporciona una localización exacta de la frecuencia en el tiempo, como tampoco detecta bien eventos espaciados de forma irregular o no estacionarios (Smith *et al.*, 1998). Una ventaja de usar la transformada de Wavelet es que proporciona la localización en el dominio del tiempo de las diferentes componentes en frecuencia presentes en una señal dada, además de detectar procesos o eventos no estacionarios; por lo que se hace este análisis como complemento del método aplicado con Transformada Rápida de Fourier, (Paulin-Coulibaly, 2004).

### 3.2.4 Análisis armónico

A los datos obtenidos se les realizó análisis armónico para conocer la variabilidad y características principales de las oscilaciones. Para una adecuada descripción del método ver Anguiano-Rojas (1996), (Anexo II).

Para clasificar las mareas se calculó el número de forma ( $F$ ) de Dietrich *et al.* (1975):

$$F = \frac{O_1 + K_1}{S_2 + M_2} \quad (10)$$

donde  $O_1$ ,  $K_1$ ,  $S_2$  y  $M_2$  son las amplitudes de las principales componentes que forman la marea.

Con base en el valor del número de forma la clasificación de las mareas es tal que:

si  $0 \leq F \leq 0.25$ , se tiene marea semidiurna,

si  $0.25 < F \leq 1.50$ , se tiene marea mixta con dominancia semidiurna,

si  $1.50 < F \leq 3.00$ , se tiene marea mixta con dominancia diurna,

si  $F > 3.00$ , se tiene marea de tipo diurno.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1 EVOLUCIÓN DE LAS SERIES DE TIEMPO

Las figuras 4.1.1 y 4.1.2 muestran la evolución de las series de tiempo de los parámetros registrados en las estaciones de superficie (C1S) y fondo (C1B), correspondientes al anclaje ubicado cerca de Cayo Arcas, en la sección norte (Fig. 3.1.1.1). Las gráficas muestran la evolución de la magnitud de la corriente de las componentes U y V, la temperatura del agua, la salinidad y la presión.

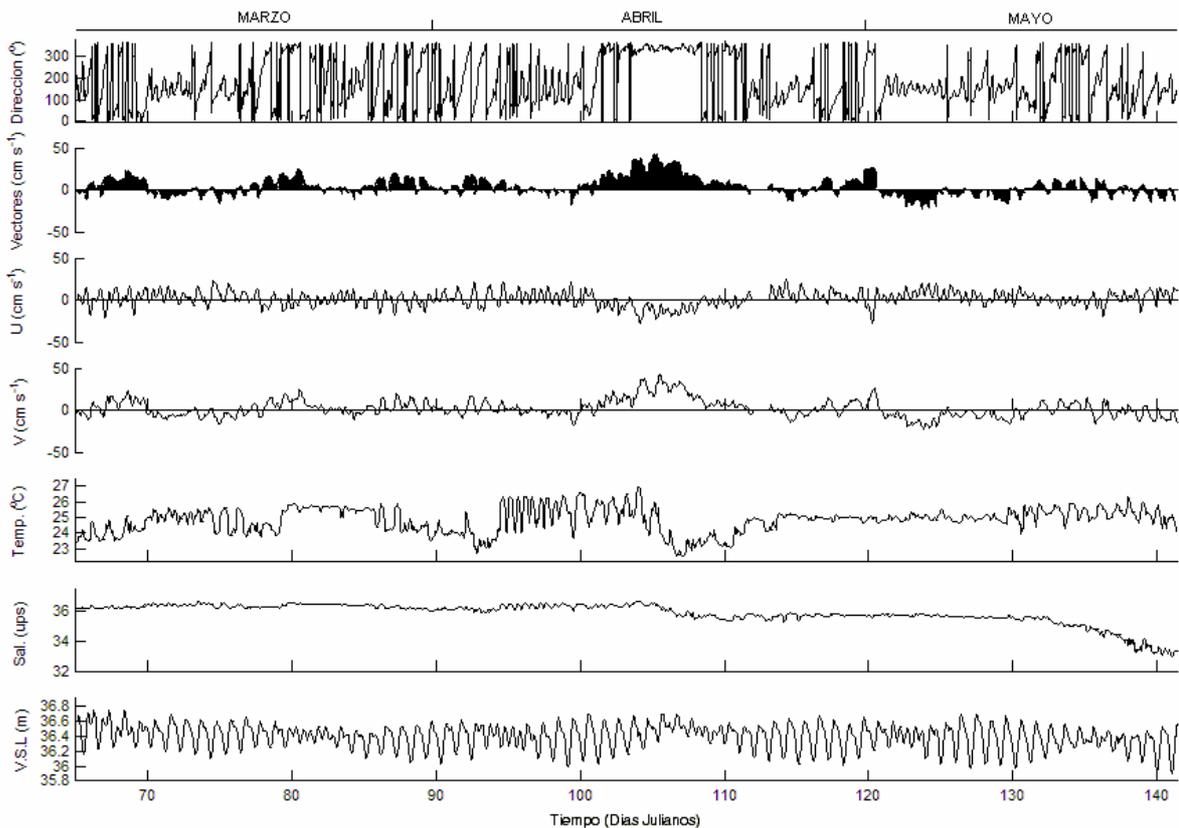


Figura 4.1.1. Evolución de series de tiempo de dirección de la corriente, componentes U y V, temperatura del agua, salinidad y variación de la superficie libre de la estación 1 en superficie, ubicada a 36.5 m de profundidad.

En la estación de superficie (C1S) la magnitud de la corriente en U tuvo una variación entre 25 y 28  $\text{cm s}^{-1}$ , presentando los máximos en los meses de abril y mayo. Para la componente V, la velocidad varió entre 42 y  $-22 \text{ cm s}^{-1}$ , con el valor máximo en el mes de abril. En la estación de fondo (C1B) el período de registro duró de marzo a abril, con magnitudes de las corrientes mucho menores. La evolución de la temperatura del agua, presentó una gran variabilidad en el mes de abril, con oscilaciones entre 22.4 y 27°C en superficie y 21.7 y 24.4 °C en fondo. En superficie la salinidad tuvo una tendencia negativa, alcanzando el valor mínimo de 33 ups hacia finales de mayo. En el fondo no se pudo apreciar la evolución de la salinidad por errores en el registro de la conductividad. Los datos de presión para la estación C1B no se pudieron analizar por errores en los registros.

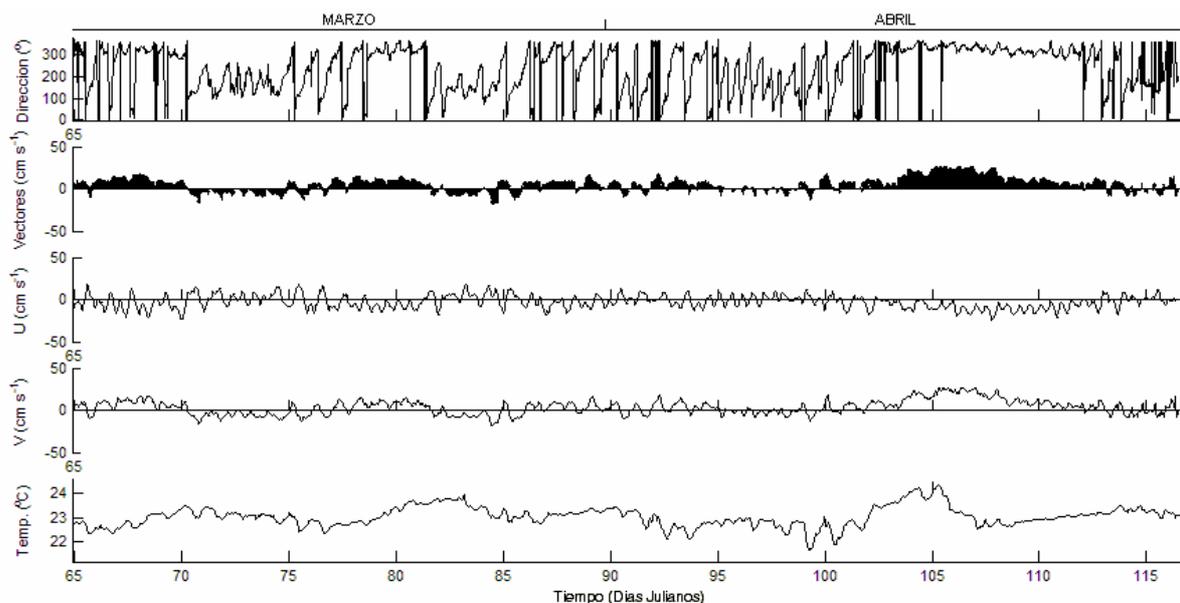


Figura 4.1.2. Evolución de series de tiempo de dirección de la corriente, componentes U, V y temperatura del agua de la estación 1 en fondo, ubicada a 70.5 m de profundidad.

En las estaciones C2S, C2M y C2B (Fig. 4.1.3, 4.1.4 y 4.1.5 respectivamente), ubicadas en el área de las plataformas petroleras de PEMEX (Fig. 3.1.1.1), se encontró mucha similitud en las gráficas de evolución de las series de tiempo de temperatura. En las estaciones C2S y C2M, de principios de marzo a los 10 primeros días de abril se observó una tendencia positiva, mientras que para este mismo período, la estación C2B presentó una tendencia negativa para luego experimentar un descenso brusco de la temperatura en toda la columna de agua,

registrándose para el mes de abril el mínimo de temperatura con un valor de 22 °C en superficie y 22.3 °C en el fondo. Este mismo descenso de temperatura se pudo apreciar en la estación C1S. Para este mismo período se registró el mínimo de salinidad con valores de 29, 33.9 y 25 ups en superficie, medio y fondo respectivamente. La magnitud de la corriente, tanto para las componentes U como V presentaron sus máximos valores en este mismo período, registrándose cerca de 40 cm s<sup>-1</sup> para la componente U y cerca de 30 cm s<sup>-1</sup> para la componente V.

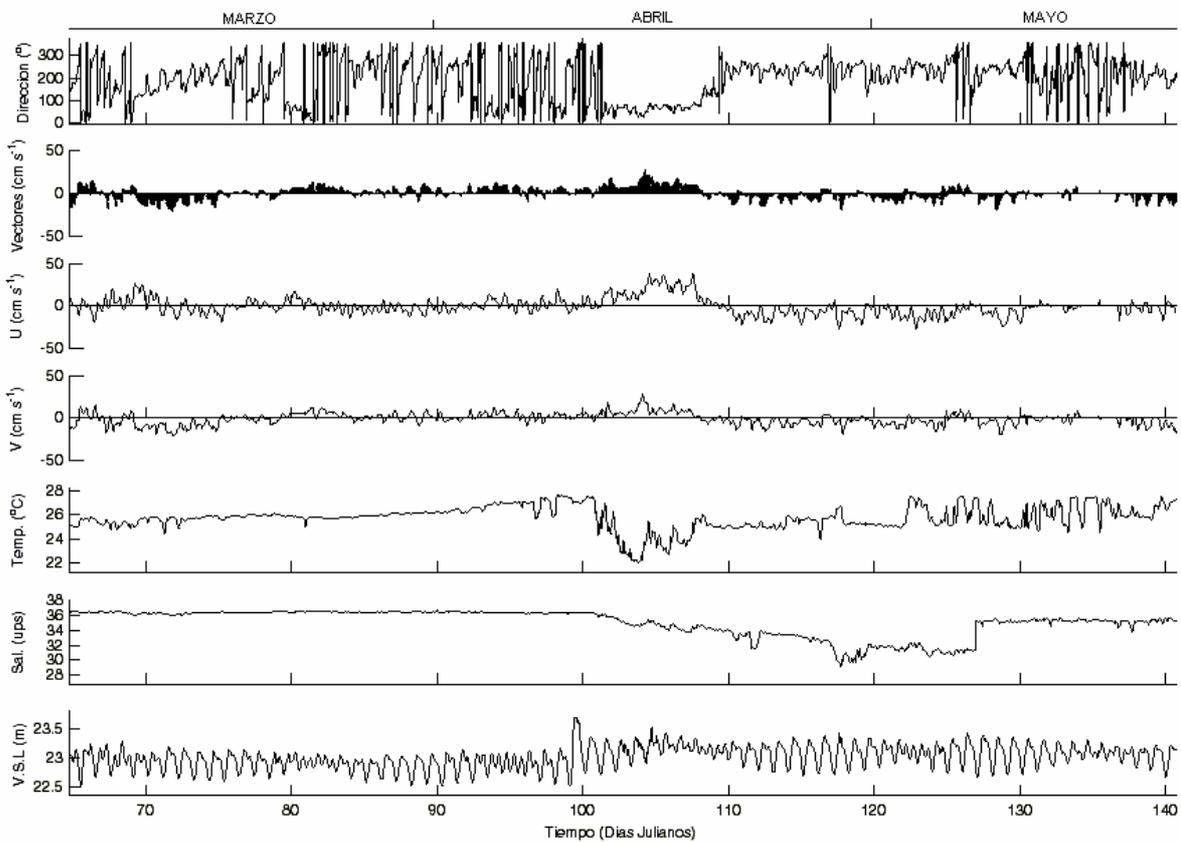


Figura 4.1.3. Evolución de series de tiempo de dirección de la corriente, componentes U y V, temperatura del agua, salinidad y variación de la superficie libre de la estación 2 en superficie, ubicada a 23 m de profundidad.

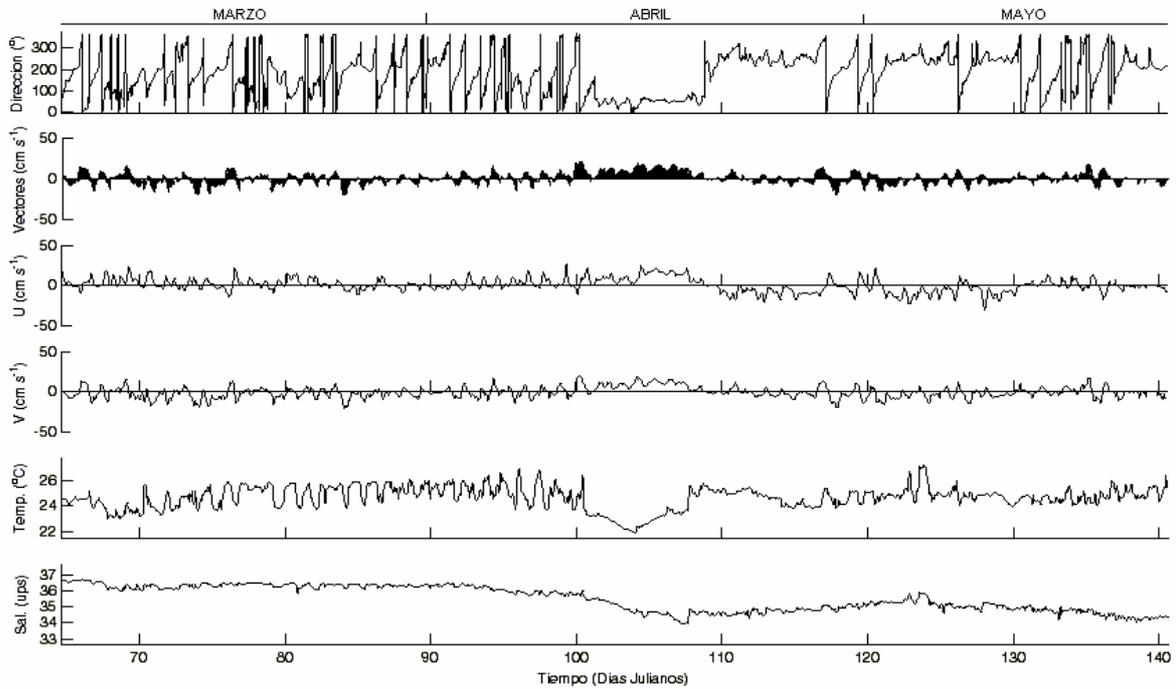


Figura 4.1.4. Evolución de series de tiempo de dirección de la corriente, componentes U y V, temperatura del agua y salinidad de la estación 2 en media agua, ubicada a 34.5 m de profundidad.

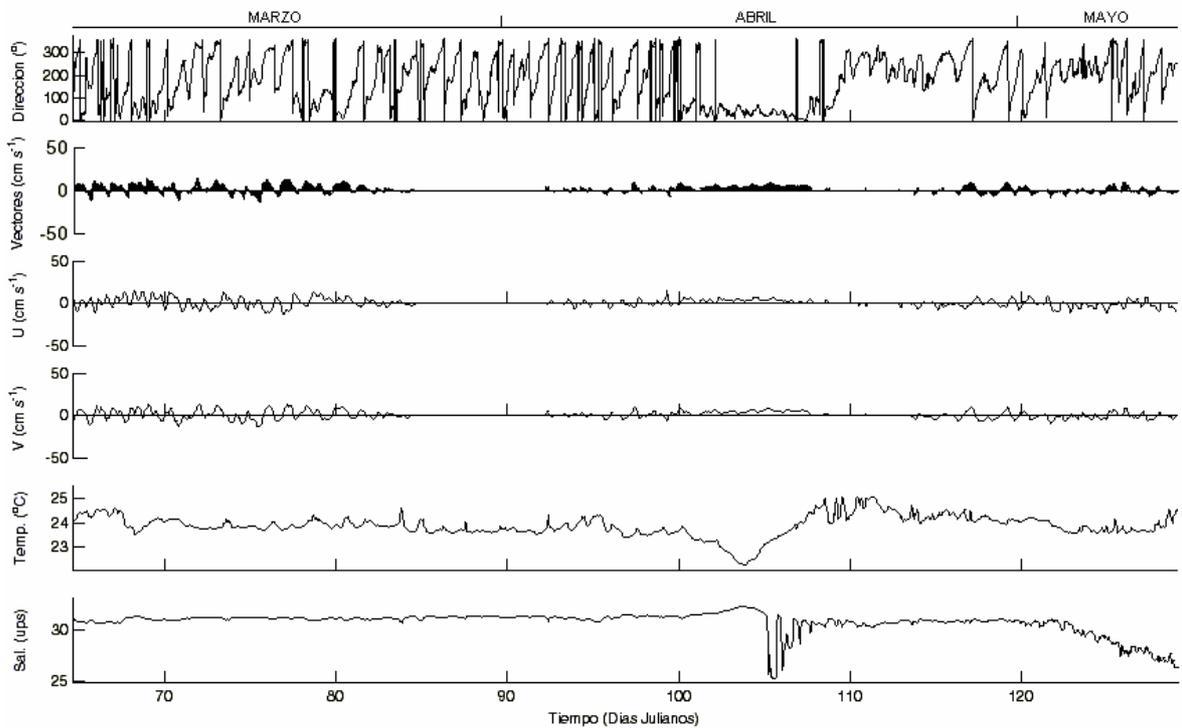


Figura 4.1.5. Evolución de series de tiempo de dirección de la corriente, componentes U y V, temperatura del agua y salinidad de la estación 2 en fondo, ubicada a 44.5 m de profundidad.

Las figuras 4.1.6 y 4.1.7 corresponden a la estación 3 en superficie y fondo respectivamente, ubicadas cerca del puerto Dos Bocas, en la sección sureste (Fig. 3.1.1.1).

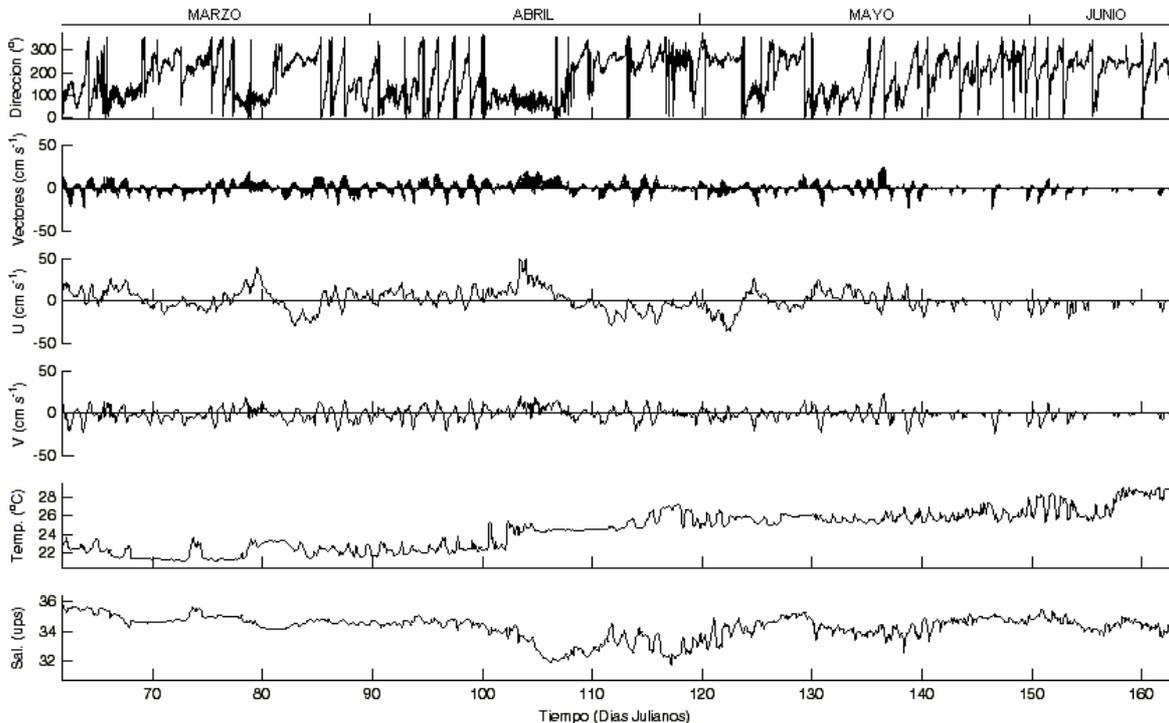


Figura 4.1.6. Evolución de series de tiempo de dirección de la corriente, componentes U y V, temperatura del agua y salinidad de la estación 3 en superficie, ubicada a 16 m de profundidad.

La magnitud de la corriente presentó su máximo en el primer cuadrante, con valores de  $50 \text{ cm s}^{-1}$  en superficie para la componente U a mediados de abril. Lo mismo sucedió en la estación de fondo, pero con valores cercanos a los  $40 \text{ cm s}^{-1}$ .

La evolución de la temperatura en ambas estaciones se comportó con la misma tendencia, observándose los mayores valores en superficie. Los mínimos se presentaron en marzo, con valores en superficie y fondo cercanos a  $21.2 \text{ }^\circ\text{C}$ . El máximo en superficie se registró en el mes de junio, con un valor de  $29 \text{ }^\circ\text{C}$  y en fondo a mediados del mes de mayo con valores cercanos a  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ . La salinidad se comportó con una tendencia muy similar tanto en superficie como en fondo, presentando los mínimos en los primeros días del mes de abril, como se observó en la estación 2. El mínimo registrado en superficie fue de  $31.7 \text{ ups}$  y en fondo de  $32.3 \text{ ups}$ .

