

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN
SUPERIOR DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

**Distribución de las ondas cuasi-inerciales en el oeste del
Golfo de México**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Beatriz Ixetl García Gómez

Ensenada, Baja California, México

2015

Tesis defendida por

Beatriz Ixetl García Gómez

y aprobada por el siguiente comité

Dr. Enric Pallàs Sanz
Director del Comité

Dr. Julio Candela Pérez
Miembro del Comité

Dra. Sharon Zinah Herzka Llona
Miembro del Comité

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
*Coordinador del Programa de
Posgrado en Oceanografía Física*

Dr. Jesús Favela Vara
Director de Estudios de Posgrado

Marzo, 2015

Resumen de la tesis que presenta Beatriz Ixetl García Gómez como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

Distribución de las ondas cuasi-inerciales en el oeste del Golfo de México

Resumen elaborado por:

Beatriz Ixetl García Gómez

Las ondas inercio-gravitatorias (OIGs) son corrientes rápidas y de pequeña escala muy importantes en la mezcla vertical del océano interior. Las oscilaciones inerciales (OIs), generadas en la capa de mezcla por el esfuerzo del viento, son las OIGs de menor frecuencia, mayor energía cinética, y rotan con frecuencia inercial f . Existen pocos trabajos en literatura sobre las OIs en las aguas Mexicanas del Golfo de México (GoM) principalmente debido a la falta de datos insitu. El objetivo principal de este trabajo es describir la distribución espacial y temporal de la energía cinética (ECi) de las ondas cuasi-inerciales (OCIs) en el oeste del GoM con datos de velocidad horizontal medida con correntímetros acústicos instalados en 30 anclajes ubicados entre los 90° y 98° W y los 18° - 26° N durante el periodo de septiembre de 2008 a septiembre de 2012. Las componentes horizontales de las corrientes cercanas a las inerciales (u' , v') se han obtenido con un filtro pasa banda butterworth en la banda frecuencial $[0.9 - 1.1]f$. La mayor cantidad de ECi superficial ($< 70\text{m}$), promediada durante los 4 años, se observó entre los 94° - 96° W y alrededor de los 22° N; mientras que la menor cantidad de energía ocurre en los anclajes mas someros. Los promedios temporales indican que la estación con mayor (menor) ECi es la de invierno (verano). Se ha calculado el trabajo realizado por el viento sobre las OCIs utilizando vientos North American Regional Reanalysis. En promedio, la distribución horizontal del flujo de energía a las OCIs es mayor en el norte y tiene una estacionalidad similar a la ECi; máximo (mínimo) en invierno (verano). Específicamente, la componente meridional del trabajo es la mas importante lo cual sugiere que los pulsos de viento que generan las OCIs son eventos "Nortes" que tienen una fuerte componente noroeste-suroeste como muestran las elipses de variabilidad. Finalmente se exploran los mecanismos por los cuales las OIs escapan de la capa de mezcla, así como las características típicas de los paquetes de OCIs que contribuyen al promedio (frecuencia, longitud de onda, velocidad de grupo, etc.). Las OCIs tienen a amplitudes promedio de 18 cm s^{-1} , escalas verticales de $\sim 350\text{ m}$ y se propagan verticalmente con una velocidad de grupo de -20 m/día . De acuerdo con la teoría, los resultados muestran una mayor (menor) propagación vertical de las OCIs dentro de anticiclones (ciclones) y una amplificación de la energía a los $\sim 1000\text{ m}$ dentro de los anticiclones.

Palabras Clave: **Ondas inerciales, Golfo de México, vorticidad**

Abstract of the thesis presented by Beatriz Ixetl García Gómez as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Master in Sciences in Physical Oceanography.

Distribution of the Near-Inertial Oscillations in the Gulf of Mexico

Abstract by:

Beatriz Ixetl García Gómez

The inertia gravity waves (IGWs) are fast currents that are very important in mixing the deep ocean. The inertial oscillations (IOs), generated by the wind stress on the surface mixed layer, are the IGWs with the lowest frequency, the highest kinetic energy, and they oscillate with a frequency close to the local inertial frequency f . There are only few studies about these oscillations in the Mexican waters of the gulf of Mexico (GoM). The objective of this work is to describe the spatial and temporal distribution of the kinetic energy (KEi) of the near-inertial oscillations (NIOs) in the west of the GoM using the observations of 30 moorings from September 2008 to September 2012. The current time series are filtered using a Butterworth bandpass filter centered in the local inertial frequency for each mooring ($[0.9 - 1.1]f$). The mean KEi at the surface ($< 70\text{m}$) has a maximum at 22°N between $[94^\circ - 96^\circ \text{W}]$; while the lowest KEi occurs in the shallow waters. The time averages suggest higher (lower) values of KEi during winter (summer). We analyze the wind work done to the inertial oscillations using the database of North American Regional Analysis. In average sense, the wind work is larger on the north and has a seasonal cycle similar to the KEi. The meridional component of the wind work is the most important component suggesting that the wind-events called "Nortes" are the main forcing of the NIOs. Finally we analyze the mechanisms for vertical propagation of the KEi and the main characteristics of the NIOs (frequency, vertical wavelength, vertical group velocity, etc.). The NIOs have typical vertical wavelengths of $\sim 350 \text{m}$, a vertical group velocity of -20m/day and amplitudes of 18cm/s . According to the theory, our results indicate more (less) vertical propagation of the wave energy in anticyclonic (cyclonic) eddies, and a maximum of KEi at $\sim 1000 \text{m}$ near the base of the anticyclonic eddies.

Keywords: **Near-inertial oscillations, Gulf of Mexico, vorticity**

Dedicatoria

A mis Padres. A mi familia. A los amigos.

Agradecimientos

A el Dr. Enric Pallàs, por su valioso tiempo, su paciencia, entusiasmo y dedicación a este trabajo. Gracias por ser más que un asesor, un amigo. Gracias por alentar en mi ese espíritu de investigación.

A el Dr. Julio Candela y Sharon Herzka, por el tiempo dedicado a este trabajo, gracias por los comentarios, sugerencias y correcciones que permitieron un mejor desarrollo de esta tesis. A el Dr José Ochoa y Dr. Julio Sheinbaum por sus comentarios e ideas que permitieron, no sólo mejorar la tesis, sino abrir mi panorama acerca del tema.

Al grupo CANEK por la recopilación de datos.

A Lupita Pacheco, Carmen Labastida, Lupita Rodriguez, Norma Fuentes y demás apoyo administrativo que sin duda nos hicieron más fáciles las cosas y nos ayudaron siempre.

A mis amigos del DOF: Esther, Ross, Lenna, Javi, Lu G., Lu R., Tenoch, Nat, Mauro, Froy, Caro, Marco. Que sin duda hicieron de este camino un lugar muy agradable y con los cuales me divertí y aprendí mucho.

A Yai, Vonne y Ba, no se que habría hecho sin ustedes, gracias por brindarme su amistad desde hace tanto tiempo y ofrecerme apoyo cuando lo necesito. A Ro, Yama, Monty, que a pesar de los años siguen siendo entrañables amigos y siempre ofrecen una mano para ayudar. Gracias Ro por soportar mis dramas!. A los amigos que aunque no siempre están conmigo, me apoyan desde donde estén: Chuy, Kary, Ju, Luis y Vere.

A Alex. Fuiste una persona muy importante, de la cual he aprendido un montón y a la cual estimo demasiado. Gracias por motivarme ha cumplir mis sueños, a no darme por

vencida y a ser constante en lo que hago. Gracias por la nueva perspectiva que me has ofrecido.

A Rene y Liz mis hermanitos adoptados en la vida, no tengo palabras suficientes para agradecerles todo lo que han hecho por mi y cuanto los quiero.

A mi familia que siempre me ha apoyado desde lejos y me motiva a seguir en este camino. A mis primos y sobrinos que son mi motivación para seguir adelante.

A mis papas. Por el apoyo incondicional que siempre me han brindado y me brindaran. No hay palabras suficientes para agradecerles.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

Al Departamento de Oceanografía Física por el apoyo económico brindado para terminar mis estudios de maestría.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	iii
Resumen en inglés	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xiv
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo General	4
1.2.2. Objetivos Particulares	5
2. Área de estudio	6
3. Datos y Métodos	7
3.1. Datos	7
3.1.1. Corrientes	7
3.1.2. Viento	9
3.1.3. Elevación del nivel del Mar	10
3.2. Metodología	10
3.2.1. Distribución espacial y temporal de OCIs	11
3.2.2. Distribución del viento y correlación con OCIs	14
3.2.3. Características de las OCIs	16
3.2.4. Detección de remolinos ciclónicos y anticiclónicos	17
4. Resultados	19
4.1. Distribución espacial y temporal de ondas cuasi-inerciales	19
4.2. Mecanismo de generación de OCIs: Trabajo del viento	32
4.2.1. Distribución espacial del viento	32
4.2.2. Trabajo del viento	36
4.3. Características de las OCIs	44
4.4. Propagación de OCIs hacia el fondo: efecto de la vorticidad	52
5. Discusión	54
5.1. Efecto de la vorticidad sobre las OCIs	58
6. Conclusiones	62
Lista de referencias	64
A. Descripción vertical de un anclaje	68
B. Características de OCIs	71

Lista de figuras

Figura	Página
1. Localización de los anclajes CANEK.	9
2. Energía asociada a las componentes que giran en sentido de las manecillas del reloj (azul) y sentido contrario a las manecillas del reloj (rojo). Se indican las frecuencias asociadas a las componentes de marea diurna ($K1$) y semidiurna ($M2$), y de la frecuencia inercial local (f), así como las líneas correspondientes al 10% alrededor de f	11
3. Serie temporal de datos disponibles en la medición más superficial para cada anclaje. Se incluye a la izquierda el nombre del anclaje y a la derecha la profundidad a la cual es tomada la serie de datos.	13
4. Distribución horizontal superficial de ECi promedio de septiembre 2008 a septiembre 2012. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10% de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 280 km en la meridional.	19
5. Distribución horizontal superficial del Ri (km). Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 25% de error y escalas de decorrelación de 100 km en la dirección zonal y 250 km en la dirección meridional.	20
6. Distribución horizontal superficial del PEi ($(m/s)^2 \text{ cph}^{-1}$). Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10% de error y escalas de decorrelación de 290 km en la dirección zonal y 180 km en la meridional	21
7. Distribución horizontal superficial del OPi (%). Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10% de error y escalas de decorrelación de 200 km en la dirección zonal y 300 km en la meridional.	22
8. Como en la figura 4 pero para la distribución horizontal superficial de la EDi . La escala de color tiene valores de periodos inerciales (Ti). Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas linealmente.	23

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
9. Distribución horizontal superficial de ECI promedio estacional: a) Primavera, b) Verano, c) Otoño e d) Invierno. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10 % de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 280 km en la meridional.	24
10. Distribución horizontal superficial de ECI promedio por año: a) 2008-2009, b) 2009-2010, c) 2010-2011 y d) 2011-2012. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10 % de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 280 km en la meridional.	25
11. Distribución horizontal superficial de ECI promedio durante el verano (junio-agosto): a) 2009, b) 2010, c) 2011 y d) 2012. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10 % de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 280 km en la meridional.	26
12. Distribución horizontal superficial de ECI promedio durante el invierno (diciembre-febrero). a) 2008-2009, b) 2009-2010, c) 2010-2011 y d) 2011-2012. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 20 % de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 200 km en la meridional.	27
13. Distribución horizontal superficial de ECI promedio 2008-2012 durante la temporada de Nortes (Octubre-Mayo). Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10 % de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 280 km en la meridional.	29
14. Distribución horizontal superficial de ECI promedio por año durante la temporada de Nortes (Octubre-Mayo). a) 2008-2009, b) 2009-2010, c) 2010-2011 y d) 2011-2012. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10 % de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 280 km en la meridional.	30

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
15. Distribución horizontal superficial de ECI promedio por año durante la temporada de Huracanes (Junio- Septiembre).a) 2009, b) 2010, c) 2011 y d) 2012. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10 % de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 280 km en la meridional.	31
16. Distribución horizontal superficial de ECI promedio de 2009 a 2012 durante la temporada de Huracanes (Junio- Septiembre). Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10 % de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 280 km en la meridional.	32
17. Distribución horizontal del viento promedio de 2008 a 2012 con datos de NARR. Las flechas indican la dirección promedio del viento, los colores la magnitud promedio y las elipses indican la variabilidad del viento. Las elipses y las flechas poseen la misma escala.	33
18. Distribución horizontal del viento promedio estacional de 2008 a 2012 con datos de NARR: a) Primavera, b) Verano, c) Otoño e d) Invierno. Las flechas indican la dirección promedio del viento, los colores la magnitud promedio y las elipses indican la variabilidad del viento. Las elipses y las flechas poseen la misma escala, que se indica en la esquina inferior izquierda.	34
19. Trayectorias de los huracanes que pasaron por el área de estudio entre 2009-2012. Los números corresponden al huracán nombrado en el texto y los colores simbolizan el año en que ocurrieron: trayectoria verde (2010), trayectoria magenta (2011) y trayectoria azul (2012). Los círculos indican una medición de la NHC. El color de los círculos representa la categoría según la NHC: Depresión Tropical (azul), Tormenta Tropical (negro) y Huracán (rojo).	36
20. Ubicación de los anclajes y la división del área de estudio en las zonas de eventos Norte. Zona Norte (azul), zona Centro-Oeste (verde), Centro-Este (amarillo) y zona Sur (rojo).	37
21. Distribuciones horizontales del trabajo del viento por componentes y total. En la parte superior Π_i y en la inferior Π_{ii} . La primera columna corresponde a la componente $\langle \tau_x u \rangle$ (a y d), la segunda columna es la componente $\langle \tau_y v \rangle$ (b y e) y la tercera al trabajo total $\langle \Pi \rangle$ (c y f). Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10 % de error y escalas de decorrelación de 150 km en la dirección zonal y meridional.	38

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
22. Distribuciones horizontales de $\langle \Pi_i \rangle$ para cada año de estudio. a) 2008-2009, b) 2009-2010, c) 2010-2011 y d) 2011-2012. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10% de error y escalas de decorrelación de 150 km en la dirección zonal y meridional.	39
23. Como en figura 22 pero para distribuciones horizontales de $\langle \Pi_i \rangle$ estacionales. a) Primavera, b) Verano, c) Otoño e d) Invierno.	40
24. Como en figura 22 pero para distribuciones horizontales de trabajo del viento durante la temporada de Nortes. a) $\langle \tau_x u' \rangle$, b) $\langle \tau_y v' \rangle$ y c) $\langle \Pi_i \rangle$	41
25. Como en figura 22 pero para distribuciones horizontales de trabajo del viento durante la temporada de huracanes. a) $\langle \tau_x u' \rangle$, b) $\langle \tau_y v' \rangle$ y c) $\langle \Pi_i \rangle$	41
26. Como en figura 22 pero para distribuciones horizontales de $\langle \Pi_i \rangle$ para cada año de estudio durante la temporada de Nortes .a) 2008-2009, b) 2009-2010, c) 2010-2011 y d) 2011-2012.	43
27. Como en figura 22 pero para distribuciones horizontales de $\langle \Pi_i \rangle$ para cada año de estudio durante la temporada de huracanes .a) 2009, b) 2010, c) 2011 y d) 2012.	43
28. Mapas de condiciones locales al inicio del evento E3. a) Condiciones de viento (dirección y magnitud (m/s)), b) SLA (cm), los contornos indican la periferia de los remolinos detectados (Anticiclón (rojo) y ciclón (azul)) con el método de Chaigneau <i>et al.</i> (2009). En ambos casos la estrella simboliza la posición del anclaje donde se midió el evento.	45
29. Serie temporal del perfil en profundidad de ECi para el evento E3.	46
30. Evolución temporal del perfil en profundidad de la componente v' para el evento E3. En la parte superior el cuadro rojo representa el tiempo que el anclaje estuvo dentro de un remolino anticiclónico.	46
31. Medidas de la frecuencia euleriana. a) Perfil de energía espectral respecto a la frecuencia. ($(m^2s^{-2})cph^{-1}$), y b) Perfil de frecuencia "carrier".	47
32. Promedio en el tiempo del espectro rotatorio de número de onda vertical del evento E3. Energía espectral CW (línea roja) y CCW (línea azul). . . .	48