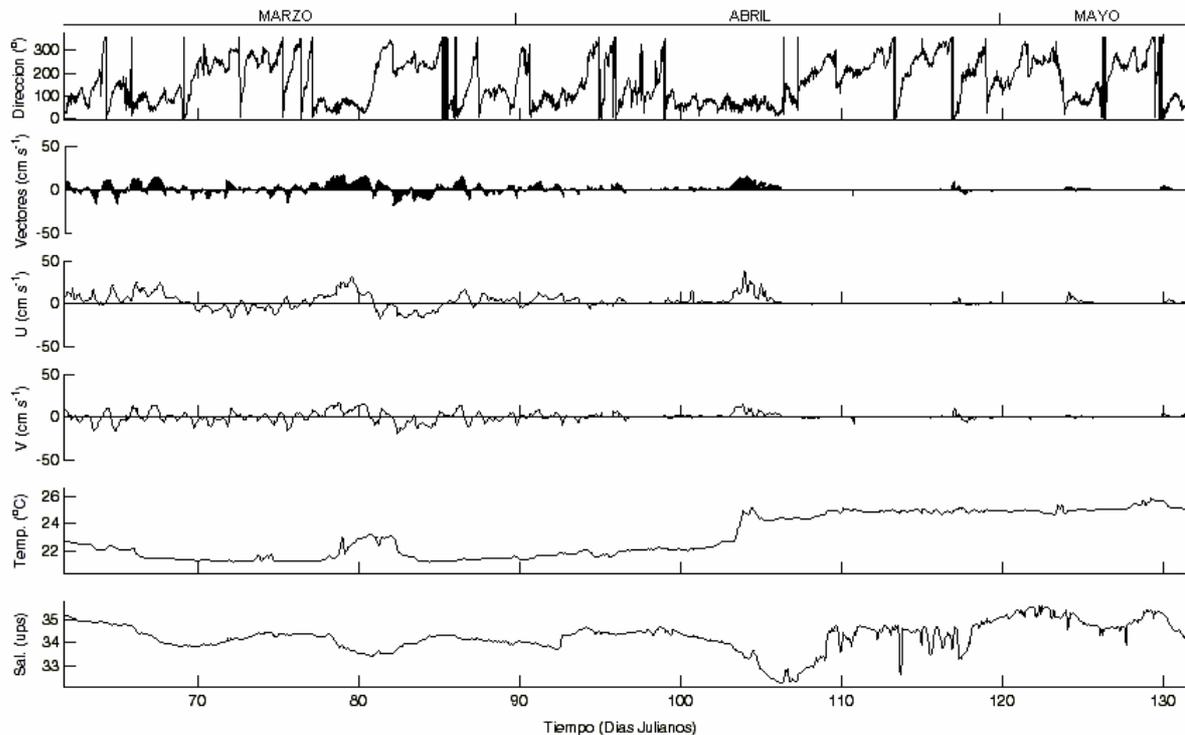


Figura 4.1.7. Evolución de series de tiempo de dirección de la corriente, componentes U y V, temperatura del agua y salinidad de la estación 3 en fondo, ubicada a 23.5 m de profundidad.

Las estaciones C4S, C4M y C4B (Figuras 4.1.8, 4.1.9 y 4.1.10 respectivamente), al igual que las estaciones C3S y C3B presentaron los valores máximos de magnitud de la corriente en el mes de abril, con velocidades de 100, 85 y 50  $\text{cm s}^{-1}$  en superficie, medio y fondo respectivamente en dirección este para la componente U. En la componente V, para el mismo instante, se registraron velocidades de 40  $\text{cm s}^{-1}$  en superficie y medio y cercanas a 30  $\text{cm s}^{-1}$  en el fondo con dirección norte. El mínimo de temperatura promedio fue 20.5 °C en la columna de agua y los máximos fueron 26.5 °C en superficie para finales de mayo y 25.7 y 25.5 °C en medio y fondo respectivamente para principios de abril.

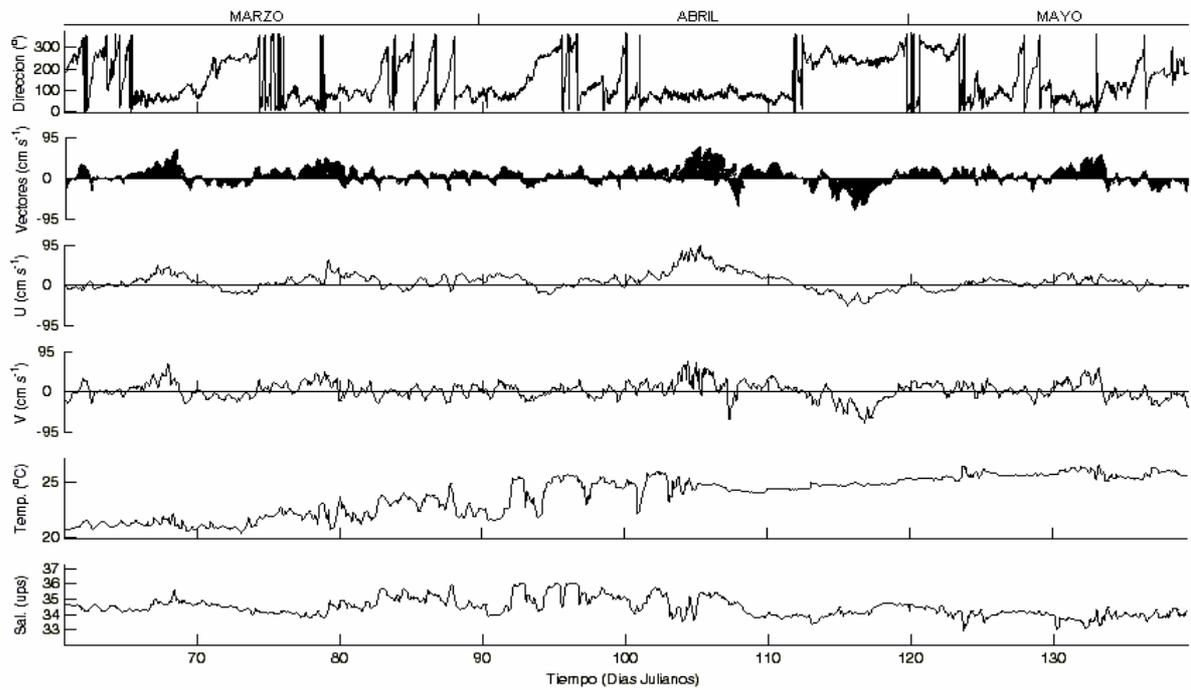


Figura 4.1.8. Evolución de series de tiempo de dirección de la corriente, componentes U y V, temperatura del agua y salinidad de la estación 4 en superficie, ubicada a 17.3 m de profundidad.

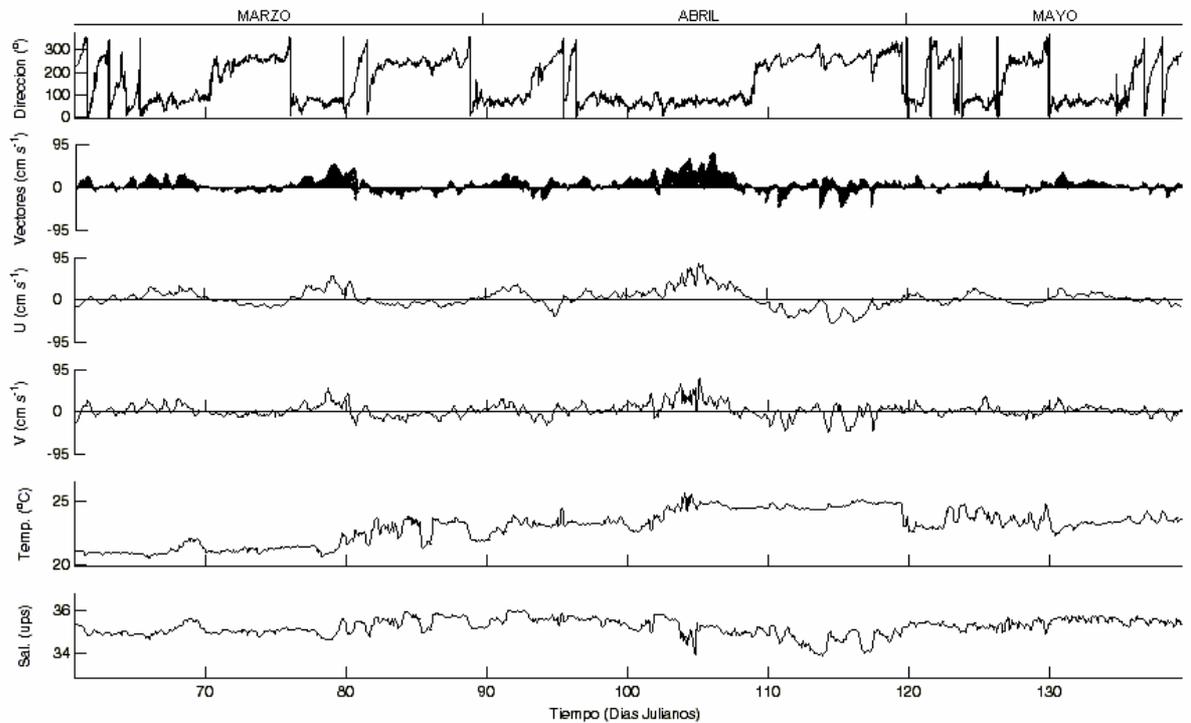


Figura 4.1.9. Evolución de series de tiempo de dirección de la corriente, componentes U y V, temperatura del agua y salinidad de la estación 4 en media agua, ubicada a 47.5 m de profundidad.

La salinidad presentó sus máximos de 36 ups en superficie y medio y 35.5 ups en fondo para finales de marzo y principios de abril. El valor mínimo en superficie fue de 33 ups para el mes de mayo y cerca de 34 y 30 ups en medio y fondo respectivamente para el mes de abril.

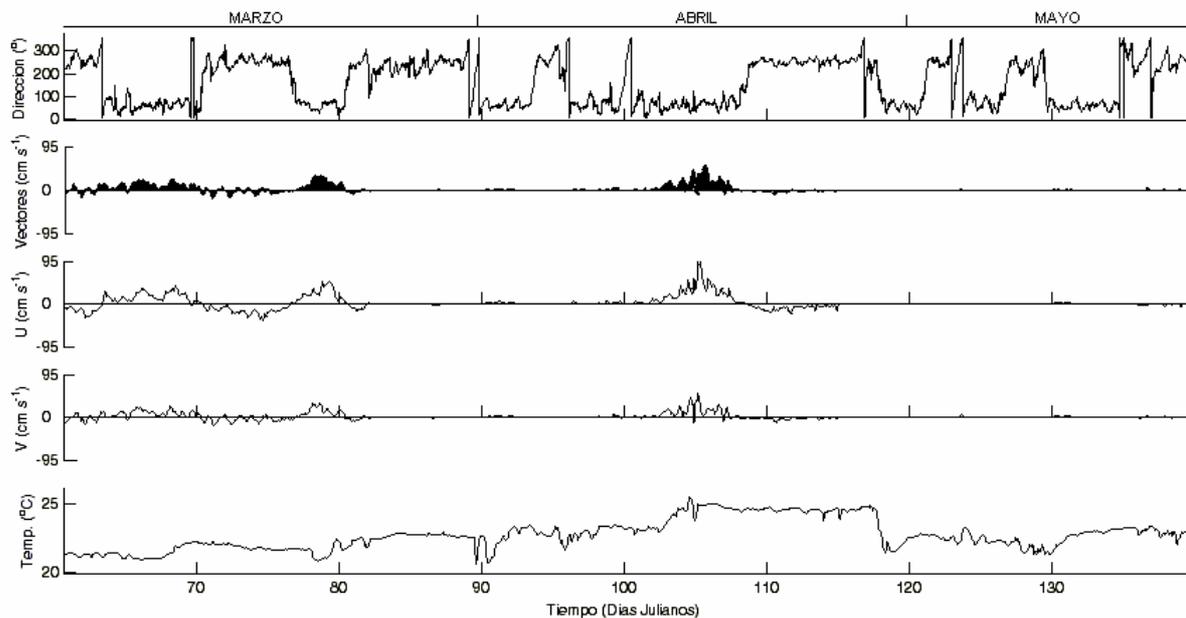


Figura 4.1.10. Evolución de series de tiempo de dirección de la corriente, componentes U, V y temperatura del agua de la estación 4 en fondo, ubicada a 66 m de profundidad.

La evolución de la temperatura que muestran las figuras 4.1.11 y 4.1.12, corresponden a las estaciones mareográficas T1B y T4B. Estas son similares a las registradas por los correntómetros de las estaciones C1B y C4B respectivamente. La estación C1B sólo registró por un período de 52 días aproximadamente y la T1B de 75 días; registrándose un mínimo de 20.5 °C para el mes de mayo, inferior al mínimo registrado en la estación C1B para el mes de abril. En la estación T4B el mínimo de temperatura registrado fue de 19.1 °C para finales de marzo y principios de abril, mientras que los máximos se comportan igual que en la estación C4B.

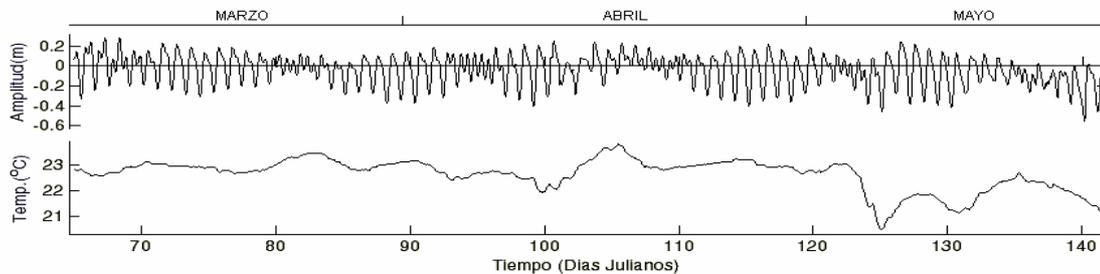


Figura 4.1.11. Evolución de series de tiempo de temperatura del agua y registro de marea de la estación 1 a 77 m de profundidad.

Se puede observar en las gráficas de marea amplitudes máximas cercanas a 0.6 m en bajamar para finales de abril y 0.3 m en pleamar a mediados de marzo para la estación T1B. En la estación T4B las amplitudes máximas se registraron para mediados de marzo, principios de abril y mediados de mayo con valores de 0.55 m en pleamar y 0.35 m en bajamar para finales de abril.

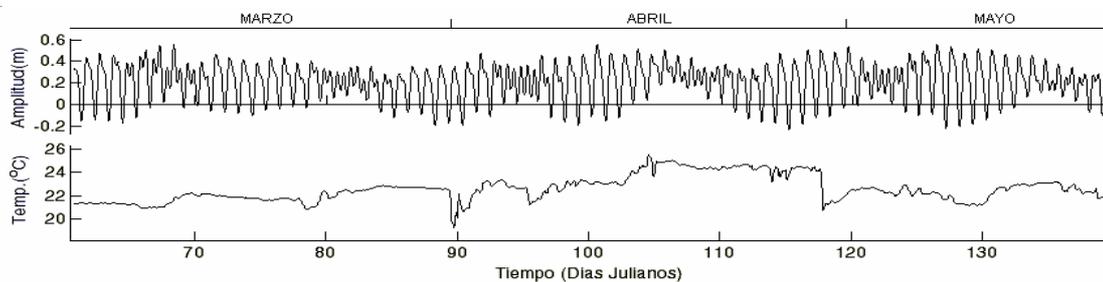


Figura 4.1.12. Evolución de series de tiempo de temperatura del agua y registro de marea de la estación 4 a 75.5 m de profundidad.

En las figuras (4.1.13, 4.1.14, 4.1.15 y 4.1.16) se observa la evolución de la rapidez y dirección de la corriente durante el período de muestreo para cada estación.

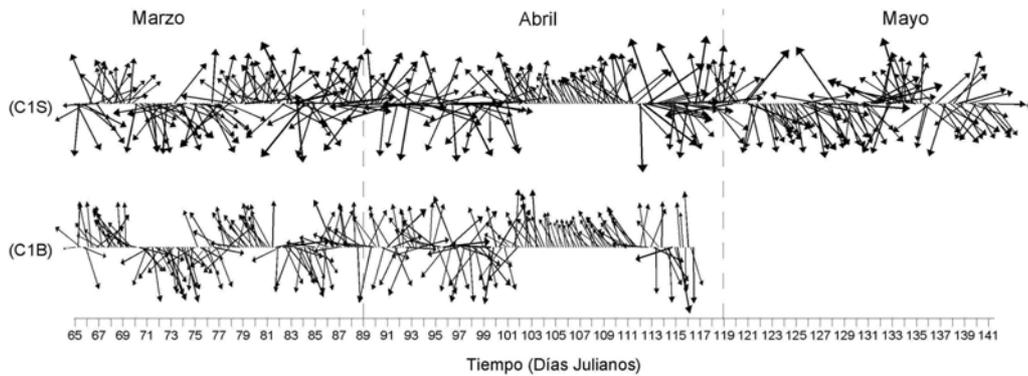


Figura 4.1.13. Evolución de la velocidad y dirección de la corriente en la estación 1.

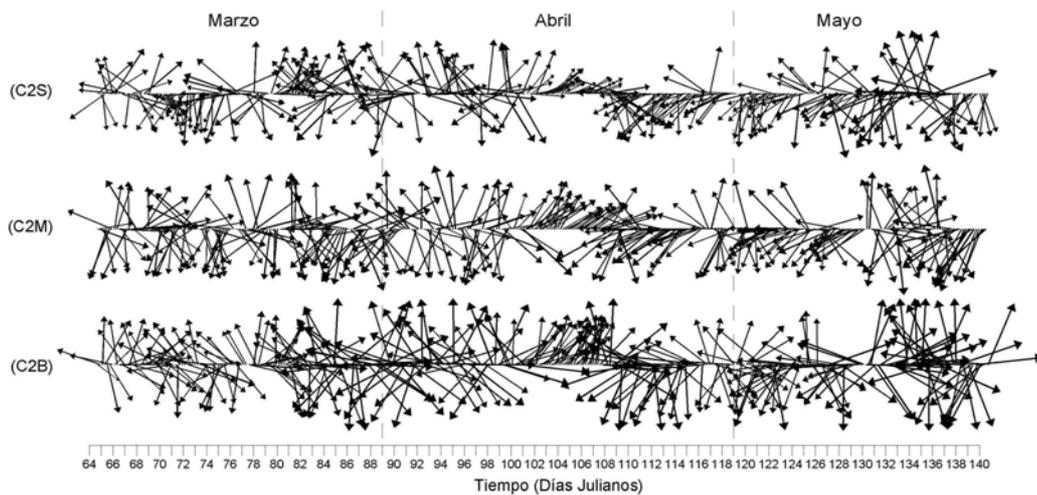


Figura 4.1.14. Evolución de la velocidad y dirección de la corriente en la estación 2.

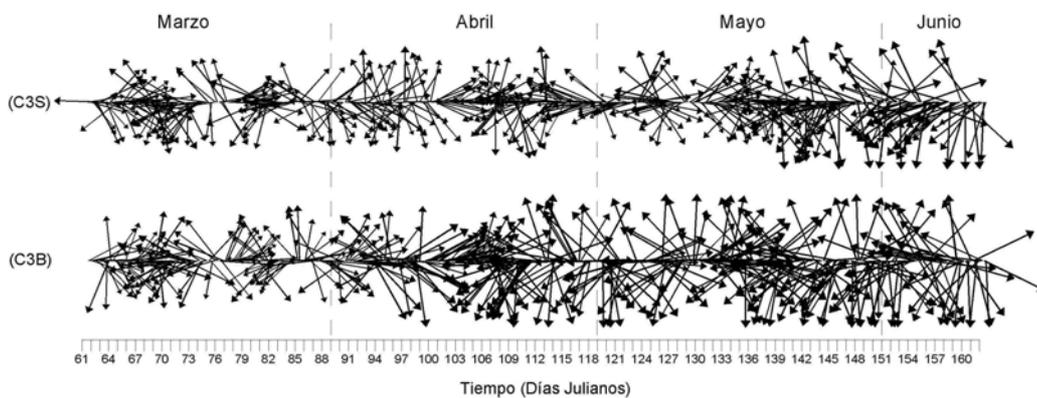


Figura 4.1.15. Evolución de la velocidad y dirección de la corriente en la estación 3.

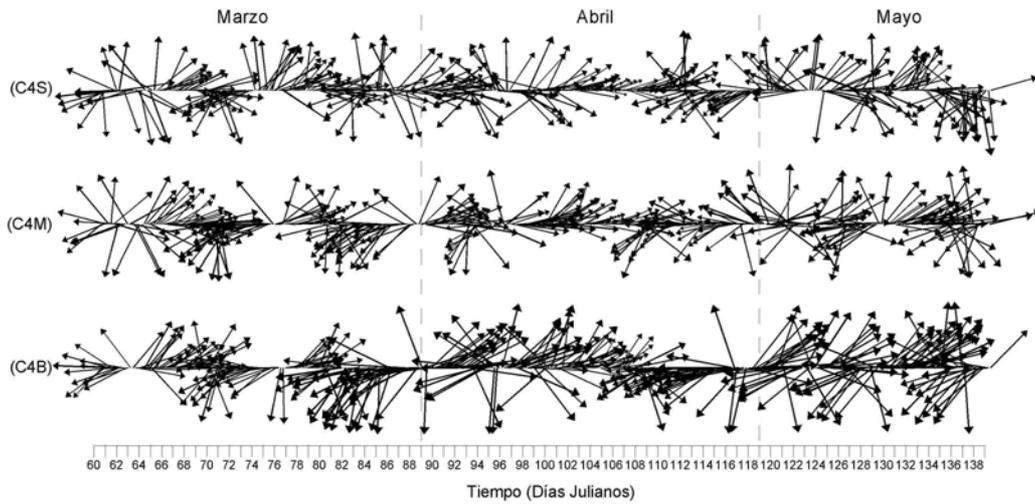


Figura 4.1.16. Evolución de la velocidad y dirección de la corriente en la estación 4.

Para entender mejor el comportamiento de la dirección y las velocidades de la corriente se elaboraron diagramas de vectores progresivos. En los diagramas de vectores se observaron oscilaciones de marea que no pueden describir trayectorias cerradas debido al efecto de la componente generada por el viento. Estas oscilaciones pueden apreciarse más claramente en el mes de marzo y finales de mayo. Para el mes de abril la trayectoria de las corrientes fue generalmente más uniforme y se observa menos influencia de la marea que en los demás meses.

Las trayectorias descritas por las corrientes son muy diferentes para cada estación y no se observa un patrón de circulación uniforme, lo que nos indica que las corrientes en la Bahía de Campeche están siendo forzadas la mayor parte del tiempo por agentes externos como el viento. A partir de las figuras 4.1.17 y 4.1.18 podemos hacer una comparación de la evolución de las componentes U y V del viento y la corriente. Los datos de viento corresponden a los registrados en las estaciones más cercanas a los sitios de mediciones de corrientes, situadas en la zona costera, facilitados por PEMEX (PEP-UNAM, 1999). A pesar de que las estaciones meteorológicas se encuentran muy retiradas de las estaciones oceanográficas se observa una alta relación entre las intensidades de ambas variables.

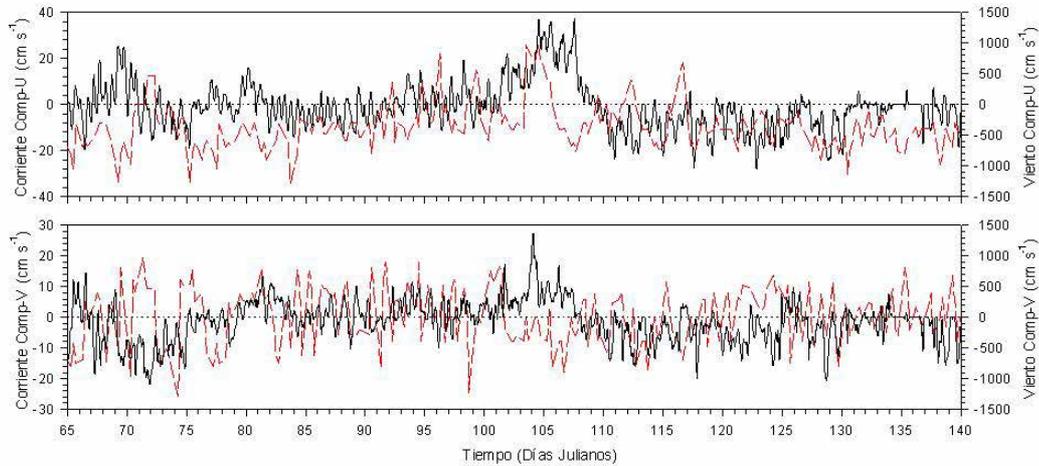


Figura 4.1.17. Evolución de las componentes U y V de las series de tiempo de corrientes (línea continua) de la estación C2S y viento (línea discontinua) de la estación de Cd. Del Carmen. Período comprendido del 6 de marzo al 21 de mayo de 1997.

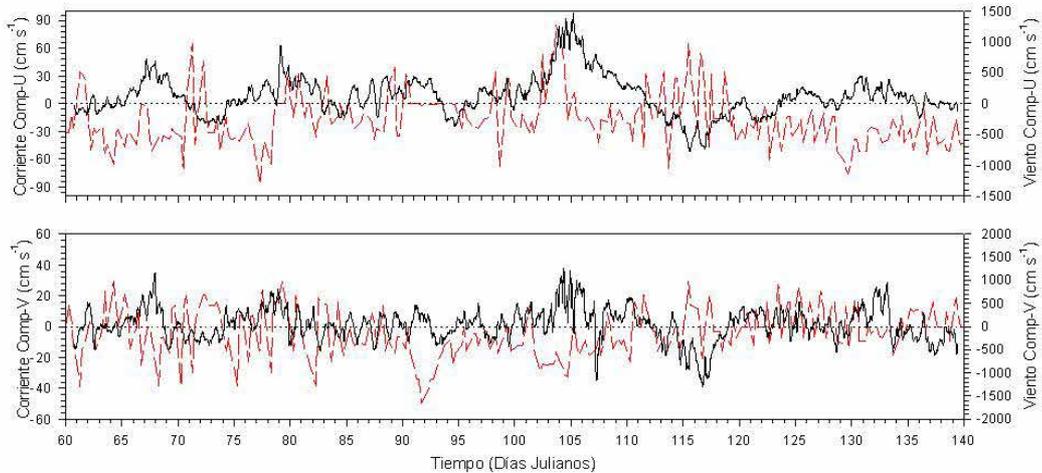


Figura 4.1.18. Evolución de las componentes U y V de series de tiempo de corrientes (línea continua) de la estación C4S y viento (línea discontinua) de la estación de Dos Bocas. Período comprendido del 2 de marzo al 20 de mayo de 1997.

En los diagramas de vectores progresivos de las figuras 4.1.20, 4.1.21 y 4.1.22 se observan oscilaciones que, por la escala de tiempo parecen ser inerciales. Utilizando dos conocidas fórmulas de la oceanografía dinámica, se calcularon el radio del círculo de inercia y el período inercial para cada caso.

$$R = (C/f), \quad T = (2\pi R/C) = (2\pi/f) \quad (11)$$

Donde:

$R$  = Radio del círculo de inercia.

$T$  = Período inercial.

$C$  = Velocidad de la corriente.

$f = 2\Omega \text{ sen } \varphi$ , (Parámetro de Coriolis),

$\Omega = 2\pi/24 \text{ hr.}$

$\varphi$  = Latitud.

En la estación C2B (Figura 4.1.20), se observan dos oscilaciones para el mes de marzo, los resultados arrojan valores de 0.8 y 1.1 km de radio para el círculo de inercia y 36 h para el período de revolución de dichos círculos. En la estación C3S (Figura 4.1.21) se observa una oscilación en marzo y otra en mayo; los radios de los círculos de inercia arrojan valores de 1.4 y 1.7 km respectivamente, mientras que el período de la oscilación para esta estación es de 37.5 h. En la estación C4S (Figura 4.1.22) también se observaron dos oscilaciones, una en marzo y otra en abril, con radios de 2.8 y 2.4 km, respectivamente y un período de revolución de 37.7 h. El diagrama de vectores progresivos de la estación C4M (Figura 4.1.22) muestra tres oscilaciones entre los meses de marzo y abril, con radios de inercia de 2.6, 4.4 y 2.4 km, respectivamente para un período de 37.7 h.

Los períodos calculados anteriormente corresponden a los períodos teóricos, dependiendo de la latitud. Analizando más a fondo los datos y las gráficas, se calcularon los tiempos reales en que cada giro observado describe la trayectoria completa. Estos realmente tienen períodos de tiempo mayores a los calculados teóricamente, pero se debe tener en cuenta que no todo el giro tiene que corresponder a una oscilación inercial. Las mediciones realizadas en este caso son del tipo euleriano y podemos observar cambios en la dirección de las corrientes debido a procesos inerciales, mientras que el resto puede ser forzado.

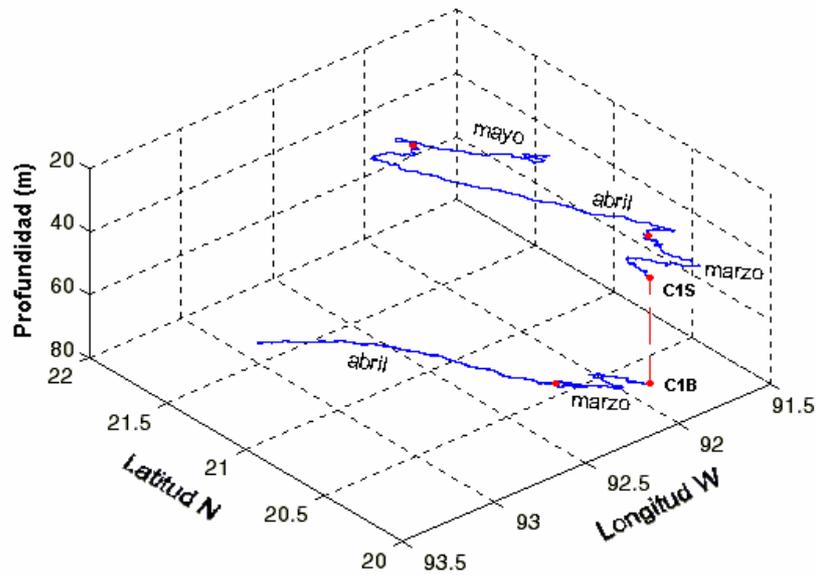


Figura 4.1.19. Diagramas de vectores progresivos de corrientes de la estación 1. Los puntos rojos sobre la línea discontinua indican la posición de las estaciones e inicio de la serie. El resto de los puntos rojos indica el cambio de mes.

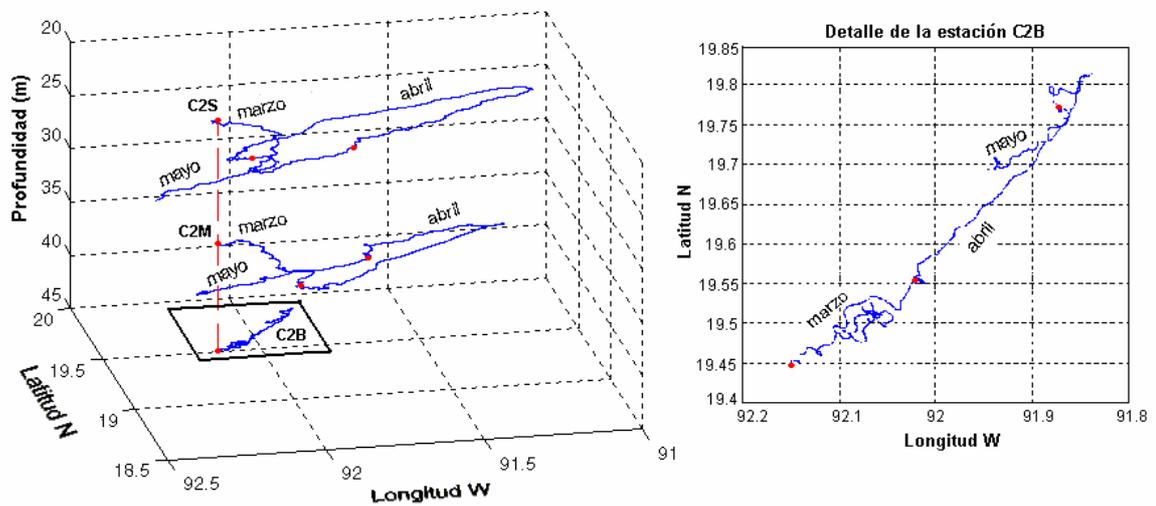


Figura 4.1.20. Diagramas de vectores progresivos de corrientes de la estación 2. Los puntos rojos sobre la línea discontinua indican la posición de las estaciones e inicio de la serie. El resto de los puntos rojos indica el cambio de mes.

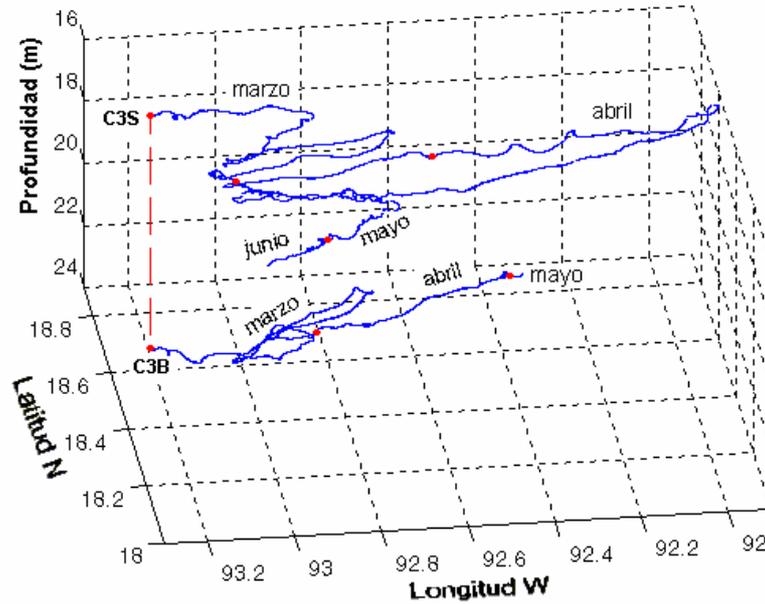


Figura 4.1.21. Diagramas de vectores progresivos de corrientes de la estación 3. Los puntos rojos sobre la línea discontinua indican la posición de las estaciones e inicio de la serie. El resto de los puntos rojos indica el cambio de mes.

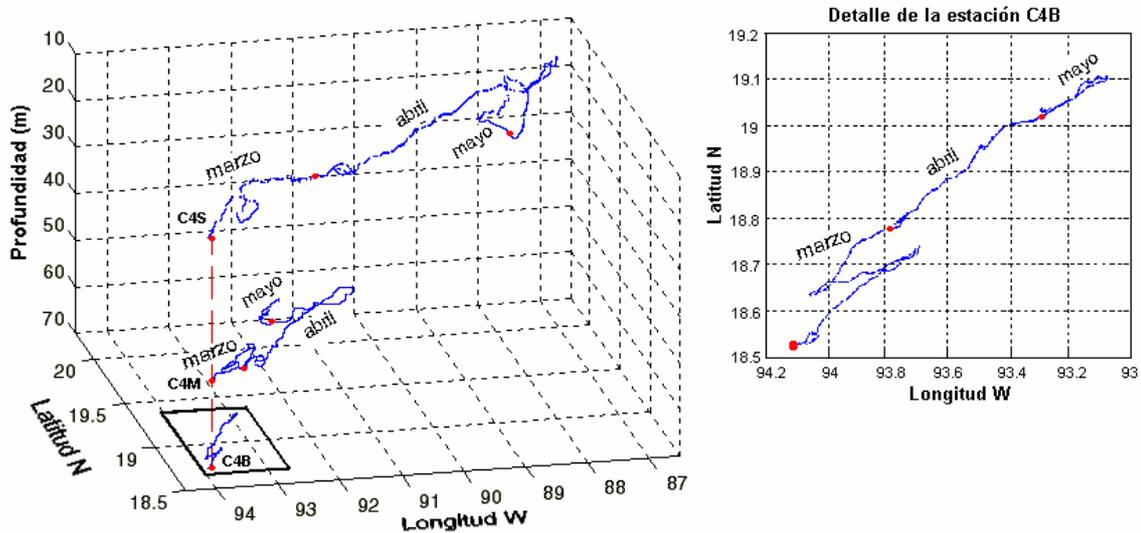


Figura 4.1.22. Diagramas de vectores progresivos de corrientes de la estación 4. Los puntos sobre la línea discontinua indican la posición de las estaciones e inicio de la serie. El resto de los puntos rojos indica el cambio de mes.

## 4.2 FRECUENCIAS DE VARIACIÓN DE LA MAGNITUD Y DIRECCIÓN DE LAS CORRIENTES

Las figuras 4.2.1 a la 4.2.4 muestran los Hodógrafos de corrientes para las cuatro estaciones de muestreo. La tendencia de las direcciones de la corriente para todas las estaciones, que a su vez corresponde con el semieje mayor de los hodogramas se encuentra alineada a las isóbatas (líneas de igual profundidad) (Comparar resultados con Figura 3.1.1.1.). Sin embargo, podemos observar que los vectores no están fuertemente alineados con la tendencia.

Las figuras muestran los hodógrafos de tres series: la serie original, la serie filtrada con períodos mayores a 25 h, donde se encuentran las frecuencias inerciales para esta latitud y la serie filtrada con períodos menores a 25 h.

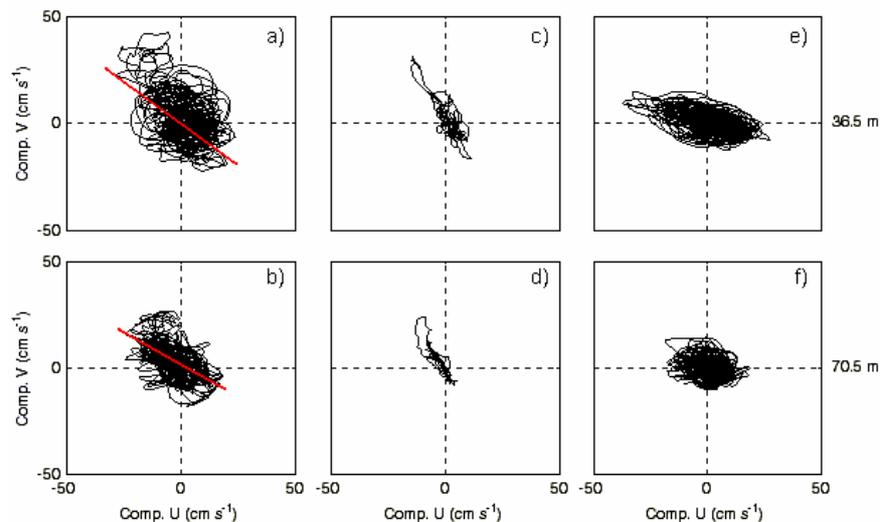


Figura 4.2.1. Hodógrafos de corriente de la estación 1. Gráficos (a) y (b) corresponden a la serie completa, (c) y (d) a la serie filtrada con períodos mayores a 25 h, (e) y (f) a la serie filtrada con períodos menores a 25 h. La línea roja en (a) y (b) corresponde a la tendencia de la serie original.

En la columna de agua no se ve tan marcada la variación en las direcciones como en la intensidad de las corrientes, pudiendo apreciarse una disminución desde la superficie al fondo (Nótese la diferencia de escala). Las series con frecuencias inerciales están más fuertemente alineadas con la batimetría, mientras que las series que corresponden a los períodos de marea

describen movimientos que no son del todo circulares o elípticos. En estos casos sucede esto debido a la proximidad con la costa y al talud continental, viéndose afectadas las corrientes por la fuerza de fricción. La fricción del fondo y entre las capas de agua influye fuertemente en el carácter de las corrientes de marea.

Durante nuestro estudio sólo contamos con máximo tres equipos en la columna de agua, no obstante podemos observar que la influencia de la fricción repercute principalmente en la capa inferior, mientras que en las capas superiores la corriente varía poco con la profundidad. También a través de los Hodógrafos correspondientes a los períodos menores de 25 h podemos hacer un análisis cualitativo de la dirección de propagación de la onda de marea, si consideramos que el semieje mayor es perpendicular a la dirección de propagación.

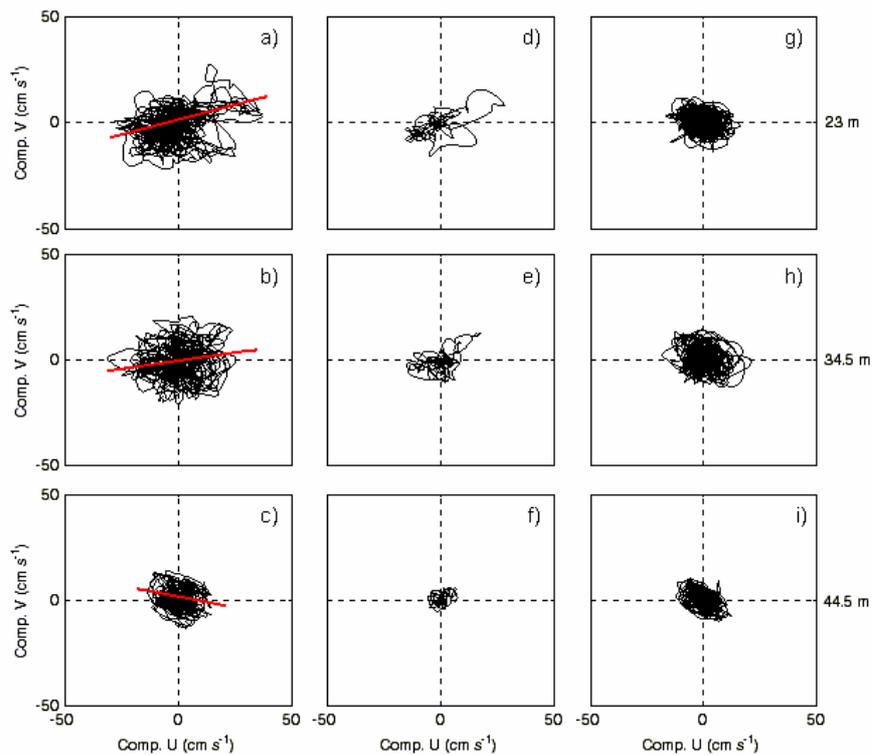


Figura 4.2.2. Hodógrafos de corriente de la estación 2. Gráficos (a), (b) y (c) corresponden a la serie completa, (d), (e) y (f) a la serie filtrada con períodos mayores a 25 h, (g), (h) e (i) a la serie filtrada con períodos menores a 25 h. La línea roja en (a), (b) y (c) corresponde a la tendencia de la serie original.

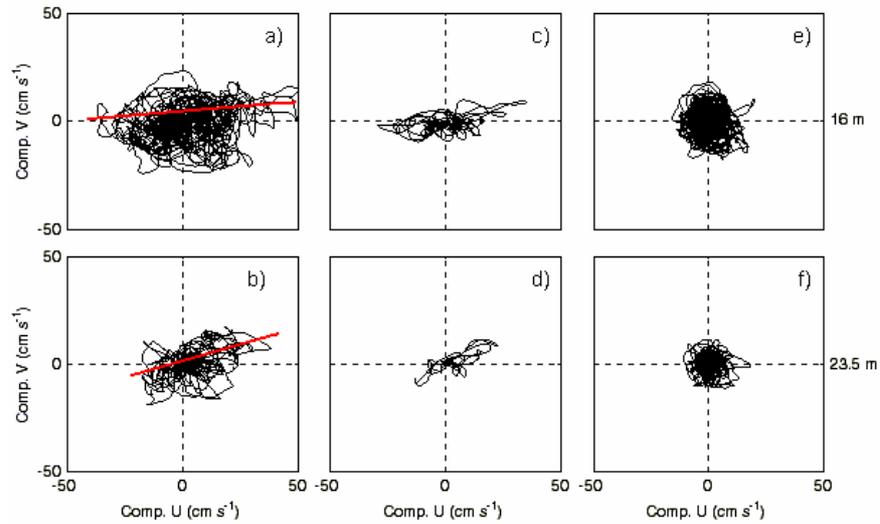


Figura 4.2.3. Hodógrafos de corriente de la estación 3. Gráficos (a) y (b) corresponden a la serie completa, (c) y (d) a la serie filtrada con períodos mayores a 25 h, (e) y (f) a la serie filtrada con períodos menores a 25 h. La línea roja en (a) y (b) corresponde a la tendencia de la serie original.

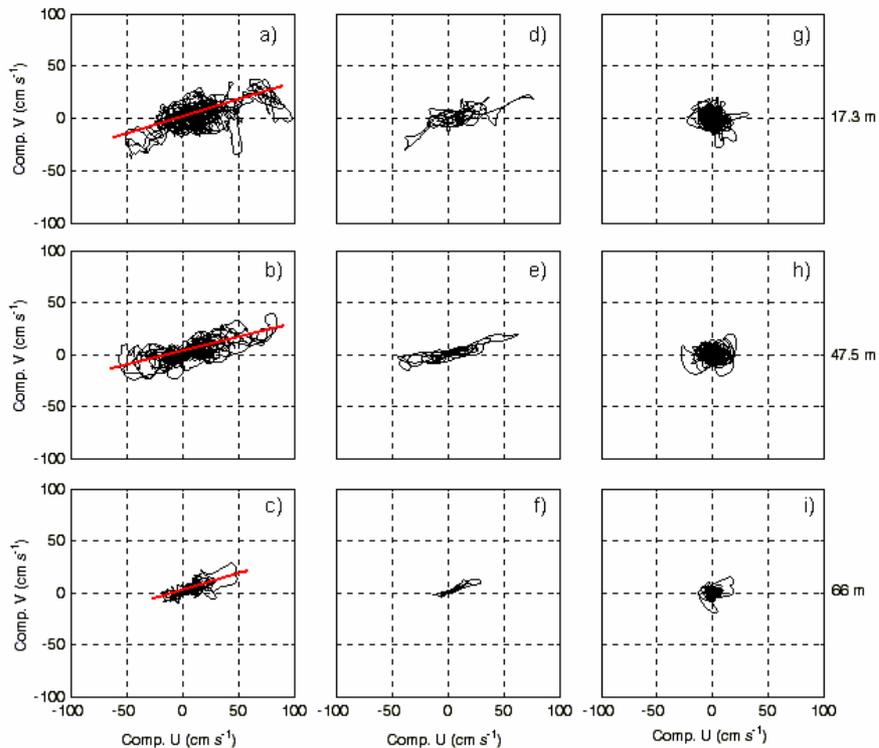


Figura 4.2.4. Hodógrafos de corriente de la estación 4. Gráficos (a), (b) y (c) corresponden a la serie completa, (d), (e) y (f) a la serie filtrada con períodos mayores a 25 h, (g), (h) e (i) a la serie filtrada con períodos menores a 25 h. La línea roja en (a), (b) y (c) corresponde a la tendencia de la serie original.

Para el análisis de las distribuciones de velocidad y la frecuencia de variación de las direcciones de la corriente, fueron graficadas las rosas de corrientes basadas en los datos de magnitud y dirección.

La figura 4.2.5 muestra las rosas de corrientes para la estación 1. Se puede observar que para el período de muestreo, a los 36.5 m de profundidad se presentaron las mayores frecuencias hacia las direcciones nornoroeste (NNW), sudeste (SE) y estesesudeste (ESE), con un porcentaje ligeramente mayor hacia el nornoroeste (NNW), existiendo correspondencia con las mayores velocidades, las que se presentaron también hacia esa dirección.

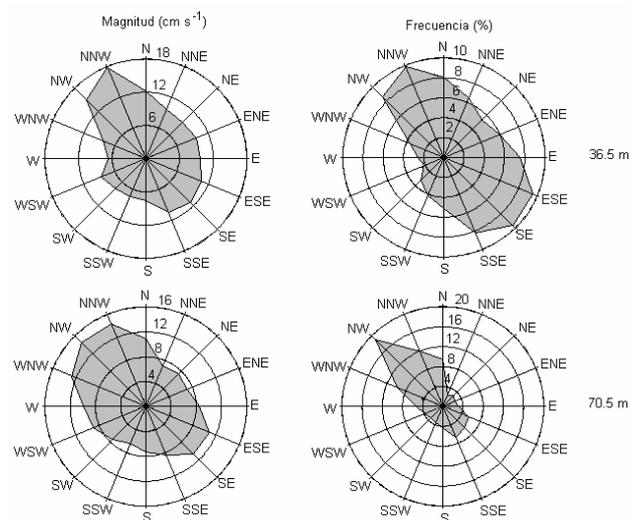


Figura 4.2.5. Rosas de corrientes de la estación 1. Las rosas de la derecha describen las direcciones más frecuentes y las de la izquierda como se comporta la intensidad de las corrientes.