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
33. Mapas de condiciones locales al inicio del evento E5. a) Condiciones de viento (dirección y magnitud (m/s)), b) SLA (cm), los contornos indican la periferia de los remolinos detectados (Anticiclón (azul) y ciclón (rojo)) con el método de Chaigneau <i>et al.</i> (2009). En ambos casos la estrella simboliza la posición del anclaje donde se midió el evento.	49
34. Serie temporal del perfil en profundidad de ECi para el evento E3.	50
35. Evolución temporal del perfil en profundidad de la componente v' para el evento E5. En la parte superior el cuadro azul representa el tiempo que el anclaje estuvo dentro de un remolino ciclónico.	50
36. Medidas de la frecuencia euleriana. a) Perfil de energía espectral respecto a la frecuencia. ($(\text{m}^2 \text{s}^{-2})\text{cph}^{-1}$), y b) Perfil de frecuencia "carrier".	51
37. Promedio en el tiempo del espectro rotatorio en numero de onda vertical del evento E5. Energía espectral CW (línea roja) y CCW (línea azul). . . .	51
38. Perfil promedio de velocidad total u_h (línea negra), velocidad normalizada u_h^s (línea azul) y frecuencia de Brunt-Väisälä promedio del GoM N_{Gom} (línea roja) del anclaje LNK3500.	52
39. Promedio de la ECi dentro de remolinos anticiclónicos (línea roja) y ciclónicos (línea azul). La sombra representa la variabilidad de la ECi. a) Perfil de ECi y b) Perfil de ECi normalizado	53
40. Espectro rotatorio del viento en diferentes anclajes para la temporada de Nortes del año 2009-2010. En todos los espectros la línea azul (roja) corresponde a la energía CW (CCW).	58
41. ADT promedio de octubre 2008 a septiembre 2012 en el oeste del GoM. . .	60
42. Perfiles verticales de ECi promedio de 2008 a 2012. En línea roja representa los anclajes ubicados a una latitud superior a 21.5° N. La línea azul representa los anclajes ubicados al sur ($\text{Lat} < 21.5^\circ$ N). En ambos casos la sombra representa una desviación estandar.	61
43. Configuración vertical del anclaje Lakahuasa 3500 (LNK3500) localizado en el Oeste del GoM.	68

Lista de tablas

Tabla		Página
1.	Coordenadas de ubicación de los 30 anclajes del grupo CANEK en el oeste de GoM	8
2.	Valores estadísticos (máximo y mediana) de la EC_i , OPI y NE_i calculados estacionalmente para cada año de estudio.	28
3.	Valores estadísticos anuales de eventos Norte para cada zona. Número de eventos Nortes (NEn), duración promedio de los eventos (DEn) y duración máxima de los eventos ($DENm$)	37
4.	Rango de valores de las características de los eventos OCIs según el tipo de tormenta generadora.	44
5.	Características de 20 eventos de OCIs. Nombre de identificación del evento (E), Frecuencia euleriana respecto de f , EC_i máxima calculada ($EC_{i_{max}}$), profundidad de la $EC_{i_{max}}$, EC_i máxima superficial ($EC_{i_{max}^{sup}}$), profundidad de la $EC_{i_{max}^{sup}}$, velocidad inercial máxima (u'_{max}), longitud de onda vertical (λ_z), Velocidad de grupo vertical (C_{gz}), tipo de tormenta que generó la OCI, viento máximo (U_{10}) y signo de la vorticidad local (ζ).	71

Capítulo 1. Introducción

Las ondas inercio-gravitatorias (OIGs) son corrientes rápidas y de pequeña escala muy importantes en la mezcla interior del océano y de la atmósfera. Las OIGs se propagan hacia el interior del océano estratificado e interactúan no linealmente entre ellas y con otras OIGs (Javam *et al.*, 2000) y se dispersan en remolinos y frentes de densidad (Kunze y Sanford, 1984; Kunze, 1985, 1986; Kuo y Polvani, 1999). Las interacciones no-lineales y dispersión, transfieren energía y momento de las ondas de larga escala a las de menor escala, las cuales crecen en amplitud, rompen, y crean pequeñas zonas de turbulencia y mezcla (Garret y Munk, 1975). En el océano las OIGs pueden ser originadas por esfuerzo del viento sobre la superficie del mar (Pollard, 1970; Gonella, 1971), por interacción de la marea y la topografía (Rattray, 1960; Baines, 1973) o, recientemente, se ha estudiado su emisión espontánea por vórtices (Ford, 1994; Viúdez y Dritschel, 2006; Pallàs-Sanz y Viúdez, 2008). El rango de frecuencias de las OIGs está contenido entre la frecuencia inercial o frecuencia de Coriolis (f) y la frecuencia de Brunt- Väisälä (N).

Las oscilaciones inerciales (OIs) son generadas en la superficie por efecto del viento, y son las OIGs de menor frecuencia intrínseca $^1(\omega)$, i.e., $\omega = f$ y también las de mayor energía cinética (Garret y Munk, 1975). Las OIs se caracterizan por la rotación del vector velocidad en sentido horario (antihorario) en el Hemisferio Norte (Hemisferio Sur) debido a que la fuerza restauradora es la fuerza de Coriolis (Pollard y Millard, 1970):

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = F_x - cu \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = F_y - cv \quad (2)$$

donde u, v son las componentes horizontales de las OIs, y F_x, F_y son las componentes horizontales de la fuerza de cuerpo debida al esfuerzo del viento (fuerza generadora), y c es una tasa de disipación. Las oscilaciones cuasi-inerciales (OCIs), por lo tanto, también son corrientes muy energéticas y oscilan con una frecuencia cercana a f . La escala horizontal de las OCIs es de decenas de kilómetros a cientos de kilómetros mientras que en la vertical tienen longitudes de onda de algunos metros a cientos de metros. A pesar

¹La frecuencia de un paquete de ondas observada desde un punto de vista que se mueve con la velocidad de grupo.

de que estas ondas son generadas en la capa de mezcla, y su movimiento principal es prácticamente horizontal, pueden dispersarse a través de la termoclina y se han observado en todas las profundidades con frecuencias ligeramente por encima de f (Webster, 1968).

Las OCIs son el límite inferior del rango de frecuencias de las OIGs y por lo tanto poseen la misma relación de dispersión:

$$\omega = \left(\frac{N^2 k_h^2 + f^2 m^2}{k^2} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

donde N^2 es la frecuencia de Brunt- Väisälä al cuadrado, k es el vector número de onda tridimensional, y m el número de onda vertical. Si despejamos el número de onda en la dirección vertical, nos queda la siguiente expresión: $m^2 = \frac{(\omega^2 - N^2)k_h^2}{f^2 - \omega^2}$, de donde podemos concluir que si la frecuencia de la onda es igual a f entonces $m \rightarrow \infty$ y por lo tanto las corrientes sólo son horizontales.

De la relación de dispersión de las OIGs podemos deducir la velocidad de grupo vertical:

$$Cg_z = \partial\omega/\partial m \simeq c_z \left(\frac{f^2 - \omega^2}{\omega^2} \right) \quad (4)$$

donde c_z es la velocidad de fase vertical. En consecuencia, para que la propagación de estas ondas, inicialmente generadas en la capa de mezcla, sea hacia el fondo (i.e., $Cg_z < 0$), las OCIs deben ser superinerciales, es decir, la frecuencia de la onda debe ser mayor a f .

Para que la frecuencia de una OI se modifique y exista propagación vertical, se han propuesto diversos mecanismos de dispersión en literatura entre los cuales los más importantes son: a) el efecto Doppler, causado por la interacción del tren de ondas y las corrientes ambientales, i.e., $\mathbf{k}_h \cdot \mathbf{u}_h$ (donde $\mathbf{u}_h = (u, v)$ es el vector velocidad horizontal), y/o b) la vorticidad vertical ($\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$) que cambia la frecuencia inercial a una frecuencia denominada frecuencia efectiva $f_e = f + \zeta/2$. Por lo tanto, dependiendo del signo de ζ , amplía o reduce el rango de frecuencias de las OIGs (Perkins, 1976; Kunze, 1985).

1.1. Antecedentes

La distribución espacial de la energía inercial se ha estudiado por diversos autores en todo el mundo. Alford (2001) describió la distribución estacional de la energía inercial a nivel global utilizando el modelo de capa rígida descrito por Pollard y Millard (1970), forzado por vientos de NCEP-NCAR en un periodo de 1996 a 1999. Este autor encontró una gran cantidad de energía en latitudes altas y principalmente en la zona oeste de los océanos. Estacionalmente observó que la energía era considerablemente mayor durante el invierno en cada hemisferio. Park *et al.* (2005) utilizó la base de datos de flotadores Argo, con la cual describió la estadística general de las OCIs principalmente en el hemisferio norte. A diferencia de otros autores, ellos encontraron una amplitud de OCIs mayor en el verano que en el invierno. Otro estudio realizado a nivel global es el de Alford y Whitmont (2007) en el que se utilizan datos de corrientes obtenidos con anclajes. Sus resultados muestran un ciclo estacional marcado en el hemisferio norte que se manifiesta a diferentes profundidades (i.e., desde los 800 m hasta 4000 m). También se observó una marcada intensificación de las OCIs en latitudes altas. Chaigneau *et al.* (2008) describió de igual manera las OCIs a nivel mundial utilizando datos de más de 8500 derivadores en la superficie del mar. El encontró mayor cantidad de energía cinética inercial durante el otoño e invierno en todas las cuencas oceánicas, asociándolo con la temporada de tormentas. Otros autores como Park *et al.* (2009) y Jochum *et al.* (2013) estudiaron algunas otras características de las OCIs a nivel global utilizando flotadores Argo y el modelo de Pollard y Millard (1970). Estos autores concluyen que, entre otras cosas, conocer la capa de mezcla es un factor importante para el estudio de OCIs e instan en seguir el estudio de las ondas y sus consecuencias en la mezcla vertical del océano. Las OCIs, son pues un mecanismo importante de mezcla vertical que se ha tratado de entender en diversas partes del mundo, estudiando diferentes características espaciales y temporales.

En el golfo de México (GoM) no existen muchos estudios sobre estas ondas, principalmente en las aguas mexicanas, aunque si se han estudiado las OCIs en la zona norte por diversos autores. Chen *et al.* (1996), Jarosz *et al.* (2007) y Anderson y Sharma (2008) estudiaron algunas características de las OCIs en el norte del GoM ($> 25^\circ$ N); los dos primeros utilizaron datos de anclajes y el tercero datos de trazadores. Chen *et al.*

(1996) observó ondas inerciales en todos sus anclajes, es decir en toda la plataforma de Texas-Louisiana, y encontraron que estos eventos eran intermitentes y duraban de 5 a 7 días con coherencias horizontales hasta del orden de 300 km. También observaron una correlación directa entre el cambio del esfuerzo del viento y las ondas inerciales durante el paso de frentes atmosféricos. Jarosz *et al.* (2007) encontraron ondas inerciales con velocidades hasta de 40 cm s^{-1} y a diferencia de Chen *et al.* (1996), ellos observaron que las ondas aumentaban de energía hacia fuera de la plataforma. También encontraron que las ondas eran más energéticas en los meses de verano (Junio- Septiembre 1997) que en los meses de “no-verano” (Noviembre 1997- Marzo 1998). Con respecto a la relación con el viento, Jarosz *et al.* (2007) observaron que las ondas inerciales estaban directamente relacionadas con las brisas marinas cerca de la costa y con el paso de frentes atmosféricos durante el invierno y primavera. Sin embargo, durante el verano observaron que lo más importante es la resonancia entre el viento y las ondas, es decir las brisas y las ondas giran en sentido de las manecillas del reloj y están en fase. Anderson y Sharma (2008) realizaron una estadística general de las ondas inerciales, encontrando una mayor energía durante el verano y espacialmente, la menor energía se presentó en el este del GoM cerca de a corriente del Lazo.

En la zona sur, cerca del golfo de Campeche, Expósito-Díaz *et al.* (2009) estudiaron las OCIs con algunos anclajes someros ($< 100 \text{ m}$); ellos encontraron ondas más intensas hacia fuera de la costa con escalas de decaimiento entre 2 y 4 días. La circulación predominante durante el experimento fue de giros ciclónicos y anticiclónicos, fenómenos a los que ellos adjudican la generación de las OCIs, ya que no se observó una correlación significativa con el viento. Otros autores han estudiado las OCIs generadas durante el paso de huracanes (Price, 1983; Shay y Elsberry, 1987; Jaimes y Shay, 2010).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Caracterizar las ondas cuasi-inerciales en el oeste del golfo de México con datos Eulerianos (*in situ*).

1.2.2. Objetivos Particulares

- Describir la distribución espacial y temporal de las OCIs, así como de su forzamiento (el viento).
- Describir las características típicas de las OCIs.
- Analizar el efecto de la vorticidad ambiental en la propagación vertical de las OCIs.

Capítulo 2. Área de estudio

El área de estudio comprende las aguas mexicanas del oeste del GoM, comprendiendo el área entre los 18 ° y 26° N en latitud y los 90°- 98° W en longitud. El GoM tiene profundidades típicas que van desde la plataforma continental hasta profundidades mayores a los 3500 m en el centro. La circulación en el GoM está dominada por dos flujos semipermanentes y coherentes: la corriente de Lazo (CL) y giros de mesoescala anticiclónicos que se desprenden de la CL y se propagan hacia el oeste del GoM durante meses o hasta más de un año. En el oeste del GoM, además de remolinos anticiclónicos también abundan los remolinos ciclónicos de menor escala y un remolino ciclónico semipermanente en la región conocida como bahía de Campeche (Vázquez de la Cerda *et al.*, 2005). A su vez, este patrón de circulación está forzado por el viento (Dubranna *et al.*, 2011; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2014), la variabilidad del transporte de masa que entra por el canal de Yucatán, y las surgencias del este de la península de Yucatán (e.g., Merino 1997). Respecto a los vientos dominantes en el GoM, durante el verano (y en promedio) dominan las tormentas tropicales provenientes del este, mientras que durante el invierno la región es afectada por tormentas locales provenientes del norte, comúnmente denominadas “Nortes” (de Velasco y Winant, 1996).

Capítulo 3. Datos y Métodos

3.1. Datos

Para el estudio de las ondas cuasi-inerciales, así como de su forzamiento (el viento) y el efecto de la vorticidad se utilizaron diversas bases de datos de anclajes (*in situ*) y de sensores remotos.

3.1.1. Corrientes

Como parte de las actividades del grupo CANEK en el proyecto *Medición y Análisis Metaoceánico del Golfo de México etapa 2009-2013* se instalaron 30 anclajes en el oeste del GOM durante los años 2008-2013. La distribución de los anclajes abarca desde la plataforma (~ 100 m) hasta aguas profundas (~ 3500 m) y están instalados siguiendo las líneas batimétricas de 130, 500, 2000 y 3500 m. Los anclajes se distribuyen en líneas perpendiculares a la costa con el mismo nombre de identificación: Arenque (ARE), Campeche (CAM), Campeche Profundo (CAP), Coatzacoalcos (CTZ), Itinerante 1 (IT1), Itinerante 2 (IT2), Lamprea (LMP), Lankahuasa (LNK) y Perdido (PER). Las coordenadas de cada anclaje se muestran en la tabla 1 y su localización se muestra en la figura 1.