A los 70.5 m de profundidad, el mayor porcentaje del tiempo la corriente mantuvo una dirección noroeste (NW), lo que se define claramente en la rosa. Las mayores velocidades se presentaron entre las direcciones nornoroeste (NNW) y oeste nornoroeste (WNW), siendo ligeramente mayores hacia el noroeste (NW).

En la estación 2 (Figura 4.2.6), se observa una relación inversa entre la frecuencia de las direcciones y las velocidades relativas de la corriente. A los 23 m de profundidad la mayor frecuencia en las direcciones estuvo dada hacia el oeste suroeste (WSW), mientras que las mayores velocidades se presentaron hacia el este nordeste (ENE). A los 34.5 m el patrón fue muy parecido al de los 23 m. La mayor frecuencia en la dirección fue hacia el sursuroeste (SSW) y las mayores magnitudes se presentaron en dirección nordeste (NE). A los 44.5 m de profundidad se presentó una oscilación en las direcciones con una frecuencia muy similar entre las direcciones norte (N) y nordeste (NE), al igual que para las direcciones oeste (W) y oeste noroeste (WNW), siendo ligeramente mayor hacia el oeste (W). Las mayores velocidades oscilaron entre las direcciones nornordeste (NNE), nordeste (NE) y noroeste (NW), siendo algo mayores hacia esta última.

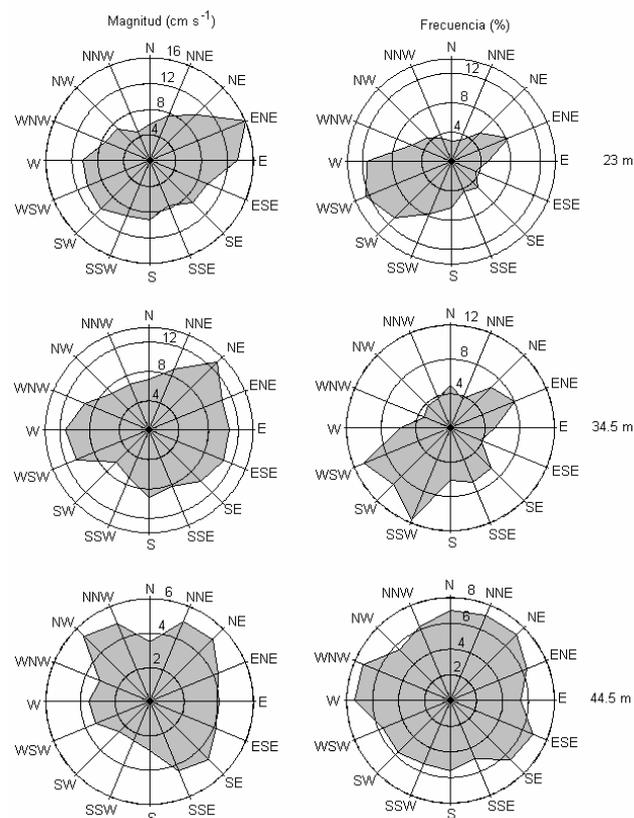


Figura 4.2.6. Rosas de corrientes de la estación 2. Las rosas de la derecha describen las direcciones más frecuentes y las de la izquierda como se comporta la intensidad de las corrientes.

La estación 3 (Figura 4.2.7), a los 16 m de profundidad presentó mayor frecuencia en la dirección oeste suroeste (WSW) y las mayores velocidades oscilaron entre el este y el estenordeste y a los 23.5 m las direcciones fueron más frecuentes hacia el este (E) y el suroeste (SW), con las mayores velocidades en dirección nordeste (NE) y estenordeste (ENE).

En la estación 4 (Figura 2.4.8) las tres profundidades observadas presentan un patrón de circulación muy similar, con la mayor frecuencia hacia el estenordeste (ENE) al igual que las mayores velocidades.

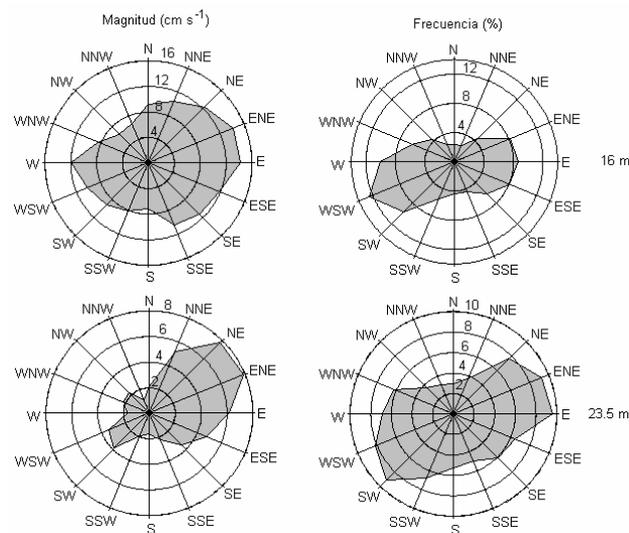


Figura 4.2.7. Rosas de corrientes de la estación 3. Las rosas de la derecha describen las direcciones más frecuentes y las de la izquierda como se comporta la intensidad de las corrientes.

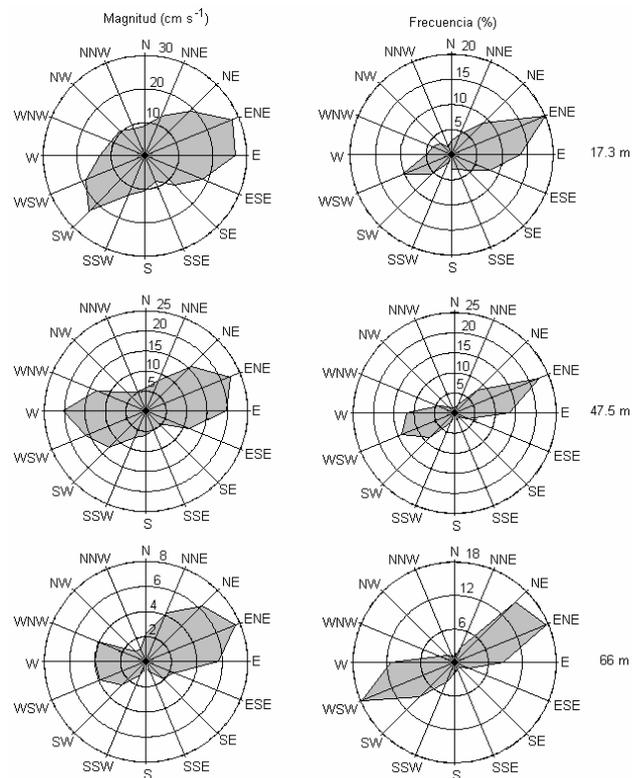


Figura 4.2.8. Rosas de corrientes de la estación 4. Las rosas de la derecha describen las direcciones más frecuentes y las de la izquierda como se comporta la intensidad de las corrientes.

El análisis de las rosas de corrientes corrobora que las direcciones más frecuentes de las corrientes coinciden con las líneas de igual profundidad, al igual que las corrientes más intensas.

Durante el registro de corrientes no se muestrearon variables meteorológicas, por lo que no se cuenta con series muy representativas del área donde se anclaron los correntómetros. Se pudieron obtener series cortas de magnitud y dirección del viento a través del Servicio Meteorológico Nacional de las estaciones ubicadas en Ciudad del Carmen, Dos Bocas y Coatzacoalcos (Figura 4.2.10), con la dificultad de que están demasiado alejadas de las estaciones de corrientes y no se encuentran del todo en la zona costera, por lo que las direcciones y velocidades registradas pueden estar afectadas por la topografía, vegetación o edificaciones.

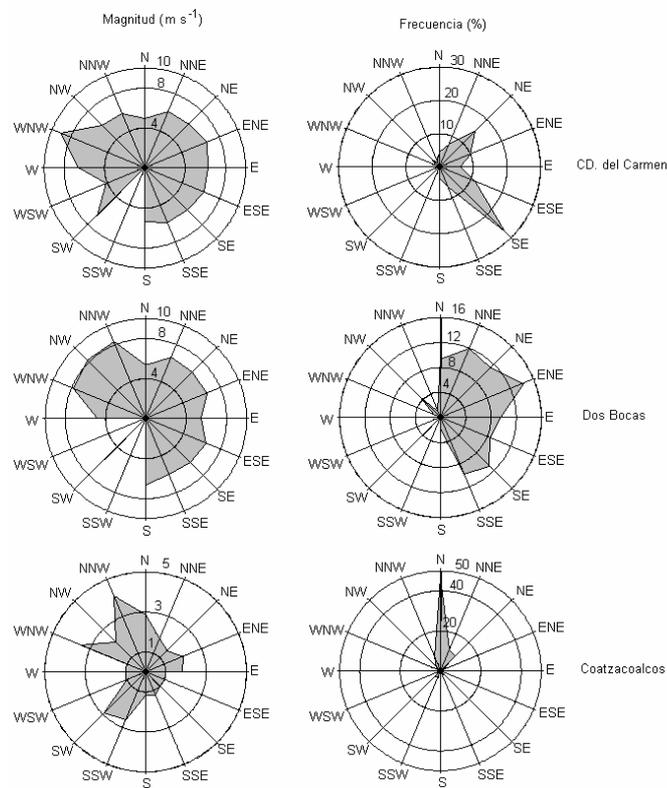


Figura 4.2.9. Rosas de viento de las estaciones meteorológicas de CD. Del Carmen, Dos Bocas y Coatzacoalcos. Las rosas de la derecha describen las direcciones más frecuentes y las de la izquierda como se comporta la intensidad de los vientos.

En las tres estaciones las frecuencias en las direcciones del viento fueron diferentes para el mismo período de muestreo (Figura 4.2.9). En la estación de Cd. Del Carmen las mayores frecuencias en las direcciones fueron del sureste (SE) con un 25% y noreste (NE) con un 15%. En la estación de dos bocas las direcciones predominantes del viento fueron del estenordeste (ENE) con un 14%, del norte nordeste (NNE) con 12% y un 11% del sureste (SE), mientras que para la estación meteorológica de Coatzacoalcos el viento prevaleciente fue del norte (N) con un 50%.

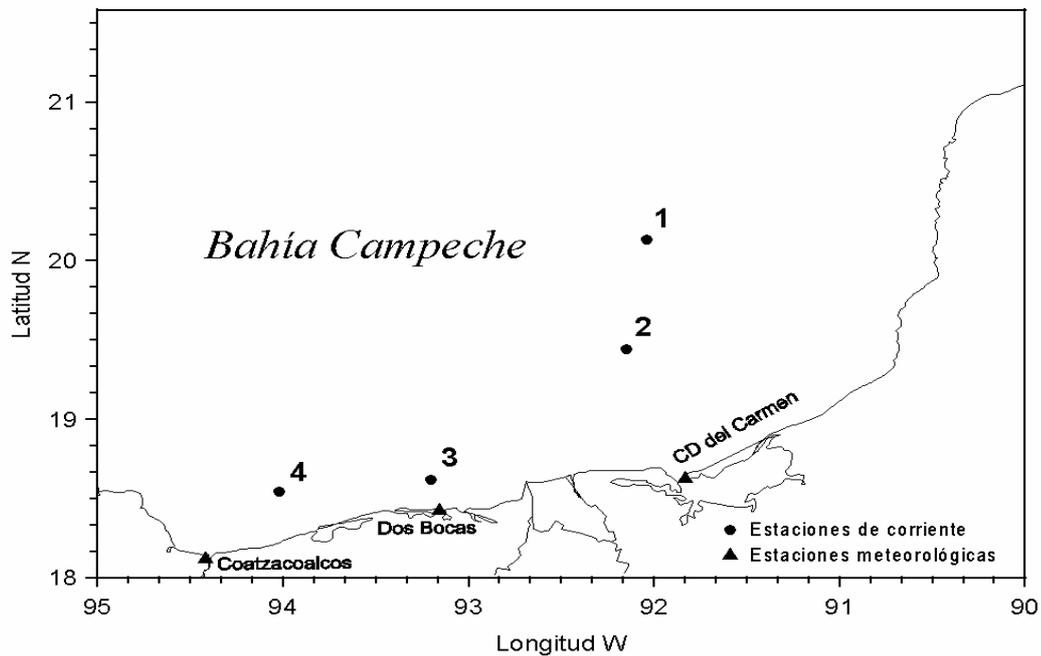


Figura 4.2.10. Ubicación de las estaciones meteorológicas de CD del Carmen, Dos Bocas y Coatzacoalcos.

Analizando cualitativamente los resultados obtenidos de la frecuencia de las direcciones de la corriente y del viento se puede afirmar que la topografía del fondo y el esfuerzo rotacional del viento además de otros factores juegan un papel fundamental en la circulación de la Bahía de Campeche.

### 4.3 PERIODICIDAD DE LAS OSCILACIONES

#### 4.3.1 Análisis espectral mediante Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Para conocer los períodos característicos de las oscilaciones de los parámetros observados y encontrar posibles procesos inerciales en las corrientes, se realizó análisis espectral a las series obtenidas, usando Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Los espectros de las componentes U y V de la estación 1 (Figura 4.3.1.1) muestran picos espectrales con períodos de 12.42 h y 25.82 h, correspondientes a las componentes armónicas de marea Principal Lunar ( $M_2$ ) y Principal Lunar Diurna ( $O_1$ ) respectivamente. También en ambas componentes se observa un pico con período de 38.4 h (1.6 días); otros dos picos con períodos raros son el que se observa en la componente U en superficie (Figura 4.3.1.1 (a)), de 10.5 h y en la componente V en los dos niveles (Figura 4.3.1.1 (b)) con 14.84 h.

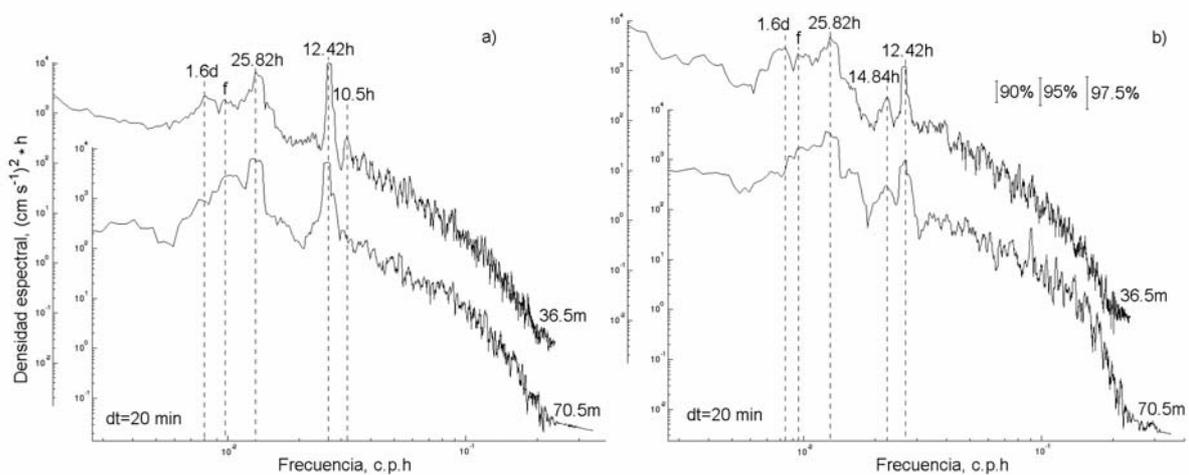


Figura 4.3.1.1. Espectros energéticos de las componentes U (a) y V (b) de la corriente para la estación 1 en superficie y fondo. Los espectros se realizaron con 14 grados de libertad ganados por el suavizado, los intervalos de confianza aparecen representados mediante barras en la esquina superior derecha para 90, 95 y 97.5%. El valor de frecuencia representado con la letra f corresponde a procesos inerciales, con un período de oscilación para esta estación de 34.8 h.

Con la letra “f” se encuentra representada en los gráficos la frecuencia inercial. Primeramente se realizó el cálculo teórico para determinar el valor del período inercial (ver acápite 2.1.2 Movimiento inercial), el cual es de 34.85 h para la estación 1. Aquí se encontró un pico para ambas componentes tanto en superficie como en fondo con una frecuencia inercial exactamente igual a la calculada teóricamente.

En la estación dos (Figura 4.3.1.2), se vuelve a encontrar en ambas componentes períodos de 12.42 h de la componente de marea Principal Lunar ( $M_2$ ). El pico de 10.5 h encontrado en la componente U de la estación 1 ahora aparece también aquí pero para las dos componentes. En la componente U (Figura 4.3.1.2 (a)) se observan además picos con períodos de 23.93 h

(Luni-Solar Diurna ( $K_1$ )) y 18.08 h, mientras que en la componente V (Figura 4.3.1.2 (b)) se observan picos con períodos de 25.82 h (Principal Lunar Diurna ( $O_1$ )) y 16.39 h. En la estación 2 se observan también en ambas componentes picos con valores de frecuencia inercial que coinciden con los calculados para esta estación, con un período de 36.04 h.

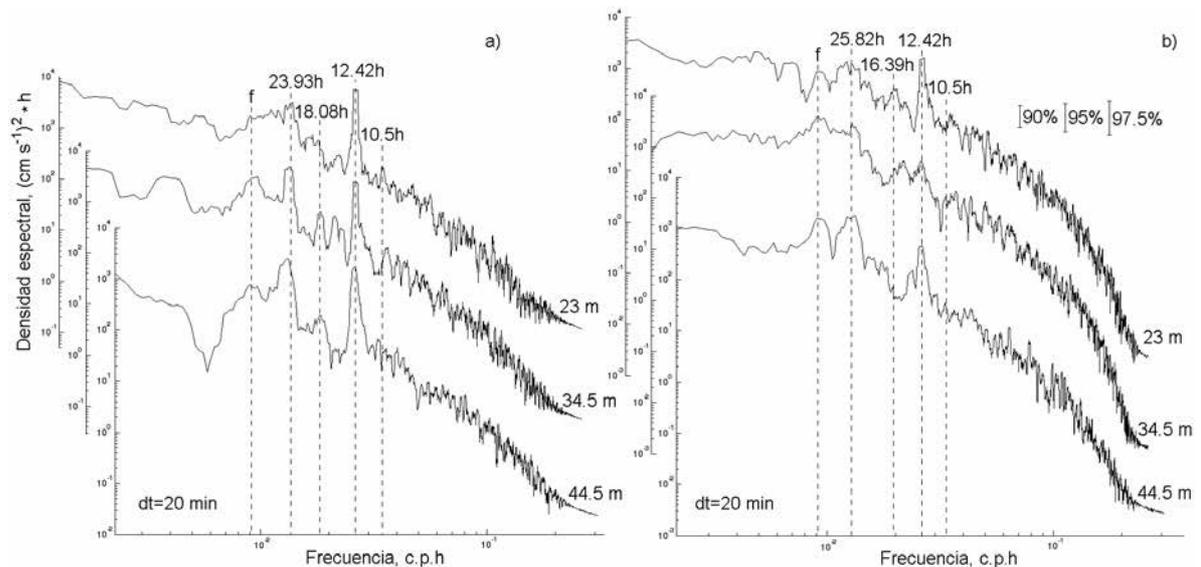


Figura 4.3.1.2. Espectros energéticos de las componentes U (a) y V (b) de la corriente para la estación 2 en superficie, medio y fondo. Los espectros se realizaron con 14 grados de libertad ganados por el suavizado, los intervalos de confianza aparecen representados mediante barras en la esquina superior derecha para 90, 95 y 97.5%. El valor de frecuencia representado con la letra f corresponde a procesos inerciales, con un período de oscilación para esta estación de 36.04 h.

Mediante el análisis espectral de las componentes U y V para la estación 3 (Figura 4.3.1.3), se puede observar que para ambas componentes los picos de mayor densidad espectral corresponden a los períodos de 25.82 h (Principal Lunar Diurna), 12.42 h (Principal Lunar), 33.6 h (1.4 días) y 10.5 h. La frecuencia inercial encontrada para esta estación resultó con un período de 37.58 h.

Como se puede observar en las gráficas, la densidad espectral de la corriente generada por las componentes de marea va decreciendo gradualmente de la estación 1 a la 4, o sea, esta disminuye de este a oeste en el área de estudio.

En la estación 4 (Figura 4.3.1.4) aparecen nuevamente picos con periodos de 25.82 h y 12.42 h para ambas componentes, aunque con muy poca contribución en la serie. En la componente V, para la estación de fondo (Figura 4.3.1.4 (b)) se observa un pico con período de 10.5 h que ha venido apareciendo en casi todas las series de tiempo de corrientes. Las frecuencias inerciales también las encontramos en esta estación, con un período de 37.72 h.

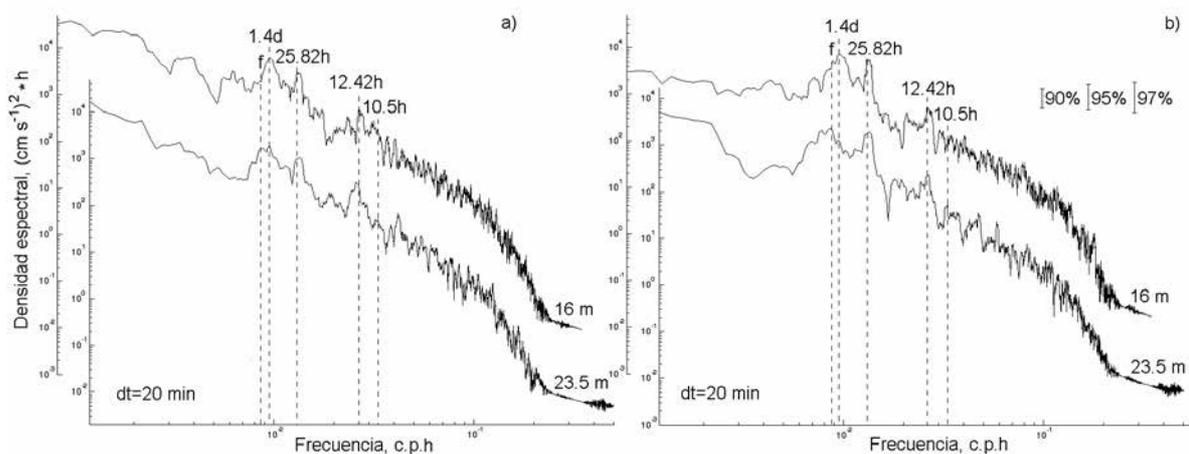


Figura 4.3.1.3. Espectros energéticos de las componentes U (a) y V (b) de la corriente para la estación 3 en superficie y fondo. Los espectros se realizaron con 14 grados de libertad ganados por el suavizado, los intervalos de confianza aparecen representados mediante barras en la esquina superior derecha para 90, 95 y 97.5%. El valor de frecuencia representado con la letra f corresponde a procesos inerciales, con un período de oscilación para esta estación de 37.5 h.

Se puede apreciar, gracias a los resultados derivados del análisis espectral, que en la dinámica de la Bahía de Campeche se presentan oscilaciones inerciales. Estas también se observan a través de los espectros energéticos realizados a la variación del nivel del mar para las estaciones 1 y 4.

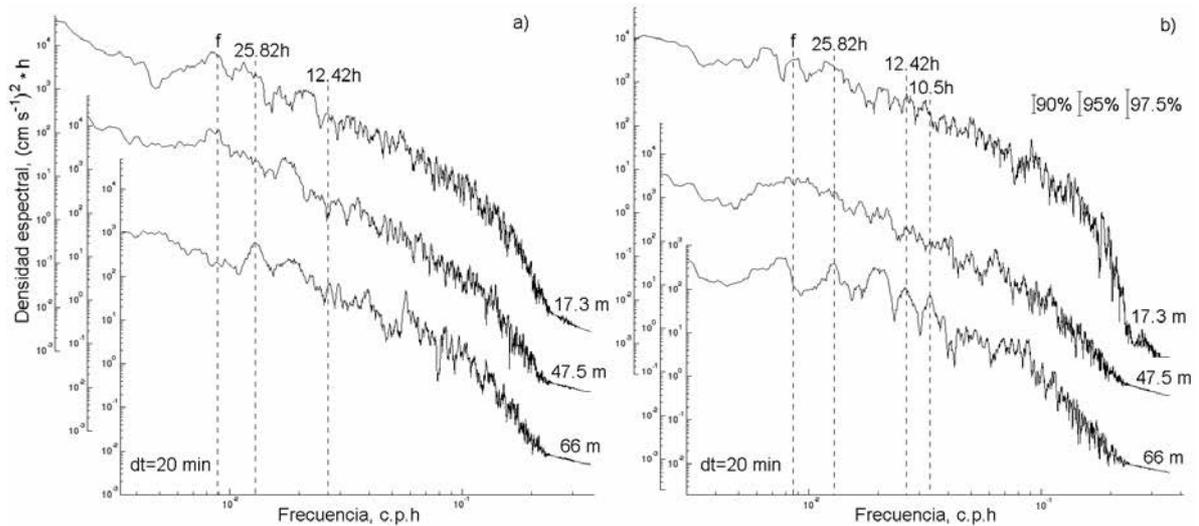


Figura 4.3.1.4. Espectros energéticos de las componentes U (a) y V (b) de la corriente para la estación 4 en superficie, medio y fondo. Los espectros se realizaron con 14 grados de libertad ganados por el suavizado, los intervalos de confianza aparecen representados mediante barras en la esquina superior derecha para 90, 95 y 97.5%. El valor de frecuencia representado con la letra f corresponde a procesos inerciales, con un período de oscilación para esta estación de 37.7 h.

En los espectros de variación del nivel del mar de las estaciones 1 (Figura 4.3.1.5) y 4 (Figura 4.3.1.6) los picos de mayor densidad espectral encontrados tienen períodos de 25.82 h, 12.42 h y 327.86 h que corresponden a los armónicos de marea Principal Lunar Diurna ( $O_1$ ), Principal Lunar ( $M_2$ ) y Lunar Quincenal ( $M_f$ ) respectivamente. También se encontraron dos picos de 8 y 6 h que pueden estar asociados al sistema de brisas, observándose también en los espectros de temperatura del agua como se verá más adelante. En la estación 1 también aparece nuevamente un pico con período de 10.5 h.

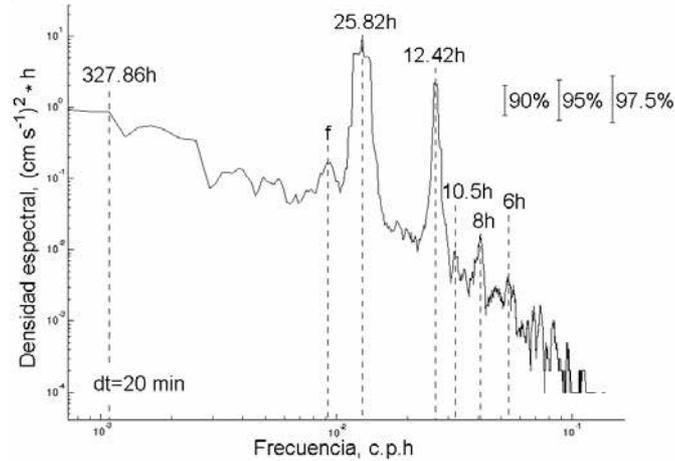


Figura 4.3.1.5. Espectro energético de variación del nivel del mar para la estación 1. El espectro se realizó con 14 grados de libertad ganados por el suavizado, los intervalos de confianza aparecen representados mediante barras en la esquina superior derecha para 90, 95 y 97.5%. El valor de frecuencia representado con la letra f corresponde a procesos inerciales, con un período de oscilación para esta estación de 34.8 h.

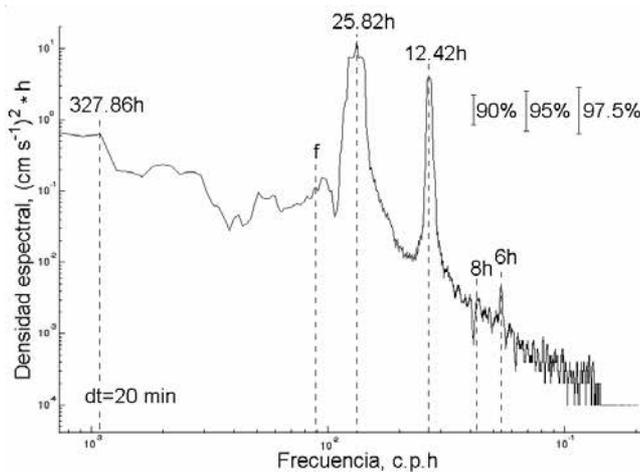


Figura 4.3.1.6. Espectro energético de variación del nivel del mar para la estación 4. El espectro se realizó con 14 grados de libertad ganados por el suavizado, los intervalos de confianza aparecen representados mediante barras en la esquina superior derecha para 90, 95 y 97.5%. El valor de frecuencia representado con la letra f corresponde a procesos inerciales, con un período de oscilación para esta estación de 37.7 h.

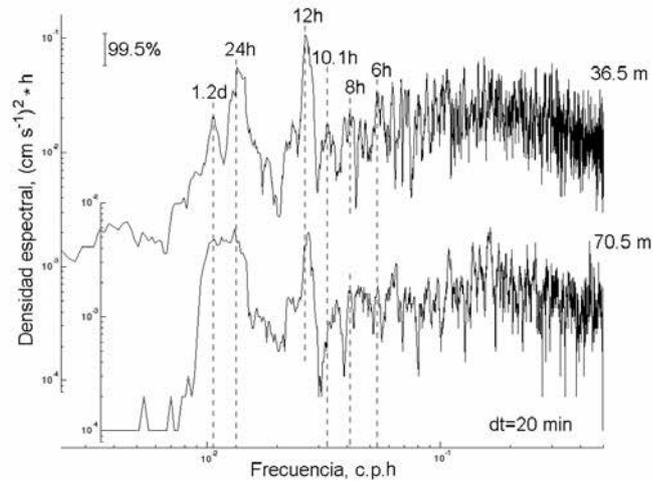


Figura 4.3.1.7. Espectros energéticos de temperatura del mar para la estación 1 en superficie y fondo. Los espectros se realizaron con 14 grados de libertad ganados por el suavizado, el intervalo de confianza aparece representado mediante una barra en la esquina superior izquierda para 99.5%.

Para la temperatura en la estación 1 (Figura 4.3.1.7) se observaron oscilaciones diurnas, semidiurnas y de brisas con períodos de 24 h, 12h, 8h y 6h. También aparece una oscilación con período de 1.2 días y otra de 10.1h, muy cercana a la de 10.5h encontrada en esta misma estación para la componente U de la corriente.

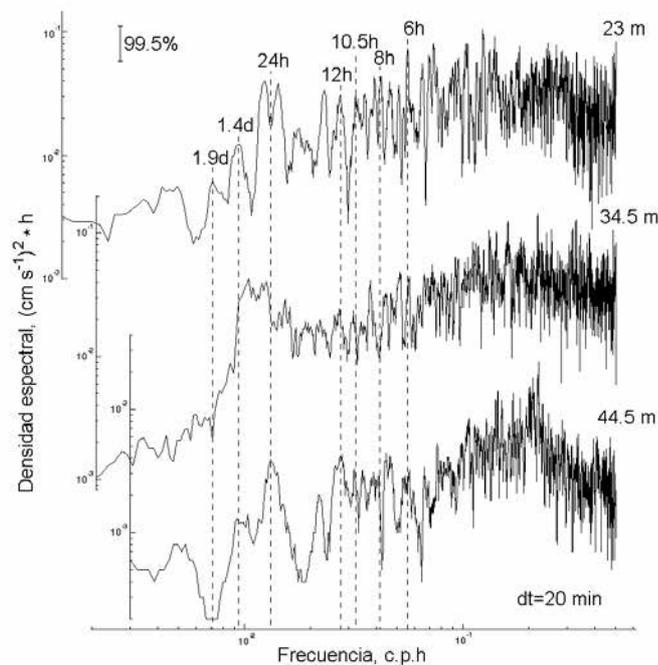


Figura 4.3.1.8. Espectros energéticos de temperatura del mar para la estación 2 en superficie, medio y fondo. Los espectros se realizaron con 14 grados de libertad ganados por el suavizado, el intervalo de confianza aparece representado mediante una barra en la esquina superior izquierda para 99.5%.

En el resto de las estaciones, 2, 3 y 4 aparecen picos espectrales con períodos de 24h, 12h, 8h y 6h. En la estación 2 (Figura 4.3.1.8) además se observan oscilaciones de 1.4, 1.9 días y 10.5h. La estación 3 (Figura 4.3.1.9) muestra la existencia de picos adicionales con períodos de 6.3 y 8.3 días y en lugar del pico de 10.5h aparece uno de 10.1h.

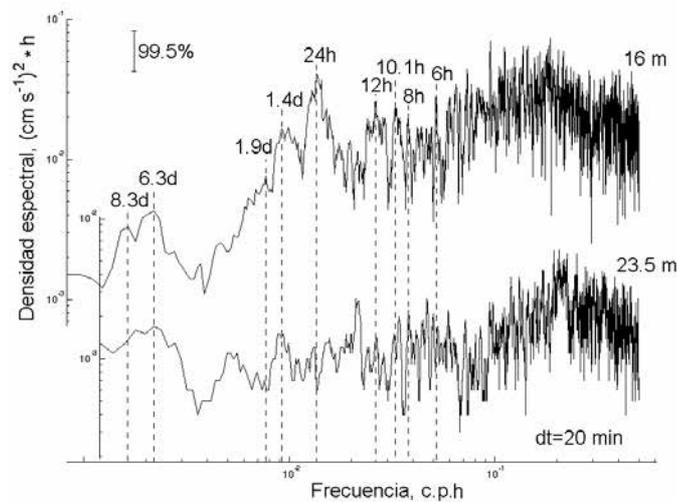


Figura 4.3.1.9. Espectros energéticos de temperatura del mar para la estación 3 en superficie y fondo. Los espectros se realizaron con 14 grados de libertad ganados por el suavizado, el intervalo de confianza aparece representado mediante una barra en la esquina superior izquierda para 99.5%.

En la estación 4, la temperatura vuelve a presentar picos que no difieren de los encontrados en las estaciones anteriores (Ver figura 4.3.1.10), pero adicionalmente se observa uno con período de 3.4 días.

El análisis espectral de la salinidad para la estación 1 solo fue posible realizarlo en superficie (Figura 4.3.1.11) debido a que el equipo ubicado en la estación de fondo no efectuó registro. Esta serie muestra períodos de 25.82h y 12.6h que corresponden con los armónicos de marea Principal Lunar Diurna ( $O_1$ ) y Larga Lunar Elíptica ( $N_2$ ) respectivamente y picos en 8h, 6h, 10.2h, 22h y 28.8h (1.2 días).

La estación 2 (Figura 4.3.1.12) presenta picos con características diurnas, semidiurnas y de brisas con períodos de 24h, 12h, 8h y 6h respectivamente. También aparecen otros picos con períodos de 10.3h, 13.8h, 15.8h, 18h y 33.6h (1.4 días).

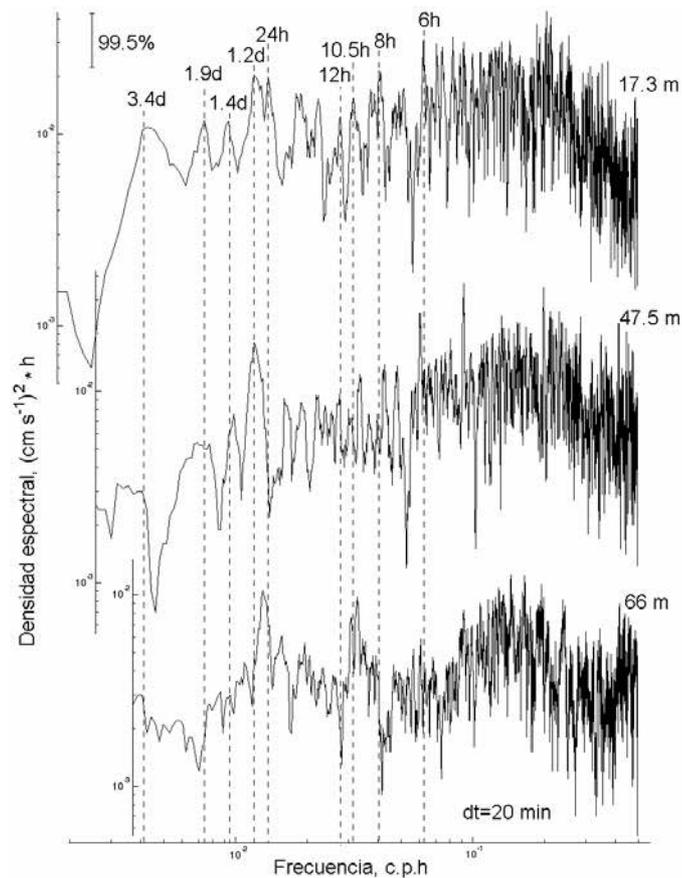


Figura 4.3.1.10. Espectros energéticos de temperatura del mar para la estación 4 en superficie, medio y fondo. Los espectros se realizaron con 14 grados de libertad ganados por el suavizado, el intervalo de confianza aparece representado mediante una barra en la esquina superior izquierda para 99.5%.

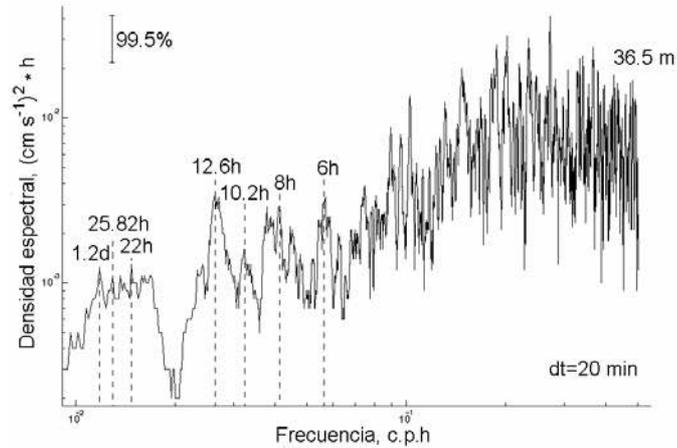


Figura 4.3.1.11. Espectro energético de salinidad para la estación 1 en superficie. El espectro se realizó con 14 grados de libertad ganados por el suavizado, el intervalo de confianza aparece representado mediante una barra en la esquina superior izquierda para 99.5%.

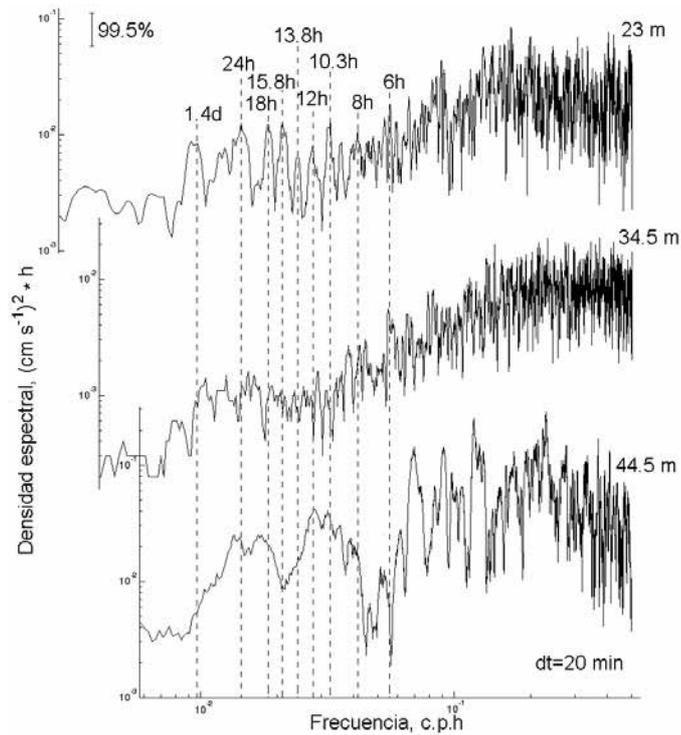


Figura 4.3.1.12. Espectros energéticos de salinidad para la estación 2 en superficie, medio y fondo. Los espectros se realizaron con 14 grados de libertad ganados por el suavizado, el intervalo de confianza aparece representado mediante una barra en la esquina superior izquierda para 99.5%.

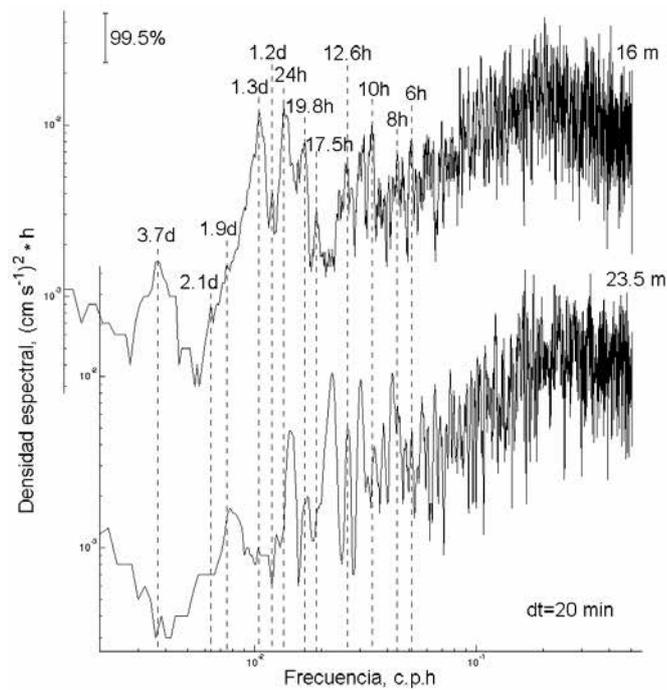


Figura 4.3.1.13. Espectros energéticos de salinidad para la estación 3 en superficie y fondo. Los espectros se realizaron con 14 grados de libertad ganados por el suavizado, el intervalo de confianza aparece representado mediante una barra en la esquina superior izquierda para 99.5%.

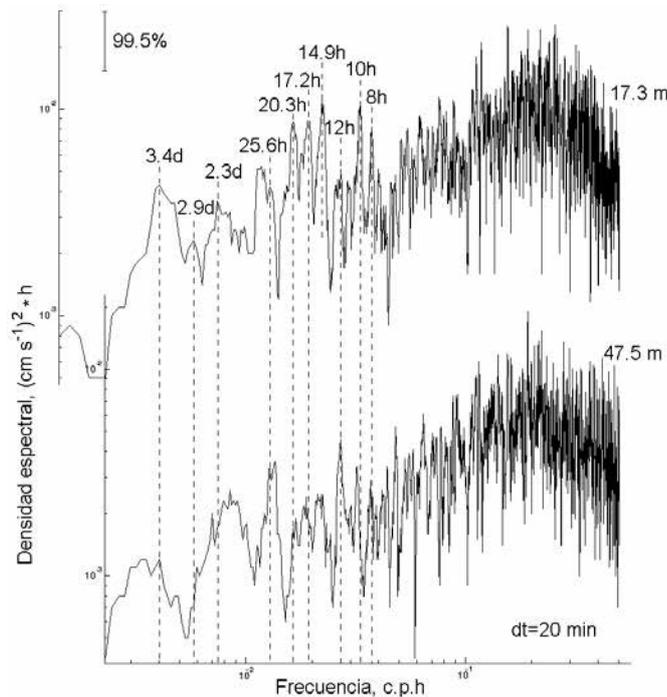


Figura 4.3.1.14. Espectros energéticos de salinidad para la estación 4 en superficie y medio. Los espectros se realizaron con 14 grados de libertad ganados por el suavizado, el intervalo de confianza aparece representado mediante una barra en la esquina superior izquierda para 99.5%.

Para la estación 3 (Figura 4.3.1.13) la salinidad presentó picos espectrales con períodos de 3.7, 2.1, 1.9, 1.3 y 1.2 días, 24h, 19.8h, 17.5h, 12.6h, 10h, 8h y 6h.

En la estación 4 sucedió lo mismo que en la estación 1 con el registro de salinidad de fondo, por lo que sólo se pudieron analizar los registros de superficie y medio. Aquí se observan picos con períodos de 3.4, 2.9 y 2.3 días, 25.6h, 20.3h, 17.2h, 14.9h, 12h, 10h y 8h (Figura 4.3.1.14).

Debido a que para este estudio no fue posible contar con series de tiempo o datos meteorológicos confiables para poder explicar las oscilaciones encontradas en los datos oceanográficos, se hace un análisis comparativo con los resultados obtenidos por Salas de León *et al.*, en un estudio realizado sobre los períodos característicos en las oscilaciones de parámetros meteorológicos en Cayo Arcas (1992).

El análisis de ambos resultados corrobora que las oscilaciones encontradas en las series de tiempo de temperatura y salinidad con períodos de 6, 8, 12 y 24 horas están asociadas a un sistema local de brisas, presentes también en las series de temperatura del aire, magnitud del viento, presión atmosférica, radiación y humedad relativa para la estación meteorológica de Cayo Arcas.

El Período de 8.3 días que se encontró en las series de tiempo de temperatura del mar en la estación 3 (Figura 4.3.1.9) es resultado de las oscilaciones que se presentan en la temperatura atmosférica (Figura 4.3.1.15 (b)). Otros picos que se observan generalmente en las series de temperatura del mar y salinidad, con períodos de 1.2, 1.4, 1.9, 2.9 y 3.7 días, están asociados a procesos atmosféricos, encontrándose en la serie de magnitud del viento en la estación de Cayo Arcas picos con períodos iguales y otros muy próximos a los observados en las series oceanográficas (Figura 4.3.1.16 (b)).

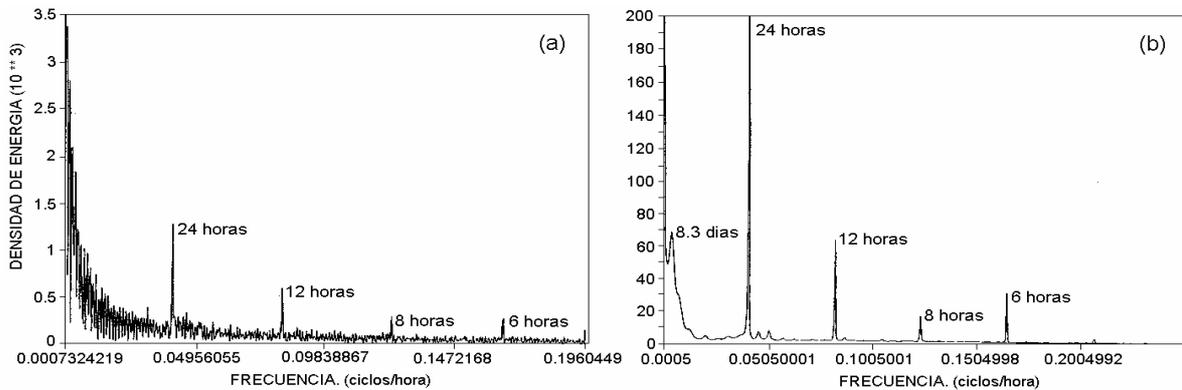


Figura 4.3.1.15. Espectros de energía por los métodos de Transformada Rápida de Fourier (a) y Máxima Entropía (b) de la serie de temperatura del aire de la estación meteorológica Cayo Arcas (Salas de León *et al.*, 1992).