Los anclajes están equipados con diversos instrumentos de medición instalados a diferentes profundidades (correntímetros, termistores, sensores de salinidad y presión) y las variables obtenidas son: velocidad de la corriente, salinidad, temperatura y presión. Un diagrama de ejemplo de un anclaje CANEK, así como la descripción de los instrumentos utilizados se encuentra en el apéndice A.

Para los fines de este trabajo sólo se utilizó la serie de tiempo de velocidad horizontal u_h de septiembre de 2008 a septiembre de 2012, periodo en el que todos los anclajes tuvieron mediciones.

El preprocesamiento de estos datos es el siguiente. Los datos son interpolados horariamente. Previamente a la interpolación y para evitar enmascaramiento (aparición de frecuencias espurias), se ha convolucionado la serie con un triángulo de Pascal cuyo número de coeficientes depende de la resolución temporal de la serie original.

Tabla 1: Coordenadas de ubicación de los 30 anclajes del grupo CANEK en el oeste de GoM

Anclaje	Longitud	Latitud	Anclaje	Longitud	Latitud
ARE130	-97.322	22.017	IT2130	-92.602	19.365
ARE2000	-96.727	22.128	IT21600	-93.757	20.018
ARE3500	-95.017	22.501	IT2560	-92.887	19.548
ARE500	-97.262	22.024	LMP130	-97.323	23.782
CAM130	-92.456	20.952	LMP2000	-96.558	23.638
CAM2000	-92.522	20.981	LMP3500	-95.144	23.384
CAM500	-92.402	20.688	LMP500	-97.323	23.761
CAP2000	-93.387	20.669	LNK130	-96.638	20.419
CAP500	-92.574	19.798	LNK2000	-95.929	20.703
CTZ130	-94.819	18.741	LNK3500	-94.028	21.850
CTZ2000	-94.467	19.979	LNK500	-96.496	20.471
CTZ500	-94.816	18.844	PER130	-96.424	25.640
IT1130	-95.383	18.907	PER2000	-95.457	25.353
IT12000	-95.237	19.279	PER3500	-95.044	25.223
IT1800	-95.319	19.018	PER500	-96.283	25.594

El arrastre por corrientes intensas sumerge el anclaje en forma catenaria, modificando la profundidad de medida de los instrumentos. Por lo tanto es necesario corregir este movimiento utilizando la profundidad instantánea medida por los sensores de presión. Para esta corrección, la localización vertical de la medida original es modificada con base en la presión e interpolada linealmente. Como resultado de esta corrección se perdieron datos de los primeros metros de la columna de agua dependiendo del anclaje (i.e., desde ~ 20 m hasta ~ 200 m en algunos casos).

Posteriormente se interpolaron verticalmente las series temporales cada metro para generar series de datos de los diferentes anclajes a las mismas profundidades. Es importante mencionar que los perfiles verticales de u_h para anclajes profundos (2000 m y 3500 m) fueron recortados hasta los 1500 m de profundidad, esto debido a que las OCIs que deseamos estudiar generalmente no se propagan a mayor profundidad. Una vez interpolados verticalmente, se concatenan los 4 años de datos para cada anclaje y se obtiene finalmente una matriz de $N \times M$, donde N es el tiempo para cada anclaje, y M las profundidades que existen.

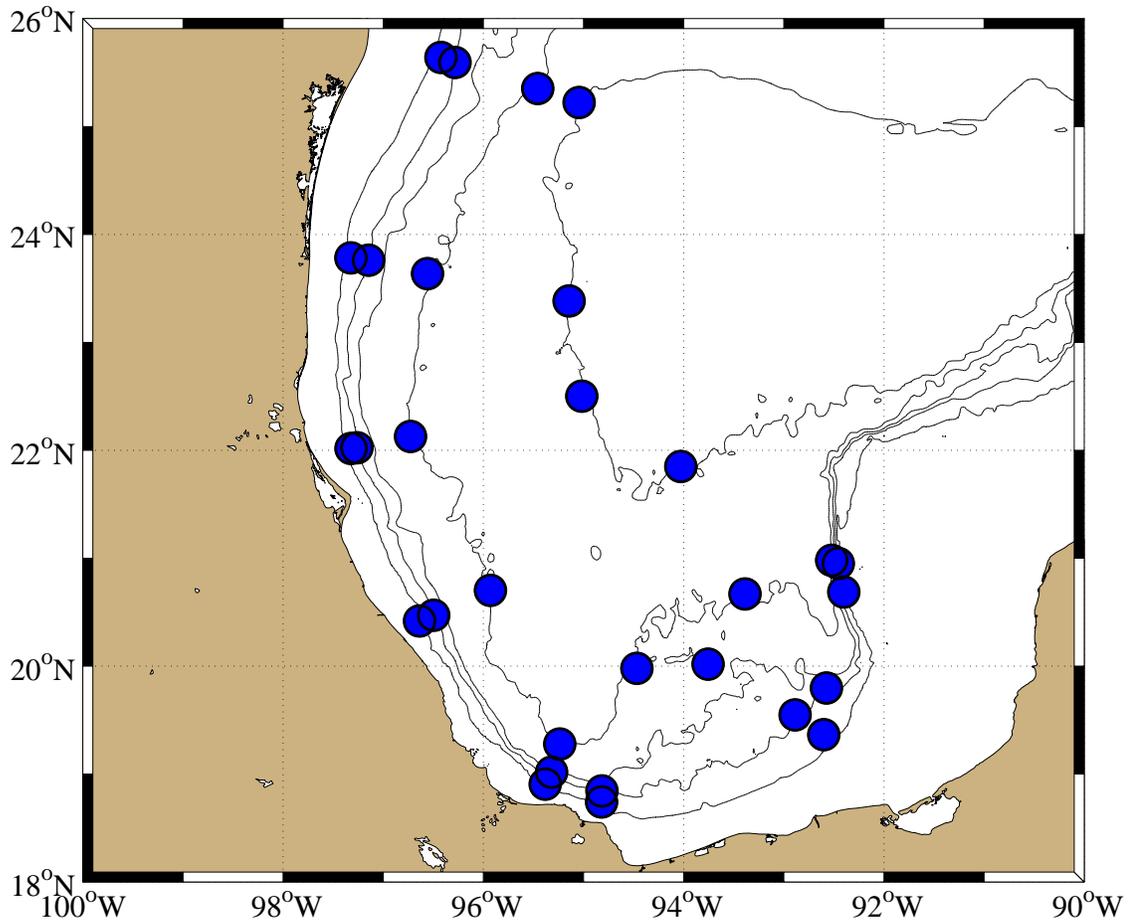


Figura 1: Localización de los anclajes CANEK.

3.1.2. Viento

Se utilizó el producto de viento a 10 m sobre la superficie del mar ($U_{10} = (U, V)$) de la base de datos de viento del Reanálisis Regional de Norte América (NARR por sus siglas en inglés). Este producto tiene una resolución temporal de 3 horas con una resolución espacial de $1/3^\circ$. Se utilizó el periodo correspondiente a las mediciones de corrientes; es decir de septiembre 2008 a septiembre de 2012.

Para algunos cálculos explicados posteriormente, la serie de tiempo de velocidad del viento se interpoló horariamente en la posición de cada anclaje.

3.1.3. Elevación del nivel del Mar

Los datos de anomalías del nivel del mar (SLA) y la Topografía Dinámica Absoluta (ADT por sus siglas en inglés) se obtuvieron del producto altimétrico de AVISO (www.aviso.oceanobs.com) que consiste en la combinación de datos altimétricos de varios satélites (Topex/Poseidon, ERS-1/2, Jason-1, Envisat, etc.). Los datos de SLA y ADT utilizados tienen una resolución espacial de $1/4^\circ$ y una resolución temporal de 7 días (Le Traon et al., 1998). Para obtener mapas de SLA y ADT diarios se hizo una interpolación lineal en el tiempo.

3.2. Metodología

Para lograr los objetivos anteriormente descritos, la metodología se separara en varias partes relacionadas con: (i) distribución espacial y temporal de las OCIs, (ii) mecanismo de generación de OCIs, (iii) características de las OCIs (energía cinética, longitud de onda, velocidad de fase, etc.), y (iv) efecto de la vorticidad local en la dispersión de las OCIs.

Como primer proceso, se calculó un espectro frecuencial rotatorio de las series de velocidad de la corriente (Gonella, 1972). Un análisis espectral consiste en descomponer una serie periódica en una suma de funciones simples, sinusoidales y cosinusoidales, o series de Fourier. El espectro rotatorio es una forma de calcular los coeficientes de Fourier para series de tiempo de cantidades vectoriales. Para este análisis la velocidad se describe como una cantidad compleja es decir $Z = u + iv$ y el resultado son componentes espectrales (o de Fourier) rotatorias ortogonales, es decir una componente que gira en sentido de las manecillas del reloj (CW) y otra en sentido contrario a las manecillas del reloj (CCW).

Como ya se dijo anteriormente las OCIs giran en sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio Norte, por lo cual este tipo de espectros son útiles para identificar la energía asociada a estas ondas y separarla de la energía de otras corrientes existentes.

La frecuencia Nyquist es la frecuencia más alta que puede ser resuelta según la resolución temporal de las mediciones, definida como : $f_N = 1/(2\Delta t)$, donde $1/\Delta(t)$ es

la frecuencia de muestreo. Para las matrices utilizadas esta frecuencia es entonces de $f_N = 0.5$ cph o un periodo de 2 horas. Todos los espectros usados en esta tesis han sido calculados con 8 grados de libertad.

Estos espectros se calcularon para cada profundidad y para todos los anclajes. En la figura 2 se muestra un espectro rotatorio típico calculado a una profundidad de 30 m en el anclaje LNK3500.

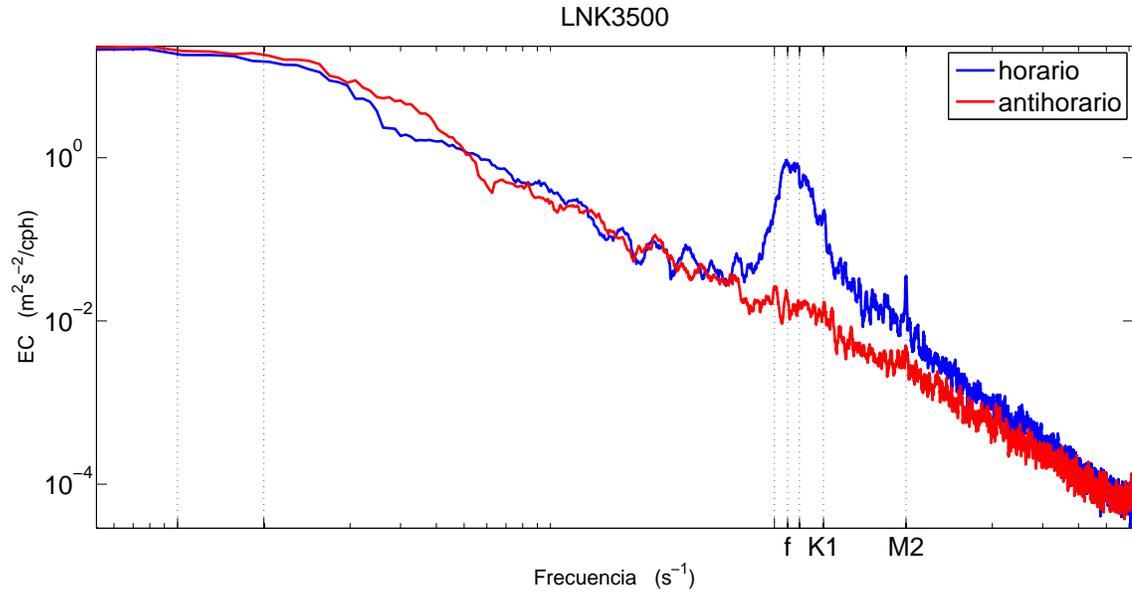


Figura 2: Energía asociada a las componentes que giran en sentido de las manecillas del reloj (azul) y sentido contrario a las manecillas del reloj (rojo). Se indican las frecuencias asociadas a las componentes de marea diurna ($K1$) y semidiurna ($M2$), y de la frecuencia inercial local (f), así como las líneas correspondientes al 10% alrededor de f .

En estos espectros rotatorios se pudo observar que las series temporales están dominadas por OCIs (CW \gg CCW) y el pico espectral no se encontraba exactamente sobre la frecuencia inercial, sino un poco por debajo o por encima de esta.

3.2.1. Distribución espacial y temporal de OCIs

Basados en lo observado en los espectros rotatorios, se filtró la serie de velocidad con un filtro Butterworth utilizando una banda de frecuencia 10 % por encima y debajo de la frecuencia inercial asociada a la latitud de cada anclaje. La serie de velocidad filtrada $\mathbf{u}'_h = (u', v')$ es la que se utiliza para los cálculos posteriores de energía cinética y radio inercial.

Se han calculado tres estimaciones diferentes de la magnitud de las OCIs: energía cinética cuasi-inercial (ECi), radio inercial (Ri) y pico espectral cuasi-inercial (PEi).

- La ECi se calculo con la expresión $ECi = 0.5(u'^2 + v'^2)$; en este trabajo no se incluyo la densidad del agua por lo que la ECi tiene unidades de $m s^{-2}$.
- El Ri esta definido como $|u'_h|^2/f$, expresado en km.
- El PEi lo definimos como: el pico espectral asociado a las componentes que giran CW en la banda de frecuencia $[0.9 - 1.1]f$, y tienen unidades de $m^2 s^{-2} cph^{-1}$

También se calculan otras características importantes de las ondas y su distribución:

- Escala de decaimiento (EDi).
- Porcentaje de ocurrencia de eventos (OPi) de OCIs en el tiempo.

Para estas dos últimas características, se considera que un evento de OCI ocurre cuando la ECi es igual o mayor a $0.0015 m^2 s^{-2}$, tiene una duración mayor a 6 horas, y un espacio temporal mínimo entre cada evento de medio periodo inercial. El Porcentaje de ocurrencia se define como la relación entre el tiempo que existen OCIs al tiempo total.

Para las distribuciones horizontales superficiales se utiliza la medida más superficial de cada anclaje en la cual exista el mayor número de datos y que se encuentre dentro de los primeros 70 m de la columna de agua. Esto con el fin de tener mediciones dentro o lo más cercano posible a la capa de mezcla. En la figura 3 se muestra la cantidad de datos de la medida más superficial de cada anclaje.