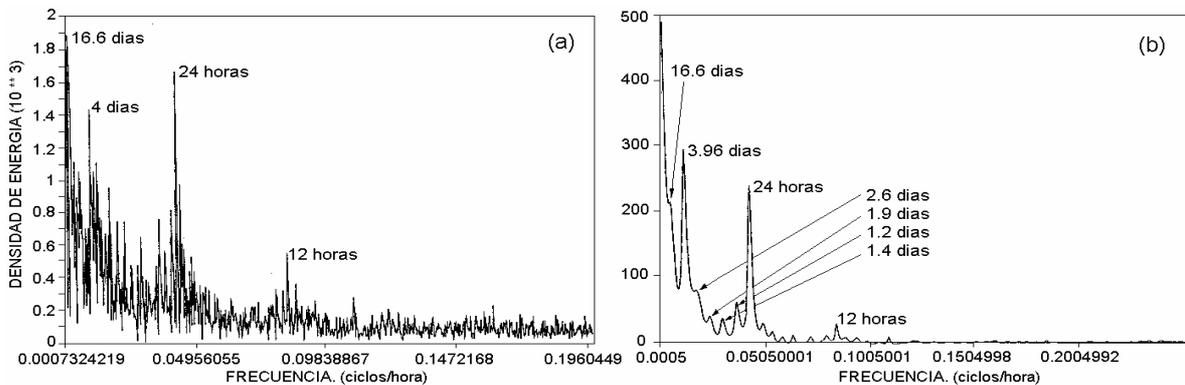


Figura 4.3.1.16. Espectros de energía por los métodos de Transformada Rápida de Fourier (a) y Máxima Entropía (b) de la serie de magnitud del viento de la estación meteorológica Cayo Arcas (Salas de León *et al.*, 1992).

Aunque no es objeto de estudio analizar las traslocaciones o cambios de fases en las oscilaciones, si es importante comentar que estas se manifiestan como cambios en las pendientes de los espectros de potencia en figuras log-log. Por lo que los cambios de pendiente observados en los espectros de las figuras log-log indican cambios en la tendencia de las oscilaciones.

### 4.3.2 Análisis espectral mediante Wavelet

El análisis mediante Wevelet sólo se realizó a las series de corrientes. Estas fueron filtradas primero para eliminar las frecuencias altas correspondientes a mareas, con períodos menores

de 25 h. Con este método sólo se analizaron las bajas frecuencias para encontrar y evaluar los procesos inerciales en cuanto al tiempo aproximado de duración y corroborar los resultados obtenidos mediante Transformada de Fourier.

Las figuras 4.3.2.1 a 4.3.2.4 muestran las componentes de las series de tiempo de corriente filtradas para cada estación con períodos mayores a 24 h.

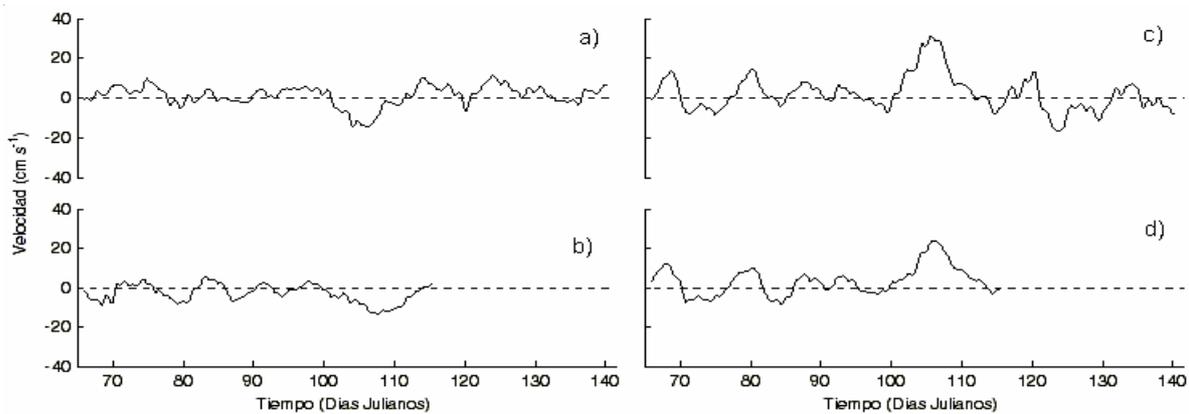


Figura 4.3.2.1. Series de tiempo de corrientes filtradas de la estación 1. Componentes U (Gráficos de la izquierda), V (Gráficos de la derecha). Los gráficos (a) y (c) corresponden a la estación de superficie (36.5 m) y el (b) y (d) a la estación de fondo (70.5m).

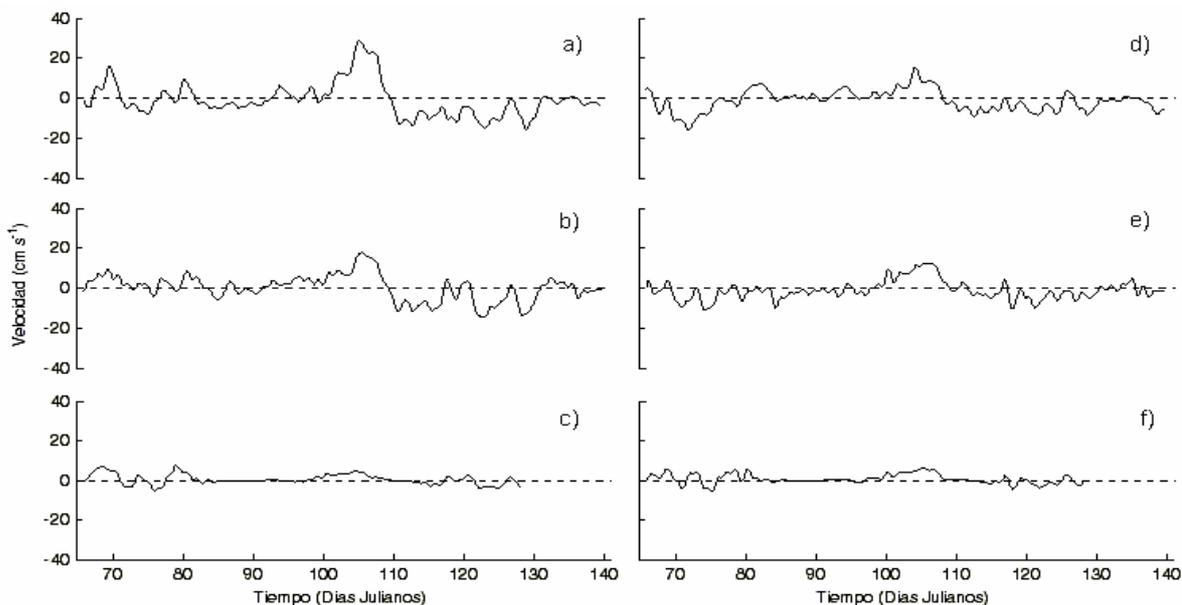


Figura 4.3.2.2. Series de tiempo de corrientes filtradas de la estación 2. Componentes U (Gráficos de la izquierda), V (Gráficos de la derecha). Los gráficos (a) y (d) corresponden a la estación de superficie (23 m), (b) y (e) a la estación de medio (34.5 m) y (c) y (f) a la estación de fondo (44.5 m).

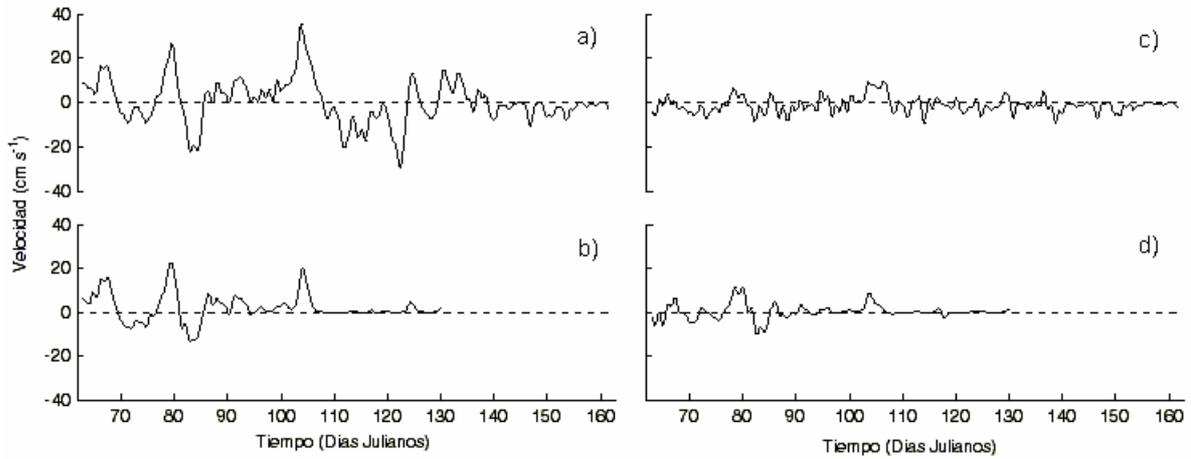


Figura 4.3.2.3. Series de tiempo de corrientes filtradas de la estación 3. Componentes U (Gráficos de la izquierda), componente V (Gráficos de la derecha). Los gráficos (a) y (c) corresponden a la estación de superficie (16 m) y el (b) y (d) a la estación de fondo (23.5 m).

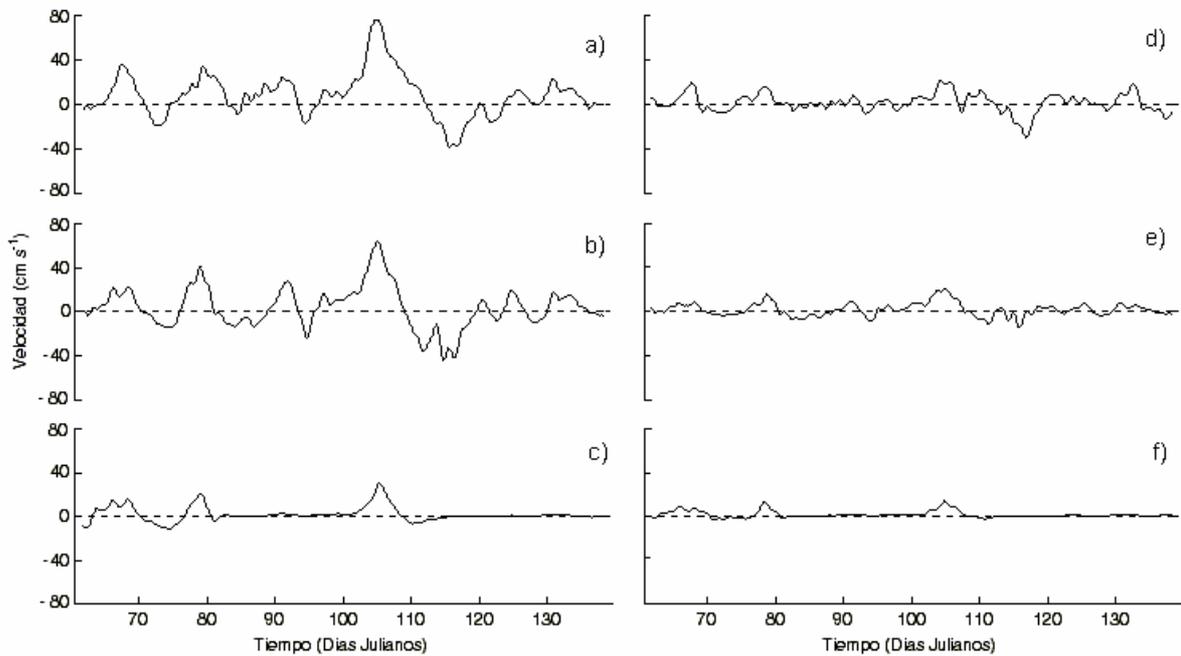


Figura 4.3.2.4. Series de tiempo de corrientes filtradas de la estación 4. Componente U (Gráficos de la izquierda), componente V (Gráficos de la derecha). Los gráficos (a) y (d) corresponden a la estación de superficie (17.3 m), (b) y (e) a la estación de medio (47.5 m) y (c) y (f) a la estación de fondo (66 m).

Con este método volvemos a encontrar oscilaciones con frecuencias inerciales, pero aquí se puede observar una duración aproximada de las oscilaciones entre dos y tres días, presentándose de forma irregular cada cierto período de tiempo.

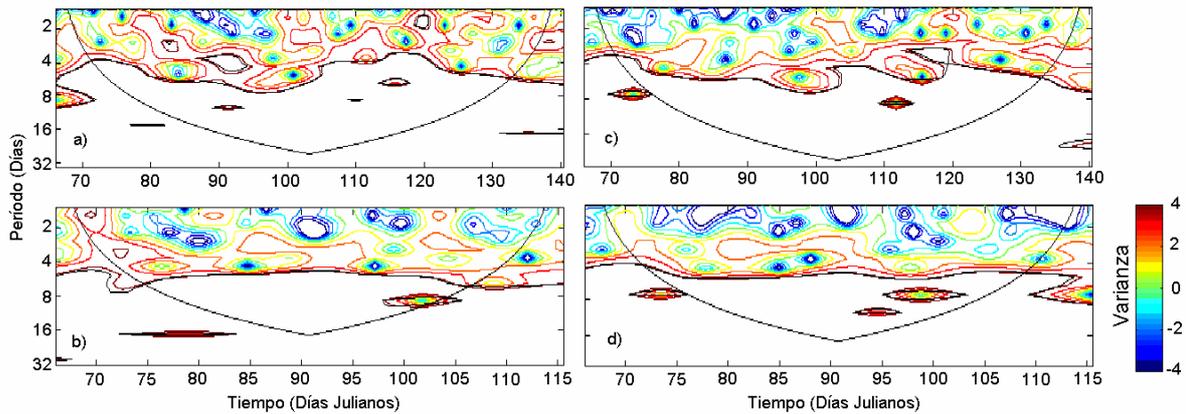


Figura 4.3.2.5. Espectros de las componentes U (Gráficos de la izquierda) y V (Gráficos de la derecha) de la estación 1 mediante Wavelet. Los gráficos (a) y (c) corresponden a la estación de superficie (36.5 m) y el (b) y (d) a la estación de fondo (70.5 m).

En la estación 1 (Figura 4.3.2.5) aparecen dos oscilaciones que pudieran ser inerciales, con un período de 1.45 días que se presentan los días 91 y 133; éstos corresponden al 2 de abril y al 14 de mayo de 1997.

En la estación 2 (Figura 4.3.2.6) se observaron oscilaciones con períodos de 1.5 días durante los días 87 y 122; éstos corresponden al 29 de marzo y 3 de mayo. En la estación de fondo aparece una oscilación con muy baja varianza entre los días 85 y 91. Probablemente esta se debe a malos registros del equipo, ver figura 4.3.2.2.

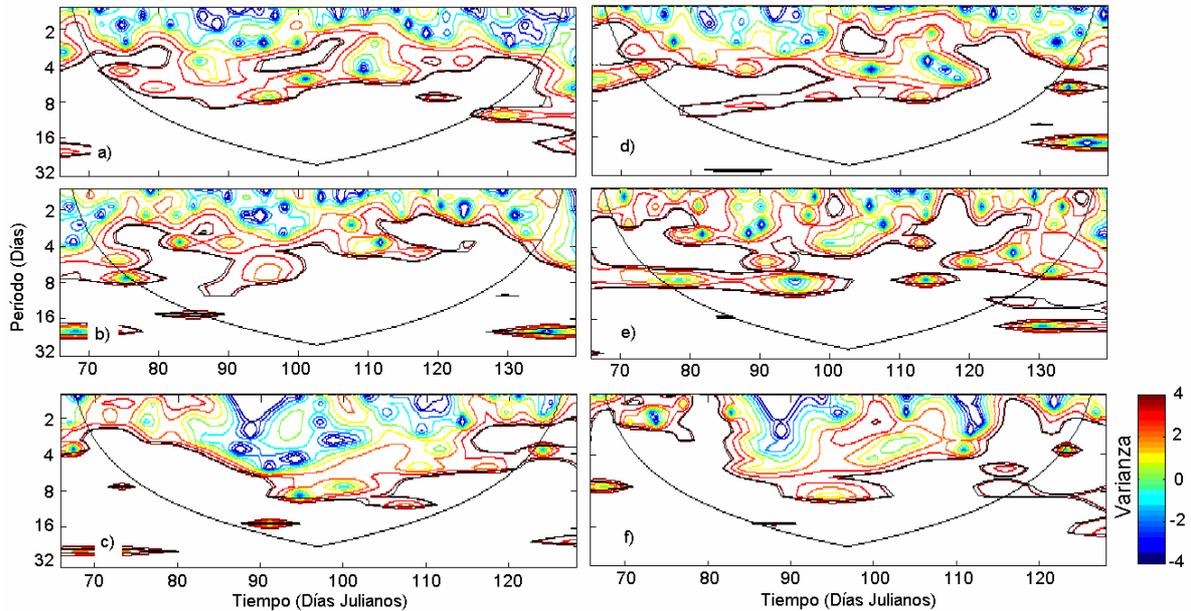


Figura 4.3.2.6. Espectros de las componentes U (Gráficos de la izquierda) y V (Gráficos de la derecha) de la estación 2 mediante Wavelet. Los gráficos (a) y (d) corresponden a la estación de superficie (23 m), (b) y (e) a la estación de medio (34.5 m) y (c) y (f) a la estación de fondo (44.5 m).

En la estación 3 (Figura 4.3.2.7) también se observan dos oscilaciones con características inerciales en la componente U para los días 93 y 126, 4 de abril y 7 de mayo respectivamente. La componente V en superficie presenta una varianza alta. En el fondo, a partir del día 105 comenzaron a aparecer registros de corrientes malos que se ven reflejados por una muy baja varianza al final de la serie.

En fondo, para la estación 4 (Figura 4.3.2.8) vuelven a verse representados registros erróneos en la serie (Figura 4.3.2.4). En los días 76, 92 y 127 (18 de marzo, 3 de abril y 8 de mayo respectivamente) se observan en superficie oscilaciones con frecuencias inerciales. En medio se observa una oscilación entre los días 65 y 76 (del 8 al 18 de marzo) que duró 10 días aproximadamente, que coincide con las tres oscilaciones observadas y analizadas en la sección 4.1 de este capítulo mediante las gráficas de vectores progresivos.

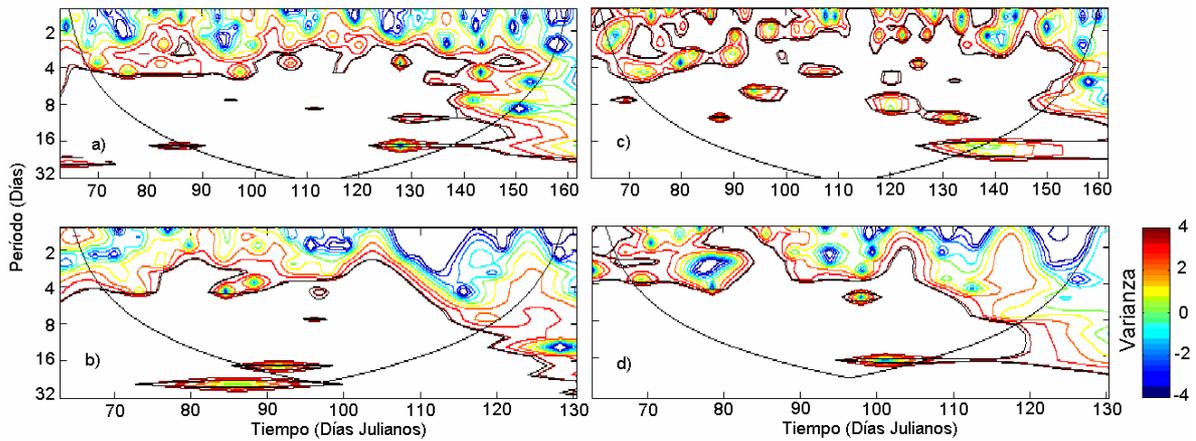


Figura 4.3.2.7. Espectros de las componentes U (Gráficos de la izquierda) y V (Gráficos de la derecha) de la estación 3 mediante Wavelet. Los gráficos (a) y (c) corresponden a la estación de superficie (16 m) y el (b) y (d) a la estación de fondo (23.5 m).

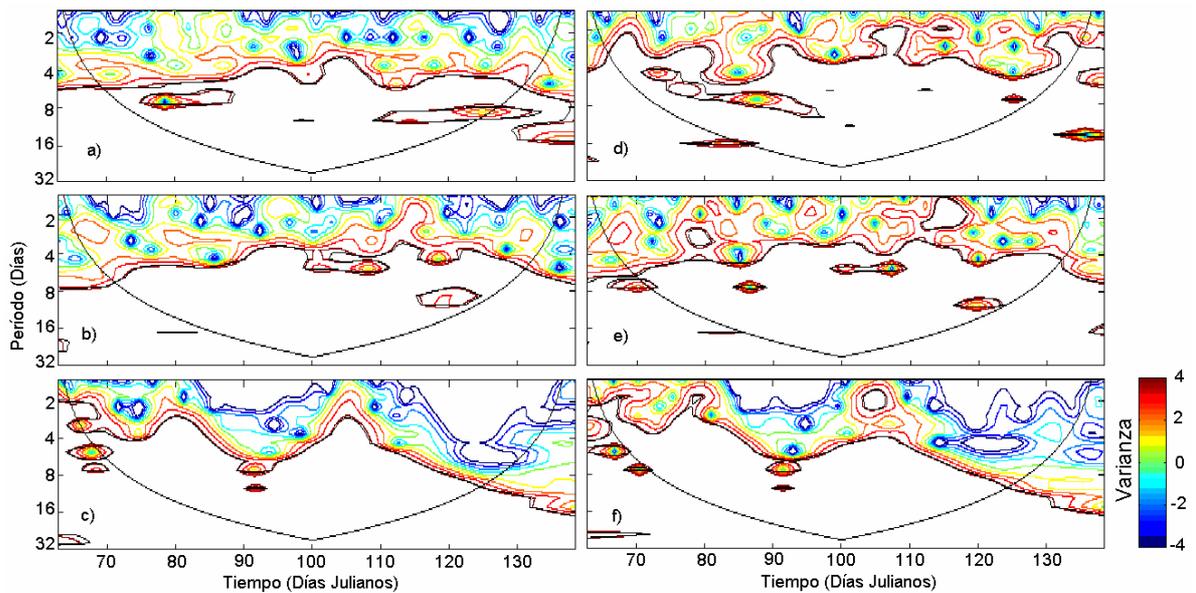


Figura 4.3.2.8. Espectros de las componentes U (Gráficos de la izquierda) y V (Gráficos de la derecha) de la estación 4 mediante Wavelet. Los gráficos (a) y (d) corresponden a la estación de superficie (17.3 m), (b) y (e) a la estación de medio (47.5 m) y (c) y (f) a la estación de fondo (66 m).

## 4.4 MAREA Y CORRIENTES DE MAREA

### 4.4.1 Marea

El fenómeno de las mareas se considera como un movimiento ondulatorio de las masas de agua debido a la atracción gravitacional de los astros.

Los resultados del análisis armónico muestran que en la zona de estudio las mareas presentan dos tipos, una con características diurnas y otra de tipo mixta con dominancia diurna.

La marea diurna se presenta en la estación 2 ubicada en el área de las plataformas petroleras de PEMEX (Figura 3.1.1.1), en la sección media. La marea de tipo mixta con dominancia diurna se presenta en la estación 1, situada cerca de Cayo Arcas, en la sección norte y en la estación 4, ubicada cerca de Laguna del Carmen, en la sección sur.

Fundamentalmente se analizaron las componentes principales de marea. Las amplitudes de las componentes de marea analizadas fueron en general ligeramente mayores en la estación 4 para la  $S_2$ ,  $K_1$  y  $O_1$ , en el caso de la  $M_2$  la mayor amplitud se presenta en la estación 2 (Figura 4.4.1.1). Comparando las amplitudes de los armónicos para las estaciones 1 y 4 con profundidades de 77 y 75.5 m respectivamente, se ve que existe correspondencia de las amplitudes con la profundidad. Sin embargo, la estación 2 es la que se encuentra a menor profundidad, con una diferencia de 24 m respecto a la estación 4 y no por esto presenta mayor amplitud que esta, con excepción de la  $M_2$ . Otra razón del por qué las menores amplitudes se encuentran en la estación 1 se debe a la proximidad con una anfidromía localizada cerca de Puerto Progreso, Yucatán, reportada por Salas de León y Monreal Gómez (1997) mediante la solución de un modelo de mareas para el Golfo de México.

En las tablas 4.4.1.1, 4.4.1.2 y figura 4.4.1.1 puede observarse que el corrimiento de fase es menor entre las estaciones 2 y 4 que entre la 1 y la 2, existiendo un mayor retraso en la estación 2 para la  $M_2$  y  $K_1$ .

Al existir ángulos de fase menores en la estación 1 y mayores en las estaciones 2 y 4, con un defasaje más pequeño entre las estaciones 2 y 4 respecto a la 1 se puede inferir que la dirección de propagación de la onda de marea en estos puntos es perpendicular a la costa con un pequeño retraso en su parte media.

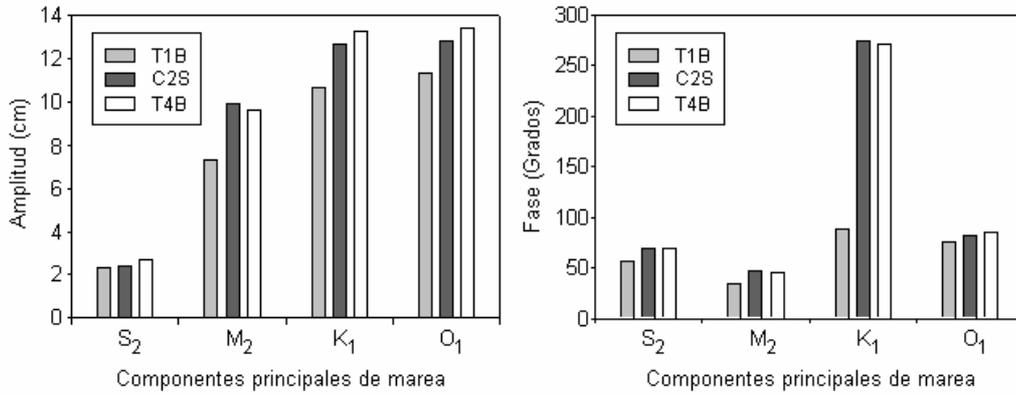


Figura 4.4.1.1. Esquema comparativo de las amplitudes y fases de los principales armónicos de marea para las estaciones T1B, T4B y C2S.

Tabla 4.4.1.1. Características de las armónicas analizadas.

Est.	Num. Forma	Clase	S <sub>2</sub>		M <sub>2</sub>		K <sub>1</sub>		O <sub>1</sub>	
			H(cm)	ϕ	H(cm)	ϕ	H(cm)	ϕ	H(cm)	ϕ
T1B	2.27	MCDD	2.33	56.855	7.33	33.6039	10.68	88.0430	11.32	75.3664
C2S	4.68	D	2.37	68.5954	9.92	46.3724	12.63	273.9755	12.80	81.6950
T4B	2.16	MCDD	2.69	69.8392	9.61	46.1680	13.28	270.7673	13.40	85.2803

D: Marea de tipo Diurna.

MCDD: Marea de tipo Mixta con Dominancia Diurna.

Tabla 4.4.1.2. Diferencia de fase de las armónicas analizadas entre las estaciones.

Est.	S <sub>2</sub>	M <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	O <sub>1</sub>
T1B	1:53:42	1:09:30	5:51:06	5:24:18
<b>Defasaje</b>	<b>23.4 min</b>	<b>26.4 min</b>	<b>12 h 21 min</b>	<b>27.2 min</b>
C2S	2:17:06	1:35:54	18:12:42	5:51:30
<b>Defasaje</b>	<b>2.48 min</b>	<b>25 seg</b>	<b>12 min</b>	<b>15.4 min</b>
T4B	2:19:36	1:35:30	17:59:54	6:06:54

#### 4.4.2 Corrientes de marea

Las series de tiempo de corrientes fueron filtradas mediante análisis armónico para descomponer la señal y extraer los principales constituyentes de la marea observados a través del análisis espectral, éstos corresponden a las armónicas K<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, M<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, K<sub>1</sub>, y O<sub>1</sub>.

Las armónicas que presentaron el mayor porcentaje de contribución fueron la  $M_2$  y la  $K_1$ , por lo que aquí sólo se presentan estos resultados.

Para la  $M_2$  se encontró en la amplitud una diferencia entre superficie y fondo de  $1.24 \text{ cm s}^{-1}$  en la estación 1;  $1.57 \text{ cm s}^{-1}$  en la estación 2;  $0.04 \text{ cm s}^{-1}$  en la 3 y  $0.24 \text{ cm s}^{-1}$  en la estación 4, con desfase de 1 h 48 min, 0.7 min, 33.16 min y 2 h 5 min, respectivamente. En superficie el desfase entre las estaciones 1 y 2 fue de 45 min, entre la 2 y la 3 de 18 min y de 1 h entre la 3 y la 4. Entre la estación 1 y 4 el desfase fue de 2 h 3 min.

La componente  $K_1$  presentó una mayor dominancia en las estaciones 2, 3 y 4, mientras que en la estación 1 las mayores amplitudes correspondieron a la  $M_2$ . Las diferencias en amplitud entre superficie y fondo fueron de  $0.4 \text{ cm s}^{-1}$  en las estaciones 1 y 3,  $0.26 \text{ cm s}^{-1}$  en la 2 y  $1.49 \text{ cm s}^{-1}$  en la estación 4. Las diferencias de fase entre superficie y fondo fueron de 57 min para la estación 1, 1 h 15 min para la 2, 1 h 17 min para la 3 y 6 h 34 min para la estación 4. Para esta componente existe una diferencia de fase en superficie de 4 h 35 min entre las estaciones 1 y 4, con 1 h 9 min entre la 1 y la 2, 5 min entre la 2 y la 3 y 3 h 31 min entre la 3 y la 4.

Las menores amplitudes de la corriente de marea se observaron en las estaciones más profundas, producto a que el fondo frena la corriente debido a la fricción y hace que esta decrezca con la profundidad.

Las mayores intensidades de las corrientes de marea se observaron en las estaciones 1 y 2, con máximos de  $11.3 \text{ cm s}^{-1}$  y  $8 \text{ cm s}^{-1}$  respectivamente (Figuras 4.4.2.1 y 4.4.2.2), mientras que en las estaciones 3 y 4 los máximos son del orden de  $3.1 \text{ cm s}^{-1}$  y  $3 \text{ cm s}^{-1}$  respectivamente (Figuras 4.4.2.3 y 4.4.2.4). También se puede observar que estas son generalmente más intensas en dirección positiva del eje de las abscisas.

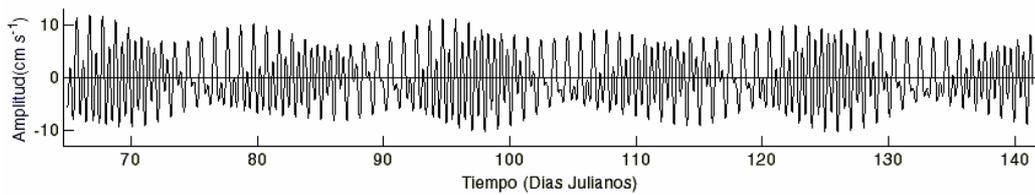


Figura 4.4.2.1. Serie periódica de corriente de marea en superficie para la estación 1.  
Componente U.

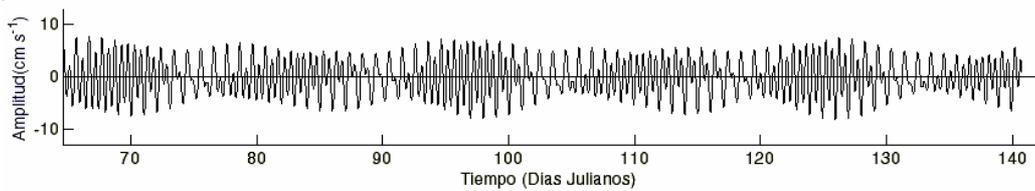


Figura 4.4.2.2. Serie periódica de corriente de marea en superficie para la estación 2.  
Componente U.

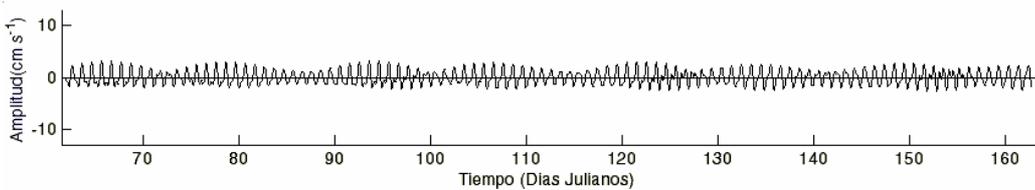


Figura 4.4.2.3. Serie periódica de corriente de marea en superficie para la estación 3.  
Componente U.

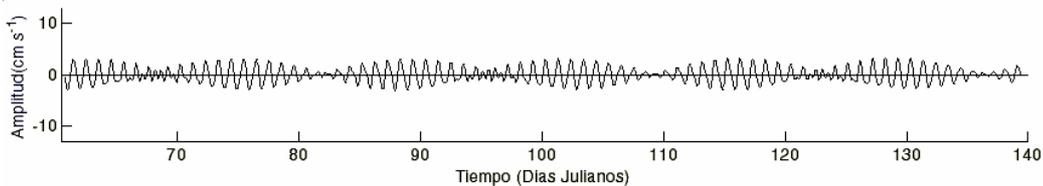


Figura 4.4.2.4. Serie periódica de corriente de marea en superficie para la estación 4.  
Componente U.

Las corrientes de marea, al igual que las variaciones del nivel del mar, dependen del carácter de la marea (semidiurna, diurna, mixta), del relieve del fondo y de la configuración de la cuenca. En dichas corrientes y oscilaciones del nivel también influyen la fuerza de desviación debida a la rotación de la tierra y a la fuerza de fricción.

En las estaciones 1, 2 y 4 se observó una diferencia entre el máximo de amplitud de marea y el máximo de velocidad de la corriente de marea para la  $M_2$  de 3 h 30 min, 3 h 11 min y 2 h 19

min, respectivamente. Para la  $K_1$  la diferencia de fase calculada fue de 5 h 46 min, 4 h y 5h 25 min para las mismas estaciones, respectivamente.

La figura 4.4.2.5 muestra el desfase entre la variación del nivel del mar y la serie periódica de corriente de marea para el día 12 de marzo de 1997 en la estación 1.

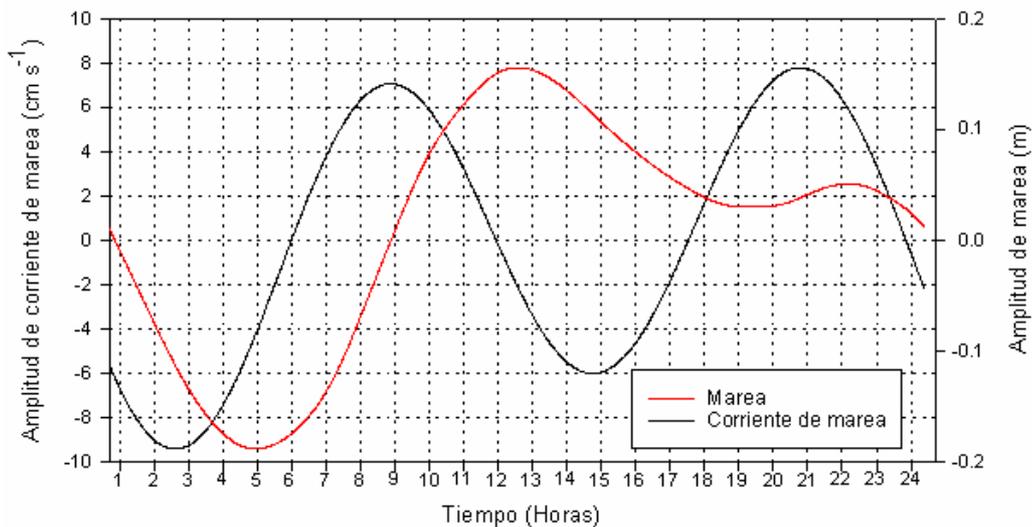


Figura 4.4.2.5. Corrimiento de fase entre la variación del nivel y la corriente de marea. Estación 1, 12 de marzo de 1997.

La intensidad de la corriente aumenta progresivamente y alcanza un máximo en medio de un período de flujo que es aproximadamente igual a un cuarto del período de la marea; luego decrece progresivamente hasta la inversión de la marea.

El anexo I muestra los valores de la amplitud y el ángulo de fase de los principales constituyentes de la corriente de marea analizada.

## CAPITULO V

### 5.1 DISCUSIÓN

Los resultados muestran que en la zona de estudio las corrientes son más intensas en la estación 4, ubicada cerca de Laguna del Carmen, en la sección sur, con valores máximos en superficie para U de  $98.36 \text{ cm s}^{-1}$  y V de  $-38.83 \text{ cm s}^{-1}$ , con rangos de variación entre  $149.34$  y  $76.52 \text{ cm s}^{-1}$ , respectivamente. Las menores intensidades se presentaron en la estación 1, cerca de Cayo Arcas, en la sección norte, con valores máximos en superficie para U de  $-27.59 \text{ cm s}^{-1}$  y V de  $42.34 \text{ cm s}^{-1}$ , con rangos de variación de  $51.47$  y  $64.56 \text{ cm s}^{-1}$ , respectivamente. Entre las estaciones 2 y 3 la diferencia en magnitud no es significativa pero en general se observó una disminución en la intensidad de la corriente de oeste a este en el área.

Las corrientes tienen una dirección predominante paralela a la costa, coincidiendo con las líneas de igual profundidad indicando una predominancia barotrópica. En la columna de agua las direcciones de las corrientes no presenta grandes diferencias a pesar de existir retardos fuertes entre la marea en superficie y fondo, pero en magnitud es apreciable la disminución que se observa desde la superficie hacia el fondo producto de la fricción.

En la estación 1 las direcciones predominantes se presentaron en las direcciones noroeste (NO) y nornoroeste (NNO); en la estación 2 estas fueron entre el oeste (O) y el sursuroeste (SSO). La estación 3 en superficie presentó mayor frecuencia en la dirección oeste suroeste (OSO) y en fondo hacia el este (E) y suroeste (SW). En la estación 4 se observa un patrón de circulación muy similar en la columna de agua, con las mayores frecuencias hacia el estenordeste (ENE).

El patrón de circulación descrito anteriormente es muy similar al observado por Díaz-Flores (2004) usando perfilador acústico en el B/O Justo Sierra (14 de agosto al 1 de septiembre de 1996). En esta zona Díaz-Flores (2004) describe la presencia de un giro ciclónico en la región suroeste de la Bahía, con las corrientes más intensas en la porción sur del giro como resultado

de la disminución de la profundidad. La figura 5.1.1 muestra el patrón de circulación observado mediante perfilador acústico, sobre el cual se ubicaron las estaciones de muestreo correspondientes al actual estudio.

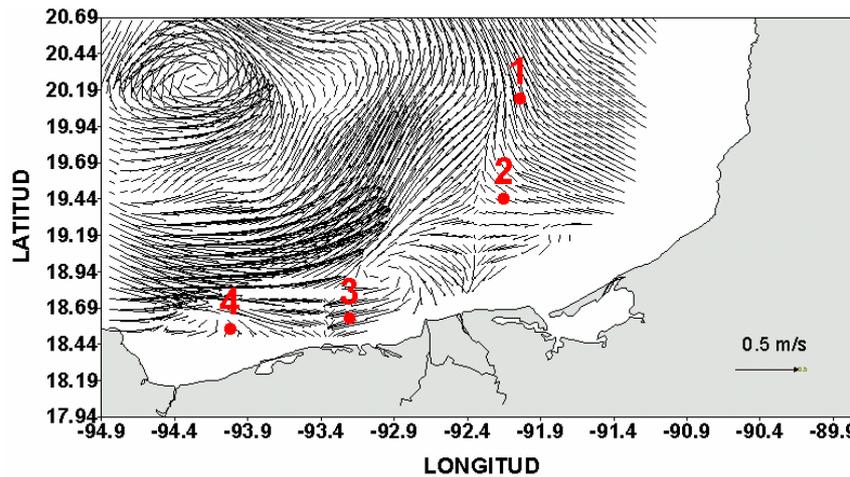


Figura 5.1.1. Patrón de circulación en la Bahía de Campeche obtenido mediante Perfilador Acústico Doppler (ADCP) en la capa de 4 a 20 m de profundidad entre el 14 de agosto y el 1 de septiembre de 1996. (Díaz-Flores, 2004). Los puntos rojos corresponden a la ubicación de las estaciones de medición mediante correntómetros fijos de este estudio.

Las mayores temperaturas se presentan en los meses de mayo y junio, con tendencia a seguir aumentando a medida que culmina la temporada de estiaje y se aproxima la de lluvias. Esta tendencia es más apreciable en las estaciones 3 y 4 donde las series de tiempo son más largas. Los mínimos de temperatura en las estaciones 1 y 2 se presentaron en el mes de abril con un descenso muy marcado, al parecer debido a algún evento meteorológico que por el período de duración de esta baja puede estar asociado a un norte, afectando toda la columna de agua, influyendo también en la disminución de la salinidad y en el aumento de la magnitud de las corrientes. En las estaciones 3 y 4 este descenso no se observa en la temperatura pero sí en la salinidad y en el aumento de la magnitud de las corrientes. La evolución que se observa en la tendencia de la salinidad es inversa a la temperatura, disminuyendo a medida que culmina la época de secas.

Mediante análisis espectral con transformada rápida de Fourier y de Wavelet se observaron oscilaciones con períodos inerciales de 34.85, 36.04, 37.58 y 37.72 h que corresponden con los calculados teóricamente para las estaciones 1, 2, 3 y 4, respectivamente. Con la Transformada de Wavelet se pudo localizar en el dominio del tiempo las componentes inerciales, permitiendo establecer una comparación con los resultados obtenidos a través de los diagramas de vectores progresivos.

En los diagramas de vectores progresivos se observaron algunas oscilaciones que por la escala de tiempo y el sentido de la rotación podían ser inerciales; a éstas se les calcularon el radio del círculo de inercia y el período inercial. Esta información coincide con la obtenida mediante las transformadas de Fourier y Wavelet. El método de Wavelet se realizó a las series filtradas con períodos mayores a 25 h, pudiendo observar oscilaciones inerciales con una duración aproximada entre dos y tres días, a intervalos irregulares cada cierto tiempo. En la estación 1 se presentaron estas oscilaciones los días 2 de abril y 14 de mayo, en la 2 el 29 de marzo y 3 de mayo, en la 3 el 4 de abril y el 7 de mayo y en la estación 4 se presentaron el 18 de marzo, 3 de abril y 8 de mayo.

Pollard y Millard (1970) encuentran que la evolución y decaimiento rápido de las corrientes inerciales no son debido a una dispersión de oscilaciones inerciales fuera de una región forzada. Estos autores llegan a la conclusión que la desaparición de oscilaciones inerciales debe ser debida a una segunda tensión del viento con dirección contraria a las oscilaciones inerciales existentes en la capa superficial. Este argumento fue apoyado después por Smith (1973). Kundu (1976) manifiesta que esto puede ser verdad pero no es el único factor responsable de la intermitencia de las oscilaciones inerciales. Hasselman (1970) explica que la intermitencia es producida por varios mecanismos como: la no homogeneidad horizontal del océano, la componente horizontal de la fuerza de Coriolis, interacciones no lineales con corrientes de frecuencias bajas, etc.

La amplitud de las oscilaciones inerciales son ligeramente mayores para la componente V, decayendo lentamente con la profundidad. En algunos casos, como en las estaciones 2 y 4, se encontró que la amplitud de las oscilaciones inerciales son ligeramente mayores por debajo de la capa superficial. Esto puede ser debido a la propagación de grupos de ondas internas, que en este caso son muy difíciles de detectar a través de estos resultados ya que contamos como máximo con arreglos de tres correntómetros e intervalos de registro de 20 minutos, lo que no nos permite tener información de toda la columna de agua.

En el área estudiada se presentan dos tipos de mareas; una con características diurnas localizada en el área de plataformas petroleras de PEMEX (Est. 2) y otra de tipo mixta con dominancia diurna que se localiza cerca de Cayo Arcas (Est. 1) y al norte de Laguna del Carmen (Est. 4).

Las mayores amplitudes de la marea corresponden a la estación 4 y las menores a la estación 1, lo que puede estar relacionado con la proximidad a una anfídomía localizada cerca de Puerto Progreso, Yucatán, reportada por Salas de León y Monreal Gómez (1997) mediante la solución de un modelo de mareas para el Golfo de México. Lo contrario sucede con las componentes en la corriente generada por la marea. Las mayores intensidades de las corrientes de marea se observaron en las estaciones 1 y 2, con máximos de  $11.3$  y  $8 \text{ cm s}^{-1}$  respectivamente, mientras que en las estaciones 3 y 4 los máximos son del orden de  $3.1$  y  $3 \text{ cm s}^{-1}$  respectivamente, lo que comparado con las intensidades de la corriente de la serie original estas son muy pequeñas, concentrándose la energía en las bajas frecuencias. Esto reafirma que el mecanismo de generación de las corrientes en la zona está influenciado por una circulación de mayor escala, que en la Bahía de Campeche es dominada básicamente por un giro ciclónico de mesoescala y una circulación anticiclónica en la región nororiental de la bahía (Díaz-Flores, 2004).

## **5.2 CONCLUSIONES**

En el área de estudio las mayores magnitudes y las direcciones más frecuentes de las corrientes son paralelas a las isóbatas.

Se presentan dos tipos de marea; una con características diurnas en el área de las plataformas petroleras de PEMEX y otra de tipo mixta con dominancia diurna que se localiza cerca de Cayo Arcas y al norte de Laguna del Carmen.

La componente astronómica de la marea no es el principal mecanismo que genera las corrientes en el área. El mecanismo principal está influenciado por una circulación de mayor escala y bajas frecuencias.

Las series de temperatura y salinidad muestran en general la existencia de procesos con períodos de 24, 12, 8 y 6 h, los que están asociados a un sistema local de brisas.

Se confirma la existencia de una componente en la circulación de baja frecuencia, correspondiente a procesos inerciales, que se presentan de forma irregular con una duración aproximada entre dos y tres días. Las mayores amplitudes de las oscilaciones inerciales corresponden a la componente norte-sur, decayendo lentamente con la profundidad, aunque en algunos casos, como en las estaciones 2 y 4, se encontró que la amplitud es ligeramente mayor por debajo de la capa superficial.

### **5.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

Por la importancia que representa la Bahía de Campeche para México, es recomendable realizar futuros estudios que comprendan una investigación más intensa sobre los procesos inerciales que tienen lugar en el área, empleando métodos de muestreo y metodologías novedosas que ayuden a identificar el origen de estos.

## REFERENCIAS

ANGUIANO ROJAS, R. A., 1996. Introducción al análisis de Fourier. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 263 pp., ils.

ARELLANO, M., 2001. Introducción al análisis clásico de series de tiempo. [en línea] *5campus.com, Estadística*. <<http://www.5campus.com/leccion/seriest>> [19/11/2003].

BEHRINGER, D. W., R. L. MOLINARI AND J. F. FESTA, 1977. The variability of anticyclonic current patterns in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 82(34): 5469-5476.

CARRANZA EDWARDS, A., ROSALES HOZ, L., Y MONREAL GÓMEZ, M. A., 1993. Suspended sediments in the southeastern Gulf of Mexico. *Marine Geology*, 112: 257-269.

COCHRANE, J. D., 1963. *Yucatan Chanel*. Annual Report. Department of Oceanography, Texas A & M University. Ref. 63-18A, 6-11 pp.

COCHRANE, J. D., 1972. Separation of an anticyclone and subsequent developments en the Loop Current (1969) In: *Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico*. L. R. A. Capurro y J. L. Reid, Eds., Gulf Publishing. Co. Houston, 91-106.