Con fines puramente gráficos las medidas de los anclajes se han interpolado objetivamente en una malla regular para obtener una distribución horizontal continua de las variables estimadas en la región de estudio. Un mapa objetivo se obtiene como una regresión múltiple (donde el error cuadrático medio es mínimo) de un conjunto de observaciones discretas. Se utiliza en oceanografía para obtener mapas continuos (mallas regulares) a partir de datos discretos usualmente de una variable ϕ distribuida irregularmente en

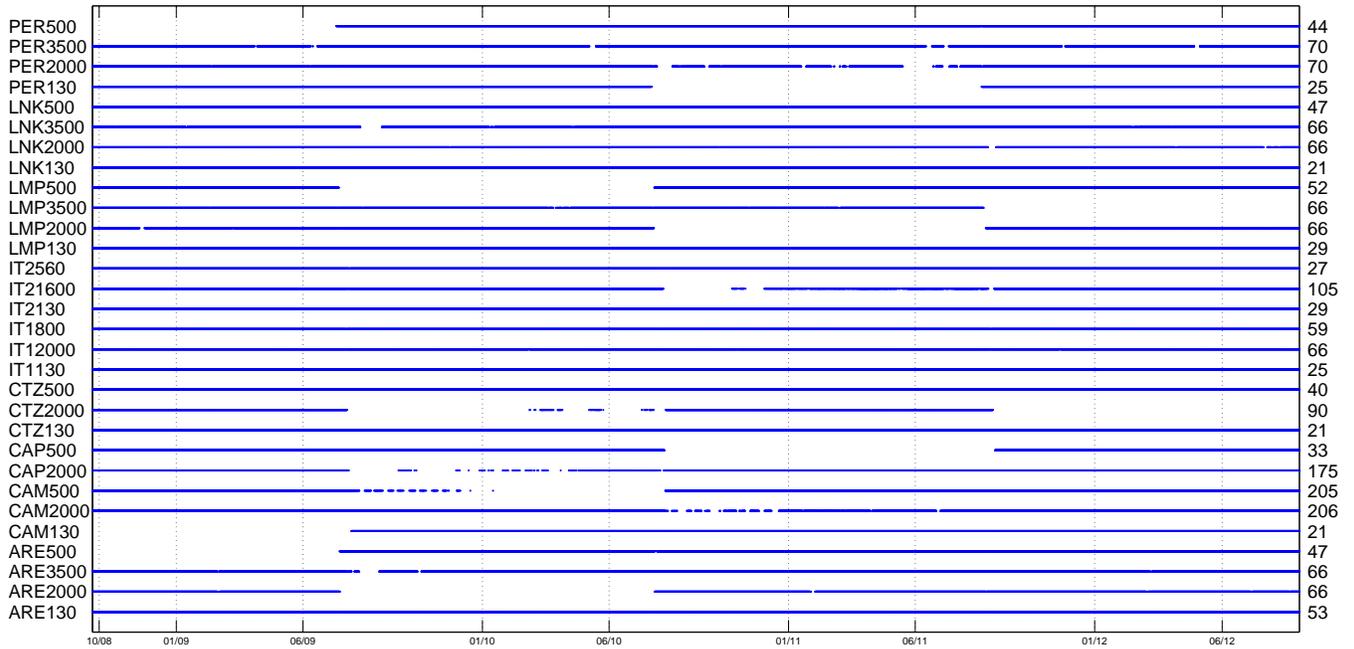


Figura 3: Serie temporal de datos disponibles en la medición más superficial para cada anclaje. Se incluye a la izquierda el nombre del anclaje y a la derecha la profundidad a la cual es tomada la serie de datos.

el espacio. Las variables representadas en el mapa objetivo pueden modificarse de una realización a otra, con lo que debe considerarse las anomalías de las variables (ϕ') en lugar de las variables en sí mismas. Se define un promedio, climatología, o candidato y se extrae a cada variable para obtener las anomalías. En general, para el océano la media es desconocida. En esta tesis se utiliza el promedio de las variables calculadas en todos los anclajes. Se trata de un método objetivo ya que supone el conocimiento previo de la estadística entre los datos, es decir, se debe conocer la matriz de covarianza entre las observaciones r_{ss} , la matriz de covarianza entre las observaciones y los puntos de malla regular r_{gs} , así como el cociente ruido-señal.

$$\eta = \frac{\langle \delta^2 \rangle}{\phi'_g \phi'_g}$$

donde δ es el error instrumental y ϕ'_g es la anomalía interpolada en un punto de malla

$$\phi'_g = r_{gs}(r_{ss} + \eta I)^{-1} \phi' \quad (5)$$

y el error asociado al mapa interpolado es

$$\epsilon = 1 - r_{gs}(r_{rs} + \eta I)^{-1} r_{gs}^T \quad (6)$$

Como se dijo anteriormente, los eventos de OCIs son intermitentes en el espacio y tiempo, por lo cual, con el fin de facilitar la visualización de las distribuciones horizontales se eligieron escalas de decorrelación dependiendo de la variable y la temporada a estudiar.

3.2.2. Distribución del viento y correlación con OCIs

Para observar el comportamiento del viento en la zona de estudio, se calcula la dirección promedio, magnitud, y la varianza, esta última representada en elipses de variabilidad. Estas características del viento fueron calculadas de forma estacional y anual.

Una forma de correlacionar las OCIs con el viento es analizando el flujo de energía ejercido por el viento sobre las corrientes. Esta cantidad es comunmente llamada Trabajo del viento (Π) y se expresa en unidades de potencia sobre área (W m^{-2}). El trabajo del viento se define como:

$$\Pi = \boldsymbol{\tau}_h \cdot \mathbf{u}_h = \tau_x u + \tau_y v \quad (7)$$

donde

$$\boldsymbol{\tau}_h = c_d \rho_a |\mathbf{U}_{10}| \mathbf{U}_{10} \quad (8)$$

donde ρ_a es la densidad del aire, y c_d el coeficiente de arrastre utilizando en este trabajo la parametrización de Large y Pond (1981)

$$c_d = (0.49 + 0.065 |\mathbf{U}_{10}|) \times 10^{-3} \quad (9)$$

El trabajo del viento, entonces, es positivo (negativo) si el vector velocidad de la corriente y el vector del esfuerzo del viento forman un ángulo menor (mayor) de $\pi/2$ y mayor (menor) de $3\pi/2$.

Se calculan dos formas de trabajo del viento: la primera como el producto escalar entre el esfuerzo de viento y la corriente inercial superficial, denominado trabajo del viento

inercial (Π_i), y el segundo, como el producto escalar entre el esfuerzo del viento filtrado en la banda inercial ($[0.9 - 1.1]f$) y la corriente inercial superficial, llamado trabajo inercial-inercial (Π_{ii}).

El trabajo del viento fue calculado para la posición de los anclajes y posteriormente se interpola objetivamente para obtener mapas de distribución horizontal.

Todas las distribuciones horizontales de las variables descritas en la sección 3.2.1 y en esta sección son promediadas en base a los siguientes periodos:

- Distribuciones anuales:
 - 01/10/2008-31/09/2009
 - 01/10/2009-31/09/2010
 - 01/10/2010-31/09/2011
 - 01/10/2011-31/09/2012
- Distribuciones estacionales:
 - Primavera: Marzo, Abril, Mayo
 - Verano: Junio, Julio, Agosto
 - Otoño: Septiembre, Octubre, Noviembre
 - Invierno: Diciembre, Enero, Febrero
- Distribuciones en temporadas según el tipo de tormenta predominante en el área de estudio:
 - Huracanes: Junio-Septiembre
 - Nortes: Octubre-Mayo

Para el cálculo de las distribuciones promedio anuales, estacionales y temporada de Nortes, únicamente se utilizan series temporales con más del 90% de datos y periodos menores de 15 días faltantes. Para la temporada de Huracanes la serie de tiempo promediada debía tener menos de 10 días de datos faltantes y el 99% de datos correspondientes al periodo de 3 días antes y 15 días después de que ocurriera un huracán.

3.2.3. Características de las OCIs

Se buscaron varios eventos de OCIs en las series temporales con la finalidad de obtener las características típicas de estas ondas en el oeste del GoM. Se considero que iniciaba un evento de OCIs cuando la EC_i fuera igual o mayor a $0.002 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. En este caso sólo se conservó la serie temporal cinco días antes de que iniciara el evento y hasta 2 días después de que el evento dejara de observarse en cualquier profundidad, i.e., las OCIs se han disipado. Un problema cuando se utilizan series de tiempo en un sólo punto, es que las ondas se propagan en la vertical a través de un medio no homogéneo. Se ha encontrado que variaciones en la frecuencia de Brunt-Väisälä, es decir en la flotabilidad, causan que una onda interna inercial cambie su amplitud y longitud de onda vertical conforme se propaga en la vertical (Leaman y Sandford, 1975). Por esta razón los perfiles verticales de velocidad horizontal fueron normalizados con la frecuencia de Brunt-Väisälä, siguiendo el procedimiento de Leaman y Sandford (1975):

$$u_n(z) = \frac{u(z)}{(N(z)/N_0)^{1/2}}, \quad (10)$$

donde $u_n(z)$ es la velocidad normalizada a la profundidad z , $u(z)$ es la componente de la velocidad original en la profundidad z , $N(z)$ es el perfil promedio de la frecuencia de Brunt-Väisälä en el GoM, y N_0 es una frecuencia de referencia, en este caso se utiliza el promedio del perfil promedio de la frecuencia Brunt-Väisälä. La coordenada vertical también se modifica de acuerdo con la ecuación diferencial:

$$dz_n = [N(z)/N_0]dz, \quad (11)$$

De donde z_n y z son las coordenadas verticales “estirada” y original, respectivamente.

Para caracterizar a las ondas inerciales se utilizan los siguientes métodos de análisis de datos:

- Se generan mapas de viento y de SLA para observar las condiciones ambientales (locales) durante el inicio del evento de OCIs.
- Se calculan espectros rotatorios en el tiempo para obtener la energía espectral aso-

ciada a las ondas que giran con sentido de las manecillas del reloj y así obtener la frecuencia Euleriana ($\sigma = \omega + \mathbf{u}_h \cdot \mathbf{k}_h$).

- Se filtra la serie temporal de velocidad en la banda de frecuencia $[0.9 - 1.1]f$. Con estas velocidades filtradas se calcula la ECI.
- Se calculan espectros rotatorios respecto a la profundidad para calcular la longitud de onda vertical (λ_z).
- Se calculan coherencias verticales entre las series de velocidad de anclajes cercanos; con estos se puede calcular, longitud de onda vertical (λ_z) y velocidad de fase vertical (c_z).
- Se calcula la velocidad de grupo vertical (Cg_z) realizando una regresión lineal al valor máximo de ECI en cada profundidad respecto al tiempo.

3.2.4. Detección de remolinos ciclónicos y anticiclónicos

Con el fin de evaluar si los anclajes estuvieron dentro o fuera de remolinos de mesoescala, se llevo a cabo un método de detección de remolinos utilizando datos altimétricos interpolados diariamente (Chaigneau *et al.*, 2009). El centro y periferia de los remolinos, así como la posición de cada anclaje respecto al centro como fueron calculados en Sosa Gutiérrez (2014), donde se pueden consultar más detalles de esta metodología. Para cada mapa diario de SLA se buscan ventanas de $1^\circ \times 1^\circ$. Los máximos (mínimos) locales de SLA están asociados a los centros de remolinos anticiclónicos (ciclónicos). Para cada centro, el algoritmo busca contornos cerrados de SLA con un incremento de 0.1 cm. El contorno más externo cerrado asociado a cada centro de los remolinos es considerado como el borde o periferia del remolino. Una vez detectado el borde, la amplitud del remolino es el módulo de la diferencia entre el máximo de SLA en el interior del remolino y la SLA promediada a lo largo del borde.

Una vez identificados los remolinos para cada mapa diario de SLA, se identifican los periodos en que los anclajes estuvieron dentro de remolinos ciclónicos o anticiclónicos. También se identifica la posición relativa de cada anclaje respecto al radio del remolino.

Para esto se calcula la la distancia del anclaje respecto al centro (dB) y se normaliza respecto al radio del remolino dA (distancia entre el centro y la periferia):

$$r = dB/dA$$

Una distancia normalizada de 1 significa que el anclaje está sobre la periferia del remolino, mientras que una distancia 0 indica que el anclaje está en el centro. Así mismo, se calcula el ángulo (en sentido horario) de la dirección radial que pasa por el anclaje y el centro del remolino respecto al norte geográfico (θ). De esta forma la posición de los anclajes esta definida en un sistema de referencia polar definido por una coordenada radial (r) y un ángulo polar (θ).

Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se describen y presentan los resultados más importantes por secciones respondiendo a los objetivos descritos anteriormente.

4.1. Distribución espacial y temporal de ondas cuasi-inerciales

En todas las figuras de esta sección se muestra la distribución horizontal superficial (< 70 m) de las variables ECi, Ri y PEi.

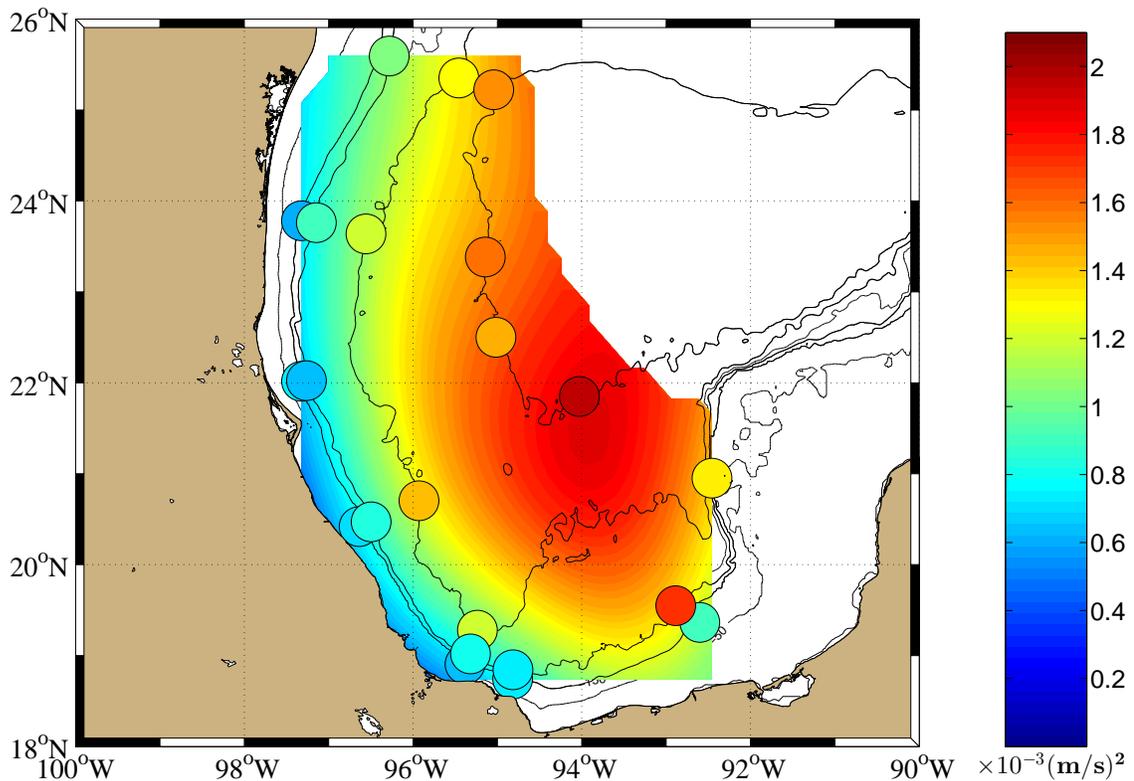


Figura 4: Distribución horizontal superficial de ECi promedio de septiembre 2008 a septiembre 2012. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10% de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 280 km en la meridional.

La distribución horizontal superficial de ECi se muestra en la figura 4. La mayor cantidad de energía se localiza en la zona entre los 93° y 96° Oeste y los 20° y 22° Norte, con un valor máximo de $1.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ localizado en el anclaje LNK3500 (94.08° O, 21.85° N). En general se observa mayor ECi en la zona profunda que cerca de la costa.