COULIBALY, P., Y D. H. BURN, 2004. Wavelet analysis of variability in annual Canadian streamflows. *Water Resources Res.*, 40, W03105, doi: 10.1029/2003WR002667.

CRUZ-OROZCO, R. Y LEY LOU, F., Resumen de las Condiciones Meteorológicas Registradas en la Estación de Investigaciones Marinas “El Carmen”, Durante el año 1976”, Anales del Instituto de Geofísica, UNAM. (1979) Vol. 25, pp. 9-18.

DÍAZ FLORES, M. A., 2004. Estudio de las corrientes en la Bahía de Campeche utilizando un perfilador acústico Doppler (ADCP). Tesis de Maestría. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, 67 pp.

DIETRICH, G., K. KALLE, W. KRAUSS Y G. SIEDLER, 1975. Allgemaine Meereskunde Gebrüder Brotrager. Berlin, Stuttgart. 593 pp.

EMERY, W.J., AND R.E THOMSON, 1997. Data analysis methods in physical oceanography. Elsevier Science B. V., Amsterdam, The Netherlands. 637 pp.

GODIN, G., 1972. The Analysis of Tides. University of Toronto Press, Toronto. 264 pp.

HASSELMAN, K., 1970. Wave-driven inertial oscillations. *Geophys. Fluid Dyn.*, 1, 463-502.

HURLBURT, H. E. AND J. D., THOMPSON, 1980. A numerical study of loop current intrusions and eddy shedding. *Journal of Physical Oceanography*, 10, 1611-1651.

KNAUSS, J.A., 1978. Introduction to physical oceanography: Prentice-Hall, 338 pp.

KUNDU, P. K., 1976. An analysis of inertial oscillations observed near Oregon Coast. *Journal of Physical Oceanography*, 6: 879-893.

KUNZE, E., 1985. Near-inertial wave propagation in geostrophic shear. *Journal of Physical Oce.*, 15, 544-565.

LAVÍN, M., 1997. Contribuciones a la oceanografía física en México. Unión Geofísica Mexicana.

MCLELLAN, H.J., 1965. Elements of physical oceanography. Pergamon Press.

MERRELL, W. J. JR. AND J. M. MORRISON, 1981. On the circulation of the Gulf of México with observations from april 1978. *Journal of Geophysical Research*, 86 (C5): 4181-4185.

MONREAL-GÓMEZ, M. A., D. A. SALAS DE LEÓN Y H. VELAZCO MENDOSA. 2004. La hidrodinámica del Golfo de México. En. *Diagnóstico Ambiental del Golfo de México*. (comp.). M. Caso, I. Pisanty y E. Ezcurra. 47-68 pp.

NAVA, F. A., 2002. Procesamiento de Series de Tiempo. México, Fondo de Cultura Económica, 349 pp.

NEHRING, R., 1978. Ciencia y Desarrollo, Campos petroleros gigantes y recursos mundiales de petróleo. CONACyT.. 199 p.

NOWLIN, W. D. Jr., 1972. Winter circulation patters and property distributions. In: *Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico*. L. R. A. Capurro y J. L. Reid, Eds., Gulf Pub. Co., Houston 3-15.

NOWLIN, W. D. JR. AND J. M. HUBBERTZ, 1972. Contrasting summer circulation patterns for the eastern Gulf Loop current versus anticyclonic ring. In: *Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico*. L. R. A. Capurro y J. L. Reid, Eds., Gulf Pub. Co., Houston 119-138.

PADILLA PILOTZE, A. R., F. G. RUIZ-RENTERÍA Y M. A. ALATORRE-MENDIETA, 1985. Datos oceanográficos de la Bahía de Campeche. Campaña CIBAC-2, 7-22 de junio de 1978. Informe CONACYT.

PADILLA PILOTZE, A. R., SALAS DE LEÓN, D. A., Y MONREAL GÓMEZ, M. A. (1990). Evidencia de un giro ciclónico en la Bahía de Campeche. *Ciencias Marinas*, 16(3): 1-14.

POLLARD, R. T., 1970. On the generation by winds of inertial oscillations in the ocean. *Deep-Sea Res.*, 17: 795-812.

R. C. MILLARD, 1970. Comparison between observed and simulated wind-generated inertial oscillations. *Deep-Sea Res.*, 17: 813-821.

SALAS DE LEÓN, D. A. Y MONREAL GÓMEZ, M. A., 1986. The role of the Loop Current in the Gulf of México fronts. In: *Marine Interfaces Ecohydrodynamics*. J. C. J. Nihoul Ed. *Elsevier Oceanogr. Series*, 295-300.

SALAS DE LEÓN, D. A., MONREAL GÓMEZ, M. A., Y ALFREDO RAMÍREZ, J., 1992. Períodos característicos en las oscilaciones de parámetros meteorológicos en Cayo Arcas, México. *Atmósfera*, 5: 193-205.

SALAS DE LEÓN, D. A., MONREAL GÓMEZ, M. A., Y COLUNGA ENRÍQUEZ, G., 1992. Hidrografía y circulación geostrofica en el sur de la Bahía de Campeche. *Geofísica Internacional*, 31(3): 315-323.

SALAS DE LEÓN, D. A., MONREAL GÓMEZ, M. A., SANVICENTE AÑORVE, L., Y FLORES COTO, C., 1996. Influence de la circulation à long terme sur la répartition des organismes zooplanctoniques dans la Bahie de Campeche, Mexique. *Oceanologica acta*, 21(1): 87-93.

SALAS DE LEÓN, D. A. Y MONREAL GÓMEZ, M. A., 1997. Mareas y circulación residual en el Golfo de México, en: M. F. Lavín, editor, *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*, Monografía No. 3, Unión Geofísica Mexicana, p. 201-223.

SALAS DE LEÓN, D. A. Y MONREAL GÓMEZ, M. A., 1997. Mareas y circulación residual en el Golfo de México, en: M. F. Lavín, editor, *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*, Monografía No. 3, Unión Geofísica Mexicana, p. 201-223.

SATO, K., AND M. YAMADA, 1994. Vertical structure of atmospheric gravity wave revealed by the wavelet analysis. *Journal of Geophysical Research-Atm.*, 99: 20623-20631.

SECRETARÍA DE PESCA, 1990. Anuario estadístico de pesca 1988. Dirección General de Informática y Estadística, México. 351 p.

SMITH, D. C., 1986. A numerical study of loop current eddy interaction with topography in the Western Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 16: 1260-1272.

SMITH, R., 1973. Evolution of inertial frequency oscillations. *J. Fluid Mech.*, 60: 383-389.

SMITH, L. C., D. TURCOTTE, y B. L. ISACKS, 1998. Stream flow characterization and feature detection using a discrete wavelet transform. *Hydrol. Processes*, 12: 233-249.

STEWART-GORDON, J., 1979. El petróleo en México y en el mundo, El petróleo mexicano: mitos, realidades y futuro. En: CONACyT (Ed.). CONACYT, pp. 259-268.

TÁPANES, J. J., Y F. GONZÁLEZ-COYA, 1980: Hidrometeorología del Golfo de México y Banco de Campeche. *Geofísica Internacional*, 19(4): 335-354.

VÁZQUEZ DE LA CERDA A. M., 1975. Currents and waters of the upper 1200 meters of the southwestern Gulf of Mexico. Tesis de Maestría en Ciencias, Texas E&M University, August 1975.

VELAZCO-MENDOZA H., 1989. Los giros de mesoescala en la Bahía de Campeche. Tesis de Licenciatura. Universidad Veracruzana, 118 pp.

VIDAL-LORANDI, V. M. V., F. V. VIDAL-LORANDI Y J. M. PEREZ-MOLERO, 1988. Atlas Oceanográfico del Golfo de México: Vol. I; Inst. de Inv. Eléctricas. Grupo de Estudios Oceanográficos. Cuernavaca, Mor., México, 415 pp.

VUKOVICH, F. M. AND G. A. MAUL, 1985. Cyclonic eddies in the eastern Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 15: 105-117.

WILLIAM S., 1962. An introduction to physical oceanography.

## ANEXO I

Valores de la amplitud y ángulo de fase de los constituyentes de corriente de marea analizados.

Estación	Armónica	Período de la armónica (h)	Amplitud (cm s <sup>-1</sup> )	Angulo de fase (grados)
C1SU	K <sub>2</sub>	11.97	1.2399	282.0895
	S <sub>2</sub>	12	1.3111	274.1350
	M <sub>2</sub>	12.42	5.0979	292.1479
	N <sub>2</sub>	12.66	1.2185	304.0300
	K <sub>1</sub>	23.93	3.4021	316.7601
	O <sub>1</sub>	25.82	1.6930	014.7048
C1SV	K <sub>2</sub>	11.97	0.3927	351.2529
	S <sub>2</sub>	12	0.3742	358.3901
	M <sub>2</sub>	12.42	1.7009	023.5300
	N <sub>2</sub>	12.66	0.3899	025.8751
	K <sub>1</sub>	23.93	3.0427	040.0878
	O <sub>1</sub>	25.82	1.8526	292.8682
C1BU	K <sub>2</sub>	11.97	1.7206	013.4361
	S <sub>2</sub>	12	1.0767	349.9422
	M <sub>2</sub>	12.42	3.8572	344.6009
	N <sub>2</sub>	12.66	0.9199	008.6955
	K <sub>1</sub>	23.93	3.8259	001.2491
	O <sub>1</sub>	25.82	1.6222	012.7169
C1BV	K <sub>2</sub>	11.97	0.7453	272.4406
	S <sub>2</sub>	12	0.5021	056.6843
	M <sub>2</sub>	12.42	1.4934	279.7709
	N <sub>2</sub>	12.66	0.2822	322.1238
	K <sub>1</sub>	23.93	2.7651	287.7776
	O <sub>1</sub>	25.82	1.5365	323.9971
C2SU	K <sub>2</sub>	11.97	1.0051	304.1887
	S <sub>2</sub>	12	0.9470	293.9935
	M <sub>2</sub>	12.42	3.5727	313.9323
	N <sub>2</sub>	12.66	1.0465	323.9981
	K <sub>1</sub>	23.93	2.2793	334.1773
	O <sub>1</sub>	25.82	1.2460	348.2283
C2SV	K <sub>2</sub>	11.97	0.7201	283.3059
	S <sub>2</sub>	12	0.6779	288.1215
	M <sub>2</sub>	12.42	1.7471	289.1472
	N <sub>2</sub>	12.66	0.7212	087.8951
	K <sub>1</sub>	23.93	1.2698	086.9100
	O <sub>1</sub>	25.82	0.8000	276.1975
C2MU	K <sub>2</sub>	11.97	0.4656	316.0063
	S <sub>2</sub>	12	0.6527	278.0705
	M <sub>2</sub>	12.42	2.4040	305.9302
	N <sub>2</sub>	12.66	0.7349	327.3315
	K <sub>1</sub>	23.93	2.9430	312.6704
	O <sub>1</sub>	25.82	1.0054	046.2325
C2MV	K <sub>2</sub>	11.97	0.3998	338.5706
	S <sub>2</sub>	12	0.1958	278.8696
	M <sub>2</sub>	12.42	0.7970	271.9312
	N <sub>2</sub>	12.66	0.5585	063.1053
	K <sub>1</sub>	23.93	1.8487	040.3889
	O <sub>1</sub>	25.82	1.1792	333.9967
C2BU	K <sub>2</sub>	11.97	0.5863	318.4764
	S <sub>2</sub>	12	0.7752	294.1409
	M <sub>2</sub>	12.42	1.9964	313.5485
	N <sub>2</sub>	12.66	1.1001	348.9408
	K <sub>1</sub>	23.93	2.0094	353.1618
	O <sub>1</sub>	25.82	0.5431	049.3440

Continuación....

C2BV	K <sub>2</sub>	11.97	0.3495	312.8597
	S <sub>2</sub>	12	0.5354	273.2318
	M <sub>2</sub>	12.42	1.0090	296.5981
	N <sub>2</sub>	12.66	0.5291	331.0687
	K <sub>1</sub>	23.93	1.5350	293.3037
	O <sub>1</sub>	25.82	0.9361	041.8876
C3SU	K <sub>2</sub>	11.97	0.0997	290.4121
	S <sub>2</sub>	12	0.3721	019.7315
	M <sub>2</sub>	12.42	0.6235	322.8657
	N <sub>2</sub>	12.66	0.3501	359.8769
	K <sub>1</sub>	23.93	1.5955	332.8062
	O <sub>1</sub>	25.82	0.4572	277.8467
C3SV	K <sub>2</sub>	11.97	0.2889	284.3945
	S <sub>2</sub>	12	0.6162	281.8853
	M <sub>2</sub>	12.42	0.6313	273.3198
	N <sub>2</sub>	12.66	0.3047	284.5671
	K <sub>1</sub>	23.93	1.8679	069.0837
	O <sub>1</sub>	25.82	0.2570	355.7077
C3BU	K <sub>2</sub>	11.97	0.2895	042.1661
	S <sub>2</sub>	12	0.2843	009.9692
	M <sub>2</sub>	12.42	0.6647	338.8871
	N <sub>2</sub>	12.66	0.3953	011.9549
	K <sub>1</sub>	23.93	1.1379	352.2947
	O <sub>1</sub>	25.82	0.0798	310.7738
C3BV	K <sub>2</sub>	11.97	0.2882	302.8115
	S <sub>2</sub>	12	0.3351	278.8339
	M <sub>2</sub>	12.42	0.4009	324.8035
	N <sub>2</sub>	12.66	0.2764	307.1711
	K <sub>1</sub>	23.93	1.5798	287.3559
	O <sub>1</sub>	25.82	0.0471	272.1071
C4SU	K <sub>2</sub>	11.97	0.1253	027.1683
	S <sub>2</sub>	12	0.2085	313.7895
	M <sub>2</sub>	12.42	0.3312	352.0210
	N <sub>2</sub>	12.66	0.3632	342.3563
	K <sub>1</sub>	23.93	1.5724	025.7870
	O <sub>1</sub>	25.82	1.3131	033.2552
C4SV	K <sub>2</sub>	11.97	0.1910	079.3383
	S <sub>2</sub>	12	0.2517	300.4865
	M <sub>2</sub>	12.42	0.6115	332.8824
	N <sub>2</sub>	12.66	0.4442	318.5954
	K <sub>1</sub>	23.93	1.6070	284.1136
	O <sub>1</sub>	25.82	1.1566	302.3224
C4MU	K <sub>2</sub>	11.97	0.0963	328.1335
	S <sub>2</sub>	12	0.1741	312.0926
	M <sub>2</sub>	12.42	0.1652	006.6202
	N <sub>2</sub>	12.66	0.1449	359.8960
	K <sub>1</sub>	23.93	1.2615	325.0320
	O <sub>1</sub>	25.82	0.7463	002.6232
C4MV	K <sub>2</sub>	11.97	0.2531	018.5383
	S <sub>2</sub>	12	0.2627	010.3304
	M <sub>2</sub>	12.42	0.4423	330.5713
	N <sub>2</sub>	12.66	0.0172	271.0606
	K <sub>1</sub>	23.93	1.1501	054.8306
	O <sub>1</sub>	25.82	0.7812	311.2143
C4BU	K <sub>2</sub>	11.97	0.0870	326.7446
	S <sub>2</sub>	12	0.1090	012.3057
	M <sub>2</sub>	12.42	0.0818	052.4900
	N <sub>2</sub>	12.66	0.0654	072.9786
	K <sub>1</sub>	23.93	0.4641	286.7758
	O <sub>1</sub>	25.82	0.3068	303.2274
C4BV	K <sub>2</sub>	11.97	0.0986	322.2972
	S <sub>2</sub>	12	0.1755	333.3678
	M <sub>2</sub>	12.42	0.1867	016.0012
	N <sub>2</sub>	12.66	0.1459	017.1038
	K <sub>1</sub>	23.93	0.1614	019.7190
	O <sub>1</sub>	25.82	0.2080	300.7761

## ANEXO II

### ANÁLISIS ESPECTRAL MEDIANTE TRANSFORMADA DE FOURIER

El análisis de Fourier es una herramienta fundamental para el estudio de fenómenos periódicos, principalmente en áreas como la Electrónica, Climatología, Hidrología, Acústica, entre otros. En general las series de Fourier representan una forma conveniente de estudiar fenómenos cíclicos como es el caso de las variables oceanográficas, objetivo de este estudio.

#### Serie de Fourier de funciones periódicas

Una función  $f(t)$  se dice que es periódica si está definida para todo  $t$  real y si existe el número positivo  $T$  y satisface la condición:

$$f(t) = f(t + T) \quad (12)$$

donde  $T$  es un intervalo constante.

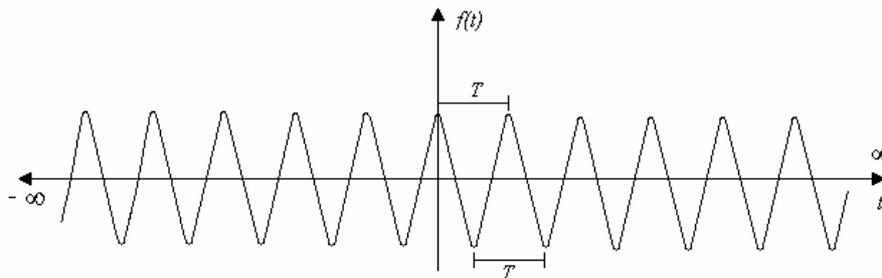


Figura II.1 Función periódica.

El valor más pequeño de  $T$  que cumple la condición se conoce como período de  $f(t)$ . De la misma forma, generalizando, se entiende que si  $n$  es un entero cualquiera:

$$f(t) = f(t + nT) \quad (13)$$

Las funciones periódicas más conocidas son las trigonométricas, ya que satisfacen la condición dada por la ecuación 13. Frecuentemente, en algunos problemas prácticos se presentan fenómenos periódicos o que se les puede considerar como tales. Estos fenómenos pueden representarse como una serie infinita de términos trigonométricos de la siguiente forma:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nt + b_n \operatorname{sen} nt) \quad (14)$$

donde  $a_0$ ,  $a_n$  y  $b_n$  son los coeficientes de la serie de Fourier, los que están dados por:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos ntdt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \operatorname{sen} ntdt \end{aligned} \quad (15)$$

a los cuales se les conoce como integrales de Euler-Fourier.

### **Teorema de la Serie de Fourier (o Condición de Dirichlet)**

1. Cualquier función periódica  $f(t)$  con período ( $T$ ) que sea integrable en cualquier intervalo puede ser representada por la serie de Fourier. Esto es si:

$$\int_{t_1}^{t_1+T} f(t) dt = \text{valor finito} \quad (16)$$

2. Si además  $[f(t)]^2$  es integrable, entonces la serie de Fourier converge al valor  $f(t)$  en cualquier punto donde  $f(t)$  es continua.

Si en  $t = t_1$  la función periódica  $f(t)$  no es continua, de manera que el valor de la función por la derecha es diferente del valor de la función por la izquierda, esto es  $f(t_1^+) \neq f(t_1^-)$ , entonces en ese punto ( $t_1$ ) la serie converge al valor medio de la discontinuidad:

$$\frac{1}{2}(f(t_1^+) + f(t_1^-)) \quad (17)$$

## ANÁLISIS ARMÓNICO

A los datos obtenidos se les realizó un análisis armónico para conocer la variabilidad y características principales de las oscilaciones.

El análisis armónico se realizó a partir los coeficientes de Fourier  $a_0$ ,  $a_n$  y  $b_n$  de la serie para los períodos fundamentales encontrados a partir del análisis espectral aplicado a las series.

Los coeficientes de Fourier se calcularon mediante las ecuaciones siguientes:

$$a_0 = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N f(i)$$

$$a_n = \left(\frac{2}{N}\right) \sum_{i=1}^N f(i) \cos(2n\pi t(i)/T) \quad (18)$$

$$b_n = \left(\frac{2}{N}\right) \sum_{i=1}^N f(i) \text{sen}(2n\pi t(i)/T)$$

donde  $N$  es el número de datos o longitud del período fundamental,  $f(i)$  es el valor de la  $i$ -ésima observación,  $n$  es el número de la armónica,  $t(i)$  es el tiempo y  $T$  es el período del armónico individual.

De esta forma la Transformada de Fourier proporciona el método para descomponer una señal en sus componentes armónicos y conocer, así, los constituyentes periódicos más importantes presentes en la serie.

En este caso, como conocemos el período de las variaciones cíclicas calculamos de forma independiente las armónicas de mayor contribución. En caso contrario, hubiera sido necesario

calcular la serie con el mayor número de armónicas o en todo caso la serie completa, con  $N/2$  armónicas y luego eliminar las componentes de menor contribución.

Conociendo los coeficientes de Fourier en la serie podemos reconstruir los armónicos individuales de las series (Figura II.2) a partir de la siguiente ecuación:

$$f(t) = \sum_{n=1}^N [a_n \cos(nw_o t) + b_n \text{sen}(nw_o t)] \quad (19)$$

donde  $w_o$  es la frecuencia angular, que está dada por:

$$w_o = \frac{2\pi}{T} \quad (20)$$

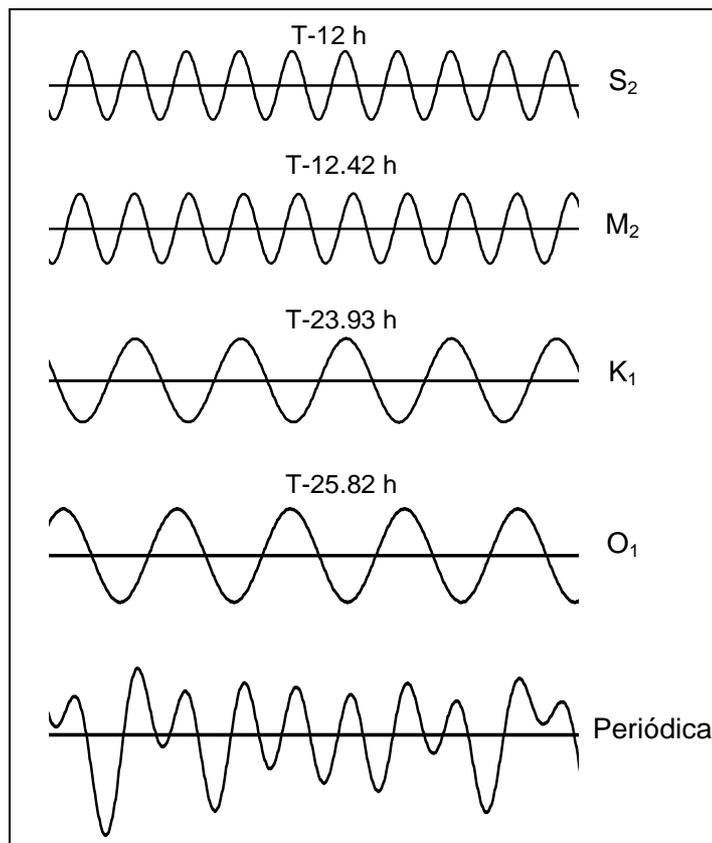


Figura II.2 Representación gráfica de las componentes principales de marea  $S_2$ ,  $M_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  y la función periódica resultante de la suma de los armónicos para un período de cinco días.

La forma en que la serie de Fourier reconstruye a una señal es a través de la suma de funciones cosenoidales. Estas funciones tienen diferentes amplitudes y períodos, las cuales al sumarse con diferentes ángulos de fase van reconstruyendo a la función original. Cada una de estas señales tiene una amplitud definida por el coeficiente de la serie  $A_n$ , que representa el rango desde el valor medio de la armónica hasta el mayor valor o punto más alto de la armónica y por el ángulo de fase  $\phi_n$  que indica el desplazamiento que la señal tiene con respecto al origen.

Donde:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (21)$$

$$\phi_n = \arctan(a_n / b_n) \quad (22)$$

Por lo que la serie de Fourier, en su forma trigonométrica quedará representada por:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^N A_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T} + \phi_n\right) \quad (23)$$