El radio inercial es una medida de la magnitud de las OCIs normalizada por f y, consecuentemente, es una función de la latitud (figura 5). Las ondas con radios más grandes

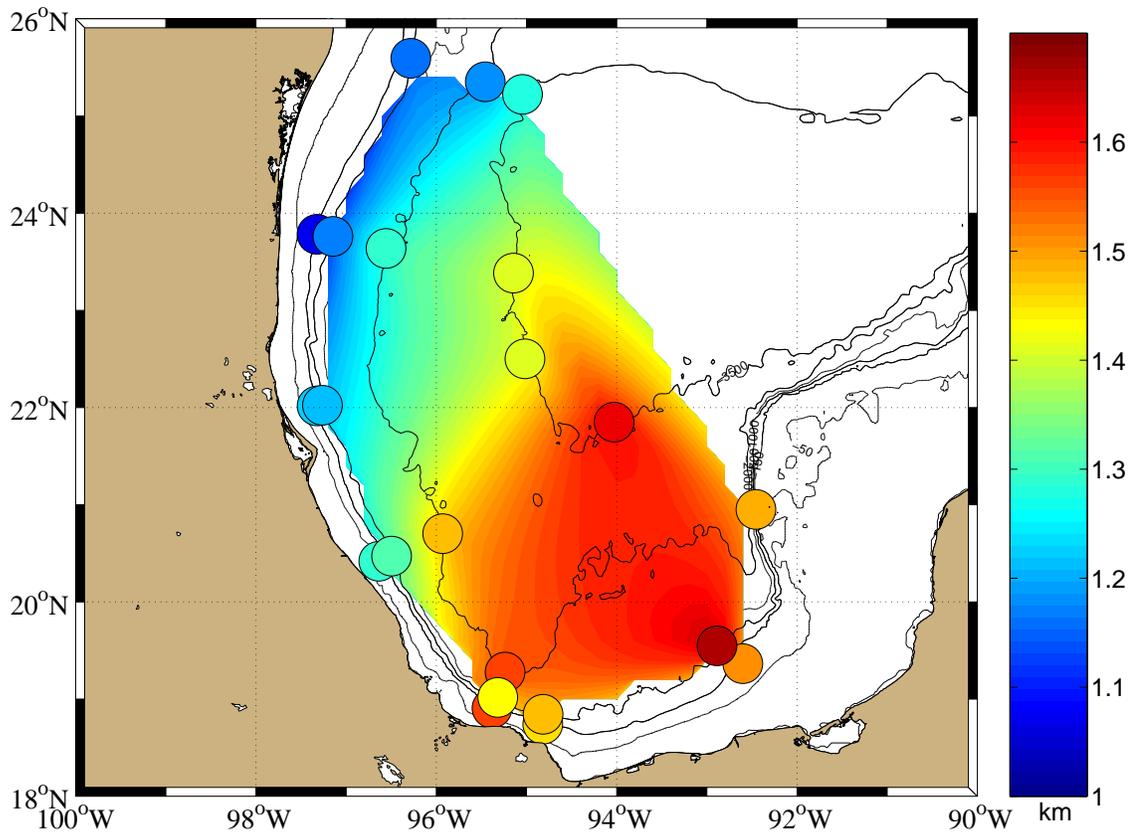


Figura 5: Distribución horizontal superficial del Ri (km). Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas linealmente.

se encuentran hacia el sur del GoM, principalmente en la zona conocida como el golfo de Campeche. Consistentemente con la distribución de EC_i (figura 4), en la zona somera las OCIs tienen radios más pequeños en relación a las OCIs presentes en la zona profunda.

En la figura 6 se muestra la distribución horizontal de la energía asociada al pico espectral CW en la banda inercial. Esta medida es utilizada para observar si la EC_i calculada con el filtro nos representa adecuadamente la energía de las OCIs en la zona y si el ancho de banda del filtro elegido es el adecuado. Al igual que lo que se observa para la EC_i , la PE_i es mayor en aguas profundas que en la zona costera. El máximo de PE_i se ubica entre los $[94^\circ - 96^\circ]$ O y $[20^\circ - 23^\circ]$ N, al igual que en las distribuciones de EC_i y, en menor medida, de R_i . Es por ello que a partir de ahora únicamente se mostrarán distribuciones espaciales y temporales de EC_i .

El porcentaje de ocurrencia de eventos inerciales (figura 7) es mayor en la zona pro-

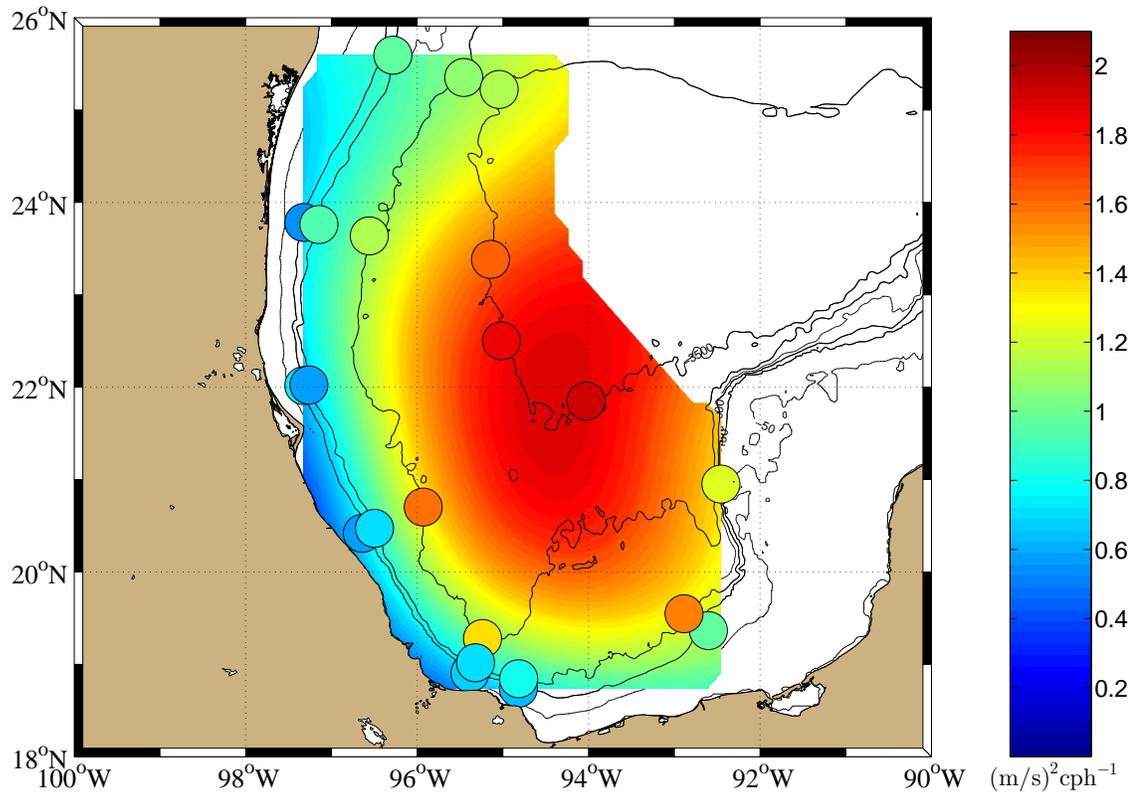


Figura 6: Distribución horizontal superficial del PEi $((\text{m/s})^2 \text{cph}^{-1})$. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10% de error y escalas de decorrelación de 290 km en la dirección zonal y 180 km en la meridional

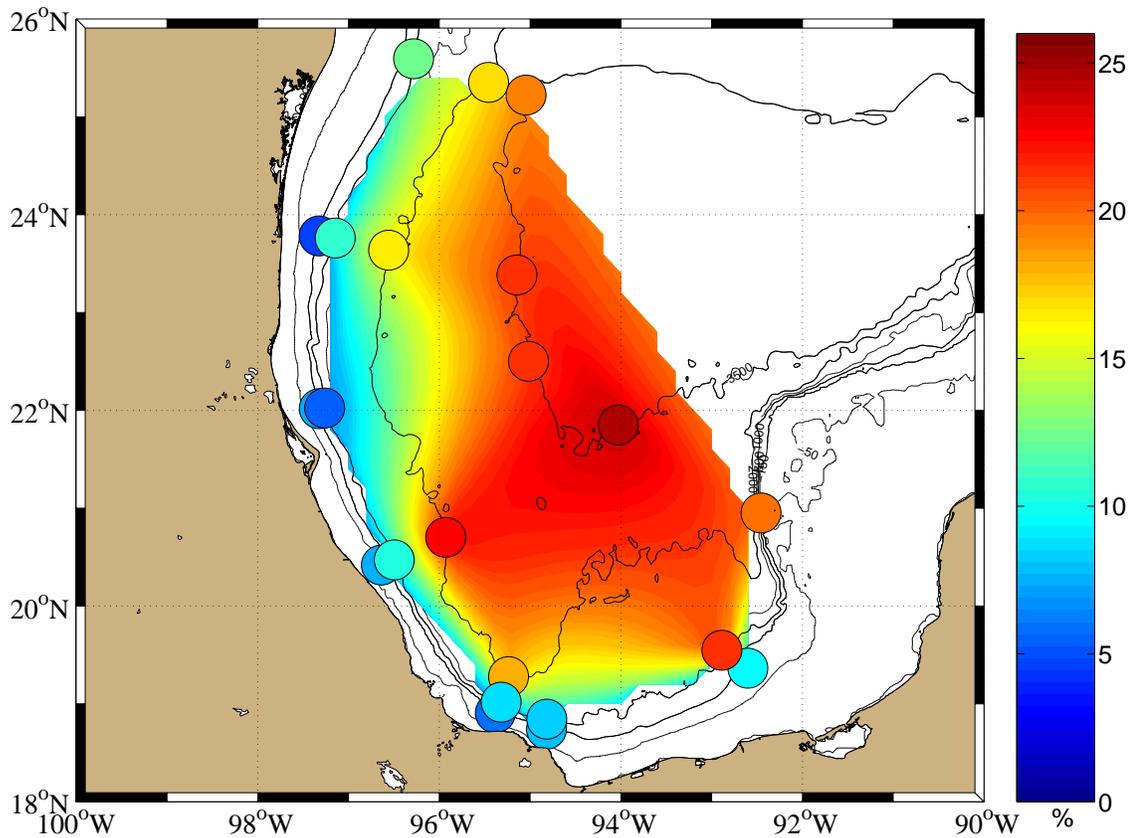


Figura 7: Distribución horizontal superficial del OPI (%). Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas linealmente.

funda del golfo con valores máximos de hasta 28 % de ocurrencia entre los $[93^\circ - 96^\circ]$ O y los $[19^\circ - 23^\circ]$ N. De igual forma las OCIs permanecen más tiempo en la superficie en la zona profunda y especialmente hacía el sur del GoM (figura 8).

También es importante estudiar la variabilidad temporal de la ECI. Para ello se realizan distribuciones horizontales promedio de primavera, verano, otoño e invierno de todo el periodo de estudio (figura 9). En promedio, la estación con más ECI es el invierno, la cual presenta el mayor número de anclajes con valores altos de ECI. Los valores máximo y la mediana de invierno son de 2.93 y $0.94 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, respectivamente. La estación con menor ECI en promedio es el verano, con valores máximos puntuales en la zona sureste y en la parte norte. La primavera y el otoño parecen ser estaciones de transición con mayor ECI en la zona profunda que cerca de la costa; comportamiento que se enfatiza durante el invierno. Los valores máximos de ECI en primavera, verano, y otoño son de 2.22 , 2.27 y

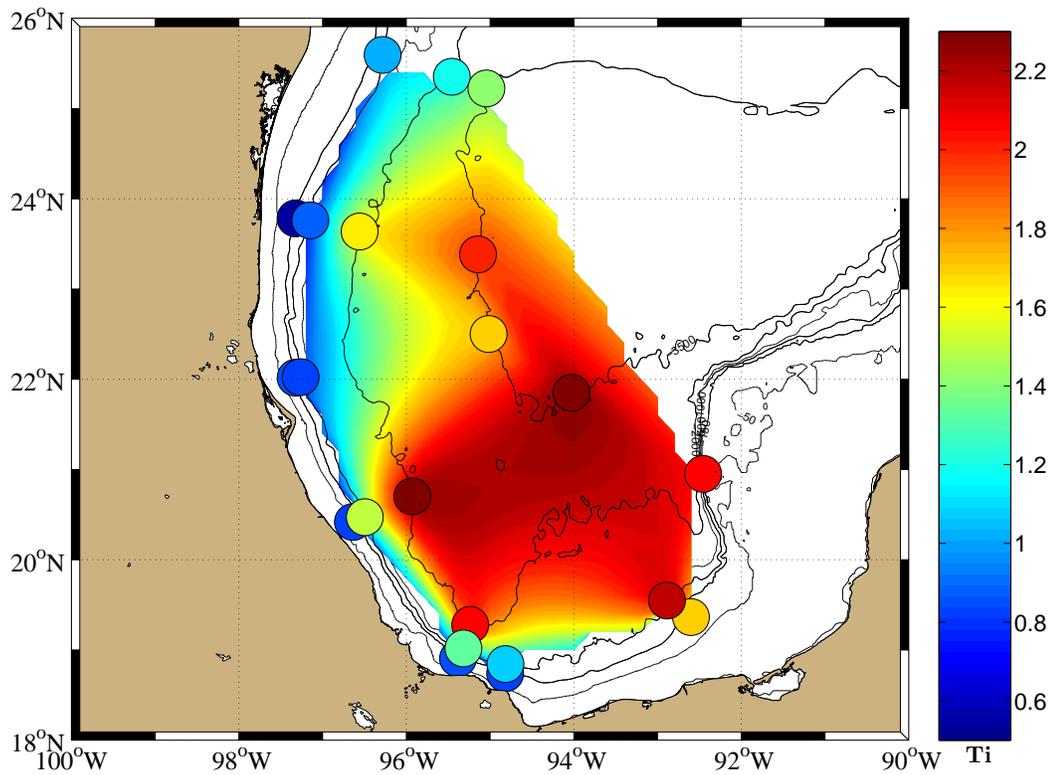


Figura 8: Como en la figura 4 pero para la distribución horizontal superficial de la EDi. La escala de color tiene valores de periodos inerciales (Ti). Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas linealmente.

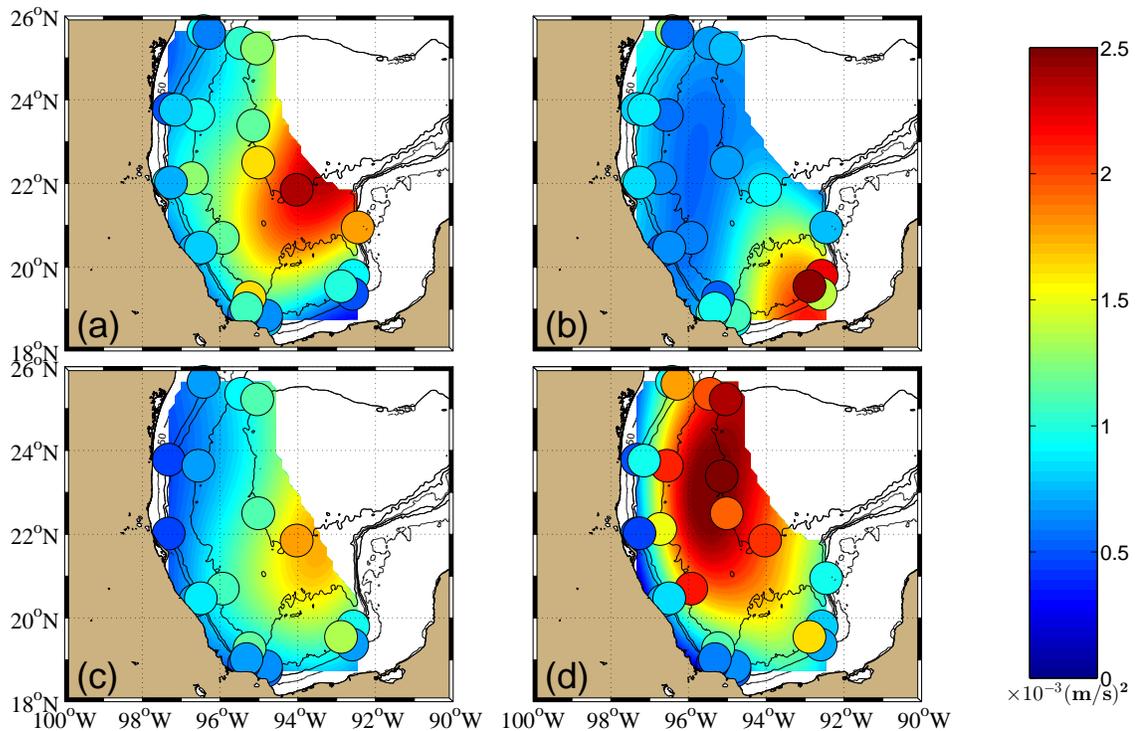


Figura 9: Distribución horizontal superficial de ECI promedio estacional: a) Primavera, b) Verano, c) Otoño e d) Invierno. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10 % de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 280 km en la meridional.

$1.66 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ respectivamente y, como se puede observar, durante el verano aparecen anclajes con mayor ECI que en las otras dos estaciones. Sin embargo el porcentaje de ocurrencia promedio en verano (8.14 %) es notablemente menor que durante primavera (14.2 %) y otoño (10.7 %). Por ello el verano lo consideramos como la estación con menor ECI.

Puesto que las OCIs son fenómenos esporádicos, es decir no tienen un ciclo temporal definido, decidimos estudiar la variabilidad interanual de la ECI. Para este análisis se utilizaron los periodos descritos en la sección 3.2.1.

En la figura 10 podemos observar que existe una gran variabilidad interanual de la ECI. El primer año de estudio (2008-2009) es la época con menor ECI en toda la zona y durante 2009-2010 la ECI es máxima. Los valores máximos de ECI de cada año de estudio son: $1.3, 3.4, 2.1$ y $2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, mientras que los valores de mediana son: $0.9, 1.0, 1.3$ y $0.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. Como se puede notar, en el periodo de estudio 2009-

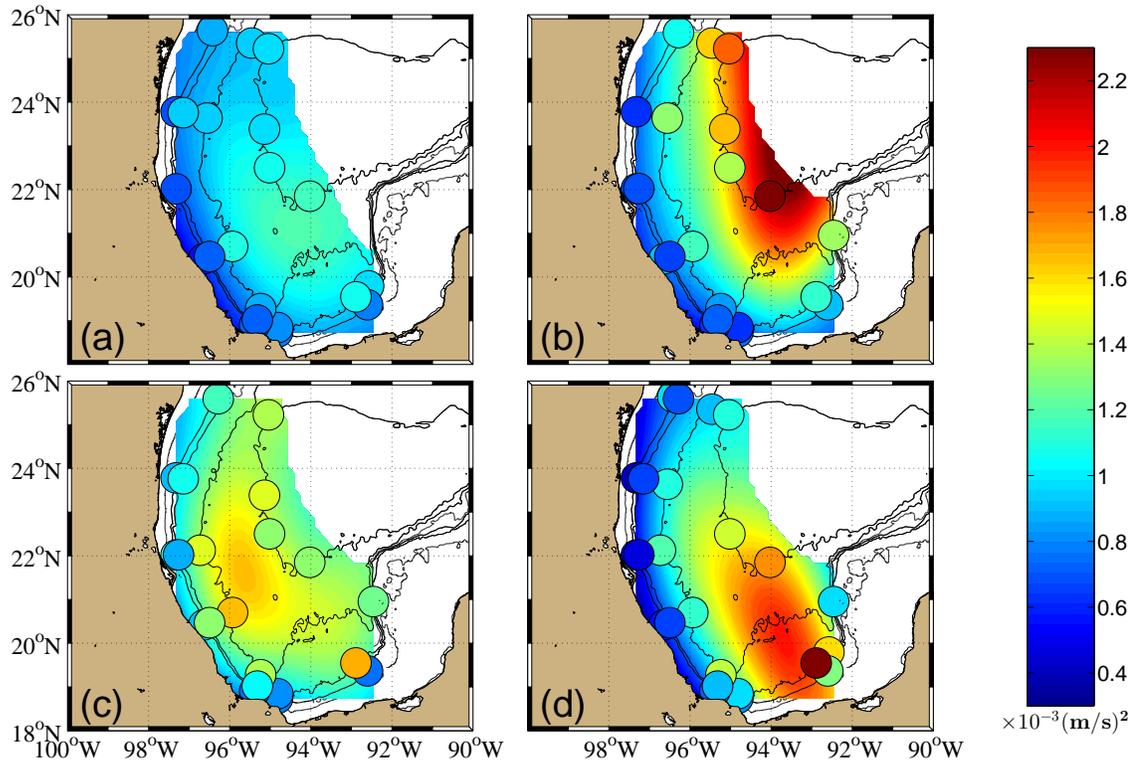


Figura 10: Distribución horizontal superficial de ECI promedio por año: a) 2008-2009, b) 2009-2010, c) 2010-2011 y d) 2011-2012. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10% de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 280 km en la meridional.

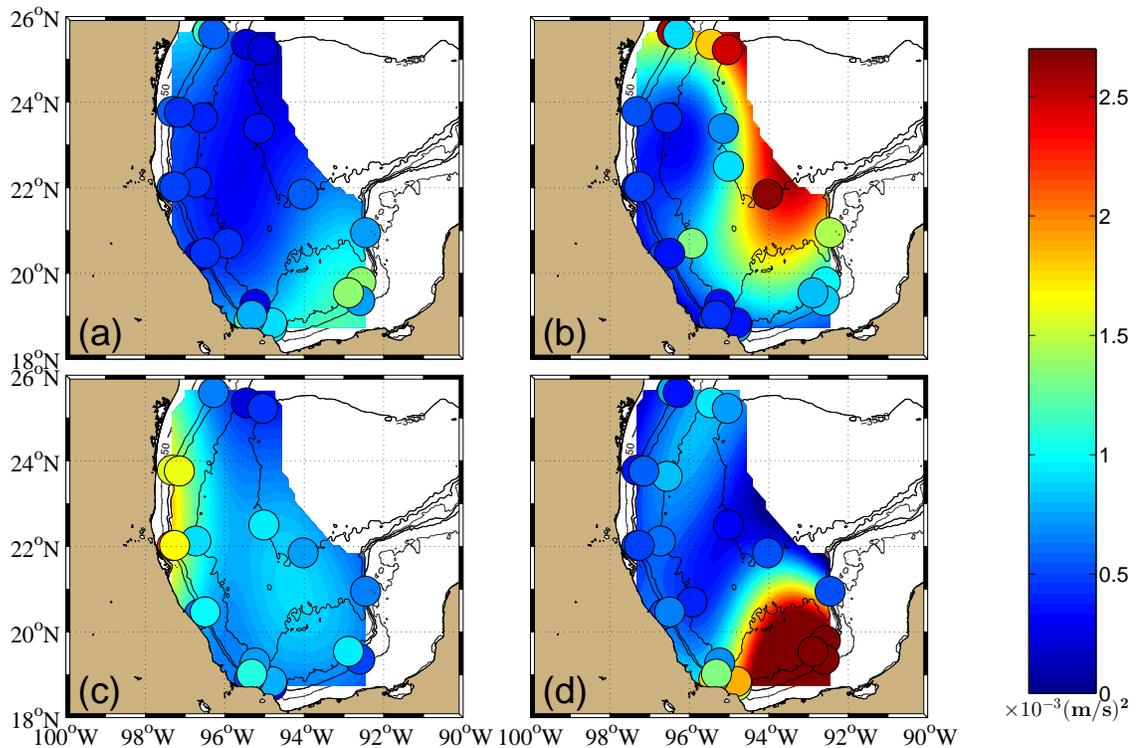


Figura 11: Distribución horizontal superficial de ECI promedio durante el verano (junio-agosto): a) 2009, b) 2010, c) 2011 y d) 2012. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10% de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 280 km en la meridional.

2010 ocurrieron los valores máximos de ECI, sin embargo en el año de 2010-2011 la mediana es mayor que durante el resto del periodo de estudio, lo que indica que hay más anclajes con valores elevados de ECI. En general la distribución horizontal de ECI de un año a otro es consistente con la distribución horizontal promedio para todo el periodo de estudio (figura 4), es decir valores muy altos en la zona profunda y valores bajos ($< 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$) en toda la zona costera, la excepción sería el año 2010-2011 cuando los valores son mayores o cercanos a $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ en toda el área de estudio.

Ahora analizaremos la variabilidad interanual de la distribución horizontal estacional de ECI. En las figuras 11 y 12 sólo se presentan las distribuciones horizontales de ECI del verano e invierno ya que son las estaciones con mayor contraste.

El primer año de estudio, verano 2009 (figura 11a) e invierno 2008-2009 (figura 12a), existe muy poca ECI en toda el área durante el verano. Durante el invierno del segundo

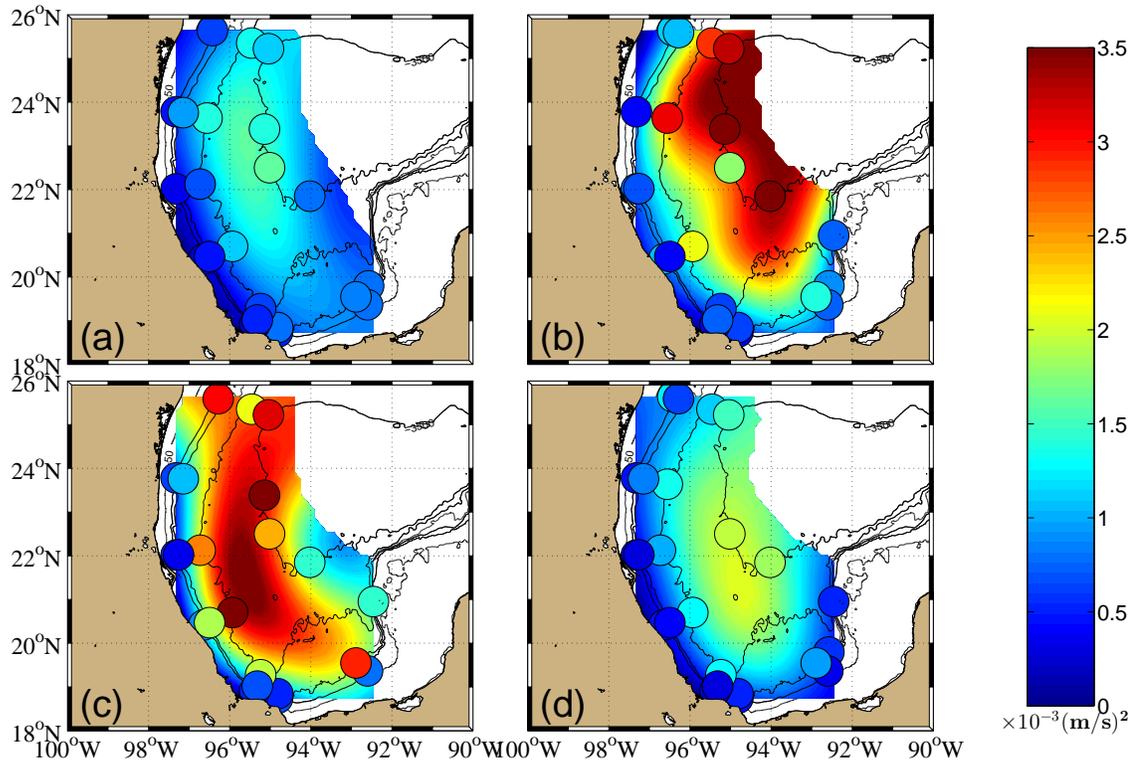


Figura 12: Distribución horizontal superficial de ECI promedio durante el invierno (diciembre-febrero). a) 2008-2009, b) 2009-2010, c) 2010-2011 y d) 2011-2012. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 20% de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 200 km en la meridional.

y tercer año (figuras 12b,c) se observan valores altos de EC_i en toda la zona de estudio, especialmente en aguas profundas. Durante el verano del segundo año (figura 11b) se observa que sólo para algunos anclajes se calculan valores altos de EC_i , mientras que en el tercer año (figura 11c) la EC_i no alcanza los valores altos del segundo año, pero se observan valores significativamente altos ($EC_i > 0.25 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$) en toda la zona de estudio, incluso en los anclajes someros. Durante el verano del cuarto año (figura 11d) se observa EC_i en la zona sureste, muy cerca de la costa de Campeche, con valores extremos de hasta $5.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, el valor promedio más alto de todos los años, mientras que durante el invierno se observa baja EC_i en general y especialmente cerca de la costa.

En la tabla 2 se resumen los valores máximos y de la mediana de las distribuciones horizontales estacionales de los cuatro años de estudio para los variables EC_i , OPI , y se presentan el número de eventos inerciales (NE_i).

Tabla 2: Valores estadísticos (máximo y mediana) de la EC_i , OPI y NE_i calculados estacionalmente para cada año de estudio.

Estación	EC_i $\times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$		OPI %		NE_i	
	max	med	max	med	max	med
Primavera	1.95	0.95	33.9	14.5	17	6
	2.16	0.70	32.8	9.2	15	10
	2.51	1.19	41.7	21.1	19	8
	2.92	0.75	42.3	8.6	13	6
Verano	1.38	0.56	28.5	2.3	19	4
	2.82	0.77	23.1	8.3	18	5
	2.18	0.85	30.5	11.7	12	3
	5.9	0.71	41.2	8.5	11	4
Otoño	1.37	0.65	24.2	6.4	32	7
	3.38	0.79	38.9	10.8	19	6
	2.54	0.76	35.3	10.5	17	5
	2.79	0.73	46.5	8.8	18	6
Invierno	1.63	0.78	27.9	8.1	22	8
	4.08	0.89	51.5	10.1	16	12
	3.58	1.43	56.6	18.4	27	11
	1.94	0.59	38.8	6.3	24	9

Todos estos resultados sugieren que existe una gran variabilidad temporal de la EC_i . Es por ello que se decidió separar y estudiar la distribución de EC_i , basándonos en el

tipo forzamiento por viento predominante en el GoM durante la temporada de Nortes y de huracanes. En la figura 13 se presenta la distribución horizontal superficial EC_i promedio durante la temporada de Nortes. La distribución horizontal de EC_i durante esta temporada es muy parecida a la distribución horizontal promedio de todo el año (figura 4). El valor máximo se localiza en el anclaje LNK3500, dentro de la zona entre los $[93^\circ - 96^\circ]$ O y $[19^\circ - 22^\circ]$ N, y la mayor parte de la energía se localiza en la zona profunda. El valor máximo de EC_i durante esta temporada es de $2.31 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ y la mediana es de $1.01 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. En este caso podemos destacar que la línea de anclajes PER, la línea más al norte, exhibe EC_i con valores significativos ($> 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$) desde las aguas someras hasta las aguas profundas.

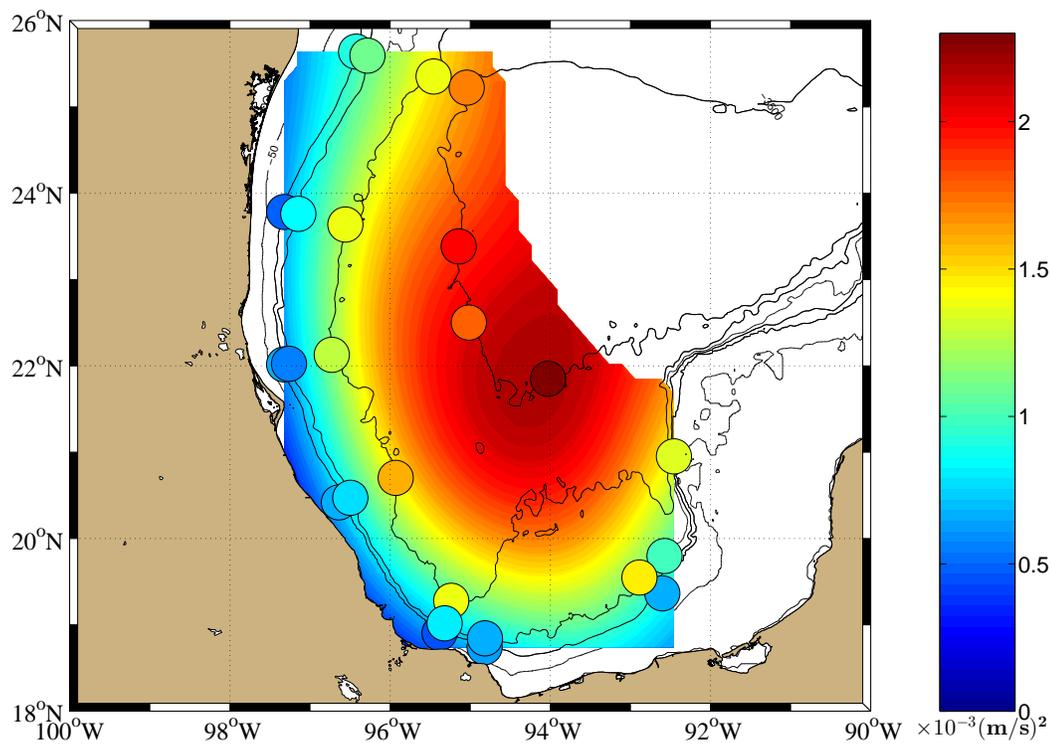


Figura 13: Distribución horizontal superficial de EC_i promedio 2008-2012 durante la temporada de Nortes (Octubre-Mayo). Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10% de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 280 km en la meridional.

Al igual que en la distribución horizontal de EC_i promedio por año (figura 10), las distribuciones promedio de EC_i durante la temporada de Nortes (figura 14) muestran valores altos (bajos) de EC_i en las aguas profundas (someras). Se observan valores mayores de

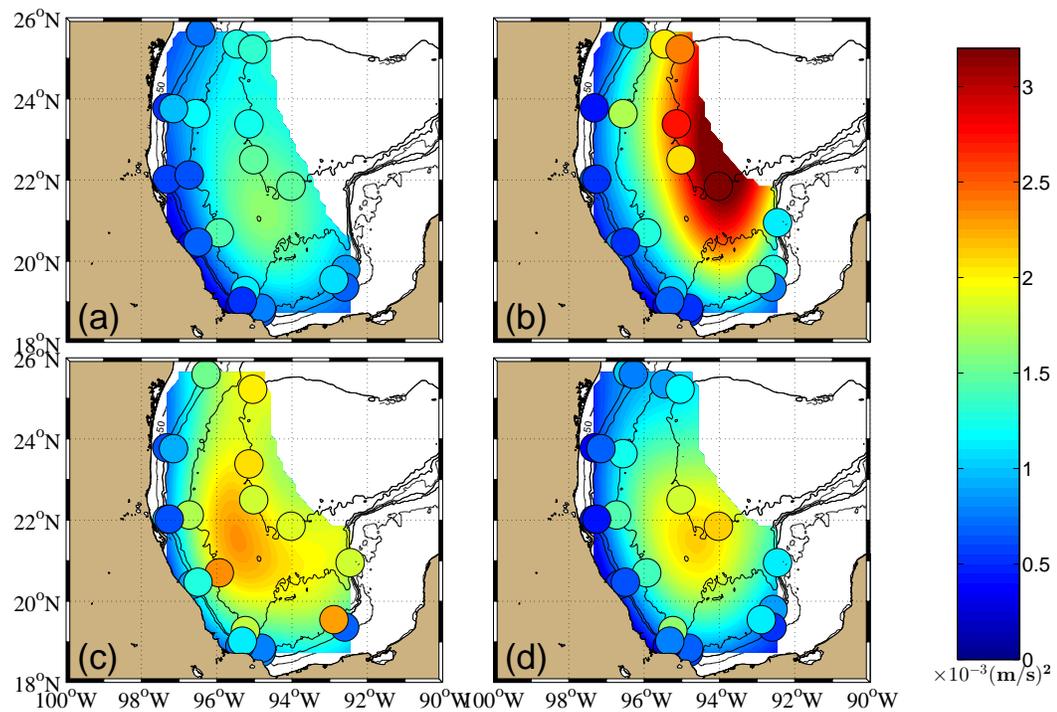


Figura 14: Distribución horizontal superficial de ECI promedio por año durante la temporada de Nortes (Octubre-Mayo). a) 2008-2009, b) 2009-2010, c) 2010-2011 y d) 2011-2012. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10% de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 280 km en la meridional.

la ECI en los anclajes del norte durante el 2009-2010 y 2010-2011 (figuras 14b,c) respecto a los otros dos años (figuras 14a,d). El cuarto año de estudio (2011-2012) es el que posee menor ECI en promedio, con un valor de la mediana de $0.79 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, a diferencia de la distribución de ECI promedio por año donde se observa que el 2008-2009 es el año que posee menor energía (figura 10d).

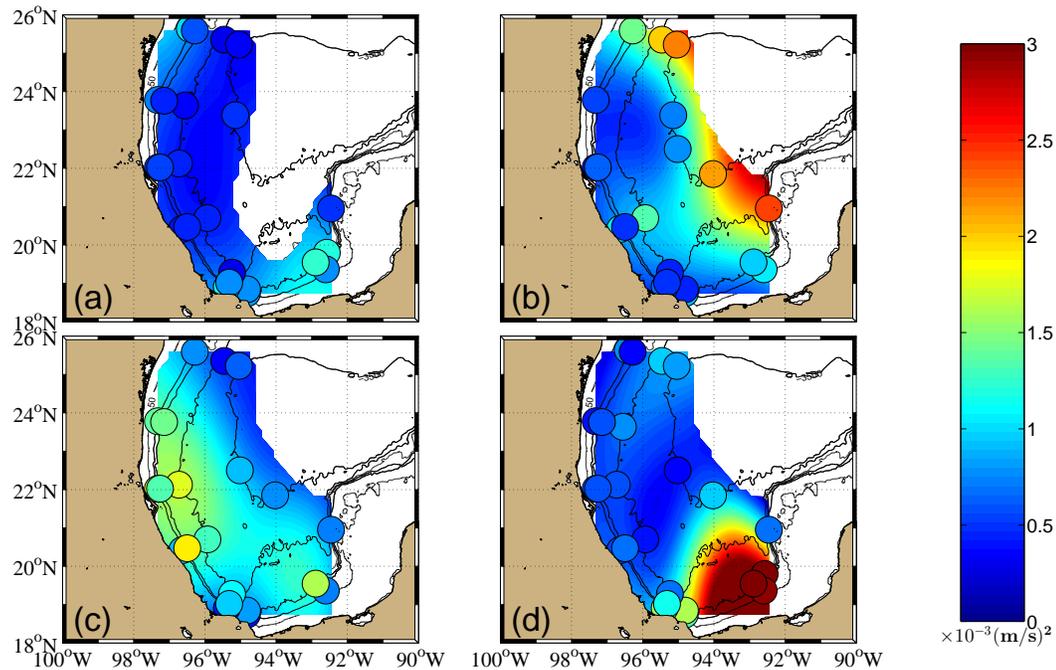


Figura 15: Distribución horizontal superficial de ECI promedio por año durante la temporada de Huracanes (Junio- Septiembre).a) 2009, b) 2010, c) 2011 y d) 2012. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10% de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 280 km en la meridional.

En la figura 15 se muestra la distribución horizontal de la ECI durante la temporada de huracanes año por año. Es importante recalcar que durante la primera temporada de huracanes correspondiente a los meses de junio a septiembre del 2009, no ocurrió ningún huracán en la zona de estudio, por lo que la ECI tiene valores cercanos a cero en todos los anclajes. En el año 2010 la ECI en los anclajes del este y del norte, mientras que durante el 2011 la energía se encuentra principalmente en la zona costera del oeste. En el 2012 la ECI tiene valores muy altos en el sureste y en el resto del área posee valores cercanos a cero. En general podemos decir que durante la temporada de huracanes, la ECI se distribuye irregularmente en el espacio coincidiendo en general con las trayectorias de los huracanes (ver sección 4.2 para las trayectorias de huracanes). En el promedio

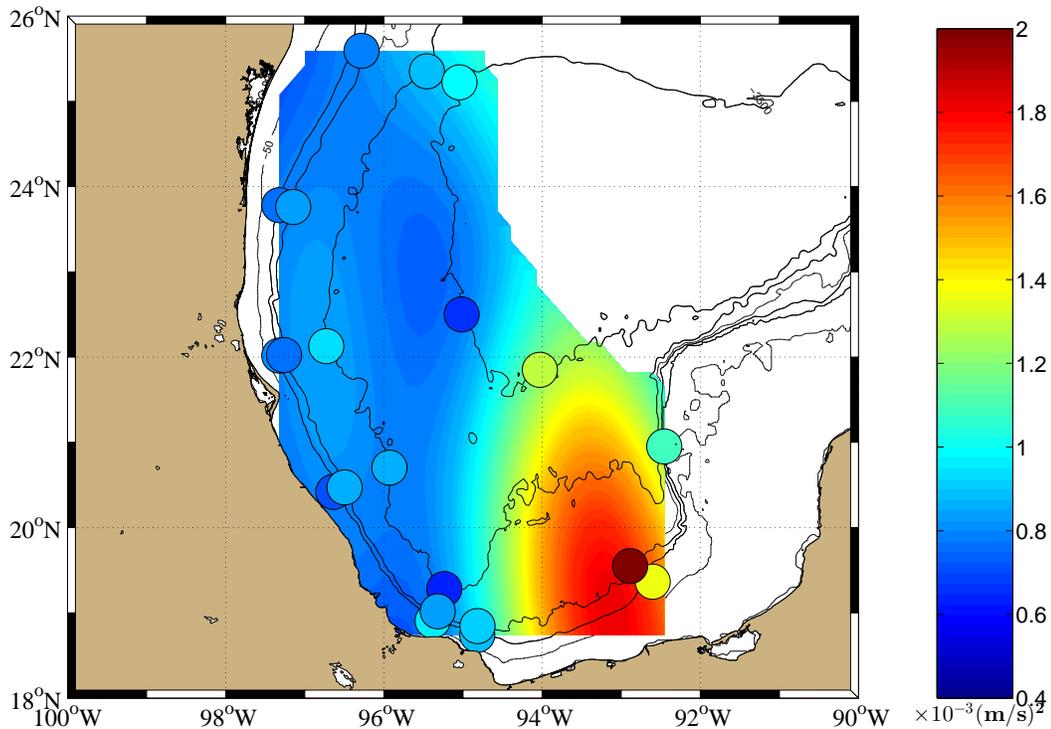


Figura 16: Distribución horizontal superficial de ECI promedio de 2009 a 2012 durante la temporada de Huracanes (Junio- Septiembre). Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10 % de error y escalas de decorrelación de 160 km en la dirección zonal y 280 km en la meridional.

de las cuatro temporadas de huracanes (figura 16) la ECI tiene valores máximos en la zona sureste, y se observa que las OCIs generadas en el año 2012 por el paso de dos tormentas tropicales en la zona, fueron tan energéticas que dominan el promedio total.

4.2. Mecanismo de generación de OCIs: Trabajo del viento

4.2.1. Distribución espacial del viento

En esta sección se describirán las características espaciales y temporales del viento observadas en la zona de estudio. Como se dijo anteriormente se utilizó la base de datos NARR. Se eligió este producto porque cubre el periodo de observaciones analizadas, así como una mayor resolución temporal en la zona de estudio respecto a otros productos de viento (e.g., Cross-Calibrated Multi-Plataform Ocean Surface Wind, CCMP por sus siglas en inglés) .

En la figura 17 se observa que el viento promedio es proveniente del Este y esta

asociado a los vientos Alisios que predominan durante la mayor parte del año. La magnitud del viento es mayor en la zona Norte y Este del GoM, disminuyendo hacia la costa, especialmente en el Sur. Sin embargo las elipses de variabilidad contienen una fuerte componente en el eje Norte-Sur, asociada a la incursión de frentes fríos durante los meses de noviembre a mayo y que comúnmente llamamos Nortes. La variabilidad es mayor en la zona costera, en los estados de Veracruz y Tamaulipas, donde las elipses tienen mayor excentricidad y su eje de mayor varianza está alineado con la línea de costa.

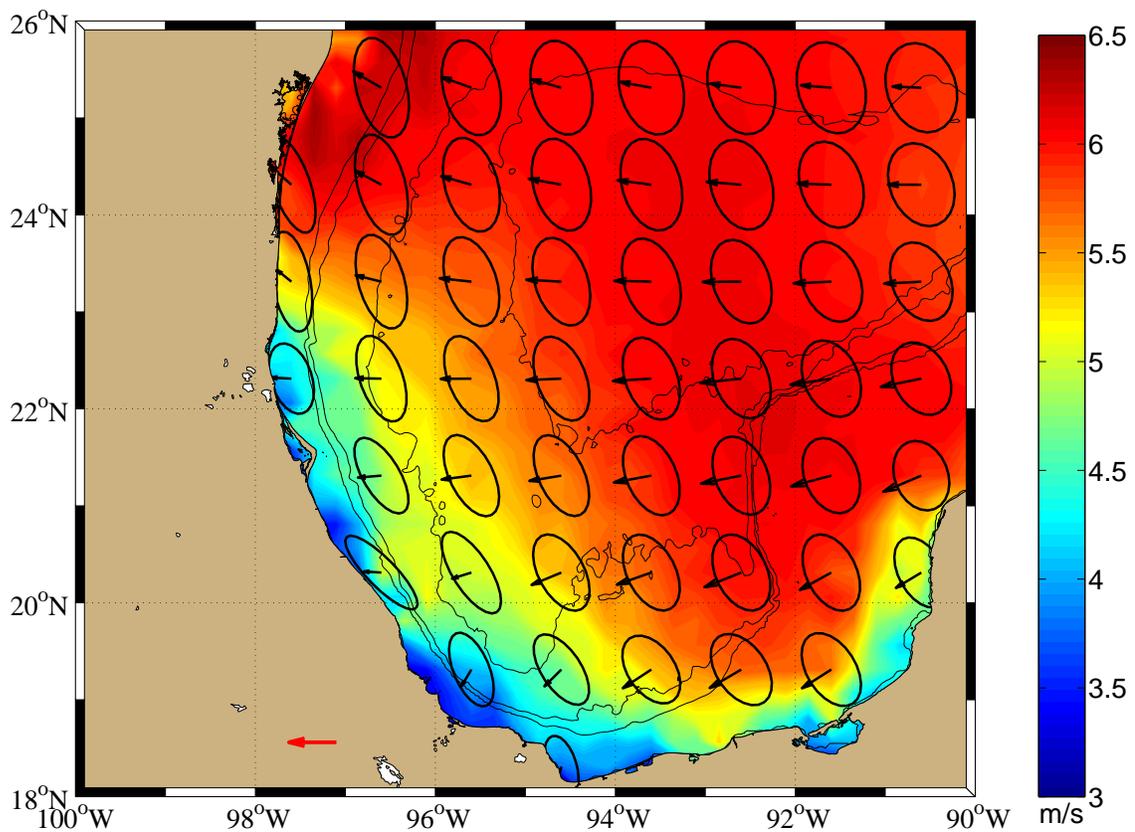


Figura 17: Distribución horizontal del viento promedio de 2008 a 2012 con datos de NARR. Las flechas indican la dirección promedio del viento, los colores la magnitud promedio y las elipses indican la variabilidad del viento. Las elipses y las flechas poseen la misma escala.

En las distribuciones estacionales (figura 18) el viento promedio sigue siendo principalmente del Este, sin embargo hay mayor variabilidad espacial y temporal. Durante la primavera y el verano el viento del GoM presenta dos comportamientos principales: 1) de los 22° N hacia el sur la dirección promedio es hacia el suroeste, y 2) al norte de los 22° N la dirección promedio es hacia el noroeste. Durante estas dos primeras estaciones el promedio es mayor que la variabilidad e incluso en verano no parece existir un eje de

mayor varianza (excentricidad ~ 0). Es importante recalcar que el paso de huracanes durante el verano influye notablemente sobre la magnitud del viento, el cual se intensifica en la zona noroeste por la cual transitaron al menos un huracán (Alex) y una tormenta tropical (Hermine).

En el otoño el viento promedio es hacia el suroeste en todo el área de estudio y las elipses de variabilidad tienen un eje de mayor varianza alineada en la dirección Norte-Sur. Cerca de la costa el promedio es igual o menor a la varianza, pero hacia el este el promedio sigue siendo mayor a la varianza. Durante el invierno el viento promedio sigue teniendo dirección hacia el oeste como en el otoño, pero en la parte norte del GoM el promedio es mucho menor a la varianza lo que indica la importancia de los eventos Nortes característicos de esta época del año.

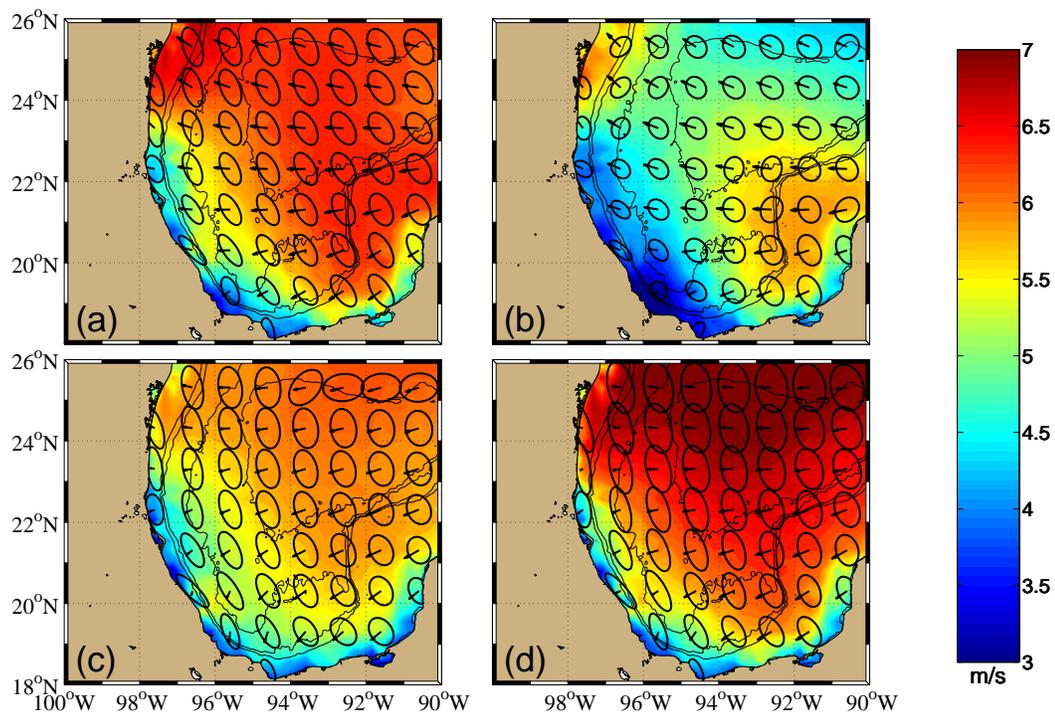


Figura 18: Distribución horizontal del viento promedio estacional de 2008 a 2012 con datos de NARR: a) Primavera, b) Verano, c) Otoño e d) Invierno. Las flechas indican la dirección promedio del viento, los colores la magnitud promedio y las elipses indican la variabilidad del viento. Las elipses y las flechas poseen la misma escala, que se indica en la esquina inferior izquierda.

Como se dijo anteriormente los Nortes y huracanes son tormentas importantes en la dinámica del GoM, por lo cual se hizo una estadística de los eventos ocurridos durante el periodo de estudio.

Los huracanes que cruzaron nuestra región de estudio son :

1. Alex: 25/06/2010-02/07/2010
2. Hermine: 05/09/2010-09/09/2010
3. Karl: 14/09/2010-18/09/2010
4. Arlene: 28/06/2011-01/07/2011
5. Harvey: 19/08/2011-22/08/2011
6. Nate: 07/09/2011-11/09/2011
7. Ernesto: 01/08/2012-10/08/2012
8. Helene: 09/08/2012-18/08/2012

En la figura 19 se muestran las trayectorias e intensidad de todos los huracanes considerados para este estudio. Esta información fue obtenida del Centro Nacional de Huracanes (NHC por sus siglas en inglés) de la NOAA (www.nhc.noaa.gov). Durante el 2009 no transitó ningún huracán por el oeste del GoM.

Para calcular el número de eventos Nortes (NEn) y su duración (DEn) se realizó una estadística del viento con dirección predominante hacia el sur ($[225^\circ - 315^\circ]$ CCW del este). Un evento se define cuando el viento mantiene una dirección hacia el sur por al menos 15 horas, con una intensidad mayor a 8 m s^{-1} y una diferencia de 12 horas entre eventos. Si dos pulsos de viento ocurren con menos de 12 horas de diferencia se considera un único evento. Para una presentación más adecuada de los resultados, la región de estudio se dividió en 4 zonas (figura 20). En cada zona se presentaron características diferentes de los eventos que se resumen en la tabla 3.

Se puede destacar de estos resultados, que la zona norte es donde ocurre un mayor número de eventos Nortes y con mayor duración en promedio. De igual manera la zona centro-este posee valores más altos de NEn y DEn que la zona centro-oeste. Este comportamiento coincide con lo observado por DiMego *et al.* (1976) que reporta mayor

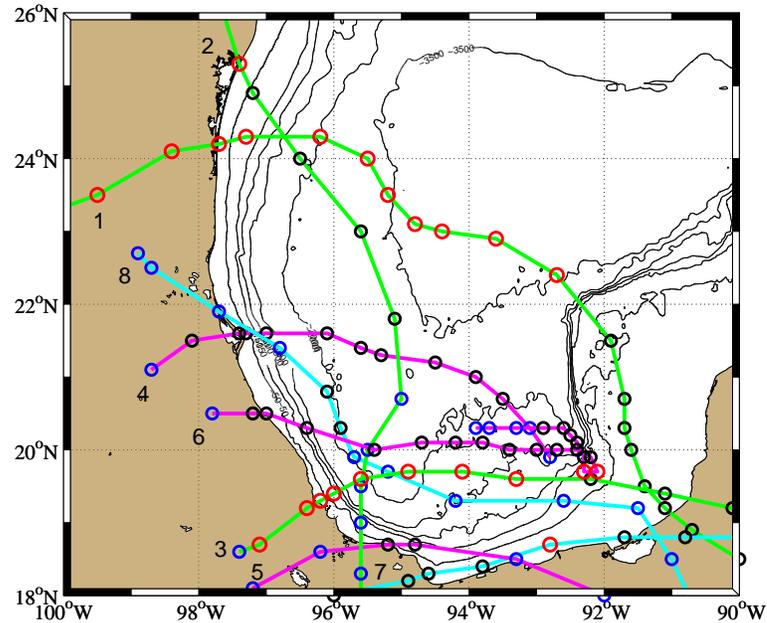


Figura 19: Trayectorias de los huracanes que pasaron por el área de estudio entre 2009-2012. Los números corresponden al huracán nombrado en el texto y los colores simbolizan el año en que ocurrieron: trayectoria verde (2010), trayectoria magenta (2011) y trayectoria azul (2012). Los círculos indican una medición de la NHC. El color de los círculos representa la categoría según la NHC: Depresión Tropical (azul), Tormenta Tropical (negro) y Huracán (rojo).

número de frentes fríos en la zona norte que en la zona sur del GoM y una duración máxima de los eventos cerca de la península de Yucatán.

4.2.2. Trabajo del viento

Como se dijo en la sección 3.2.2 se utilizaron dos medidas de trabajo del viento. La distribución horizontal promedio de Π_i , Π_{ii} y de sus componentes de todo el periodo de estudio se muestra en la figura 21. Las distribuciones horizontales de $\langle \Pi_i \rangle$, $\langle \Pi_{ii} \rangle$, y sus componentes son similares, con valores elevados de las componentes $\langle \tau_y v' \rangle$ y $\langle \tau'_y v' \rangle$ y valores muy cercanos a cero de las componentes $\langle \tau_x u' \rangle$ y $\langle \tau'_x u' \rangle$. Dado que las distribuciones horizontales y los promedios de las dos medidas del trabajo son similares, a partir de ahora sólo se presentan los resultados de $\langle \Pi_i \rangle$, con el fin de observar la relación del viento total (y no sólo la parte inercial del viento) con las OCIs. El trabajo del viento es mayor en la zona profunda, mientras que en la zona cercana a la costa, y principalmente en el suroeste, el trabajo no es significativo. Los valores extremos

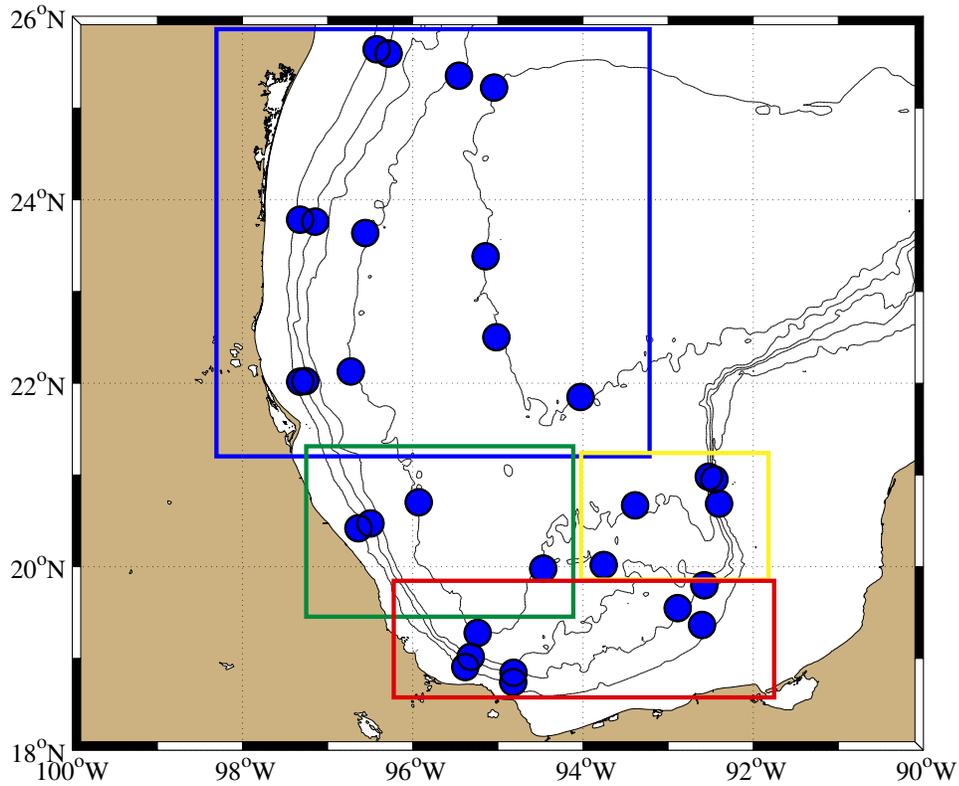


Figura 20: Ubicación de los anclajes y la división del área de estudio en las zonas de eventos Norte. Zona Norte (azul), zona Centro-Oeste (verde), Centro-Este (amarillo) y zona Sur (rojo).

Tabla 3: Valores estadísticos anuales de eventos Norte para cada zona. Número de eventos Nortes (NEn), duración promedio de los eventos (DEn) y duración máxima de los eventos (DENm)

Zona	NEn	DEn (h)	DENm (h)
Norte	22-26	40	160
Centro-Oeste	10-15	16	80
Centro-Este	17-20	18-30	90-120
Sur	13-15	15-20	70-90

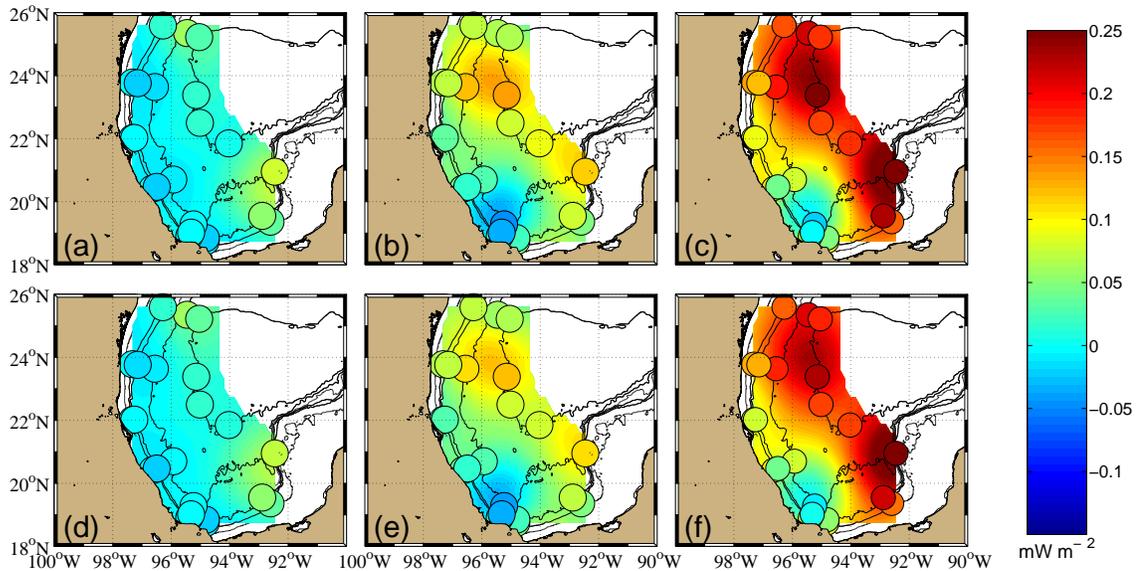


Figura 21: Distribuciones horizontales del trabajo del viento por componentes y total. En la parte superior Π_i y en la inferior Π_{ii} . La primera columna corresponde a la componente $\langle \tau_x u \rangle$ (a y d), la segunda columna es la componente $\langle \tau_y v \rangle$ (b y e) y la tercera al trabajo total $\langle \Pi \rangle$ (c y f). Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10% de error y escalas de decorrelación de 150 km en la dirección zonal y meridional.

de $\langle \Pi_i \rangle$ se localizan en la zona norte y cerca de la península de Yucatán.

Al igual que en la distribución de EC_i (figura 10), $\langle \Pi_i \rangle$ tiene una gran variabilidad interanual (figura 22). La distribución horizontal de $\langle \Pi_i \rangle$ durante el año 2009-2010 (22b) presenta los valores máximos en la zona profunda y, en general es positivo en toda el área. Durante este año la distribución horizontal promedio de EC_i (figura 10b) es parecida a la de $\langle \Pi_i \rangle$, mientras que los tres años restantes, difieren especialmente en los anclajes del centro-este (ARE3500 y LNK3500). Cabe destacar, que a diferencia de los otros años, durante el año 2011-2012 los valores más extremos de $\langle \Pi_i \rangle$ están localizados cerca de la costa de Campeche, muy similar a la distribución horizontal de la EC_i (ver figura 10d).

En la figura 23 se presenta el $\langle \Pi_i \rangle$ de manera estacional. En esta figura se puede observar que la estación con mayor $\langle \Pi_i \rangle$ es el invierno (figura 23d) con valores positivos muy intensos en la mayor parte del área, principalmente en el norte y el oeste. Por otro lado durante el verano (figura 23b) el $\langle \Pi_i \rangle$ es nulo en la mayor parte del área, excepto en el norte (sureste) donde se observan valores negativos (positivos) de gran intensidad.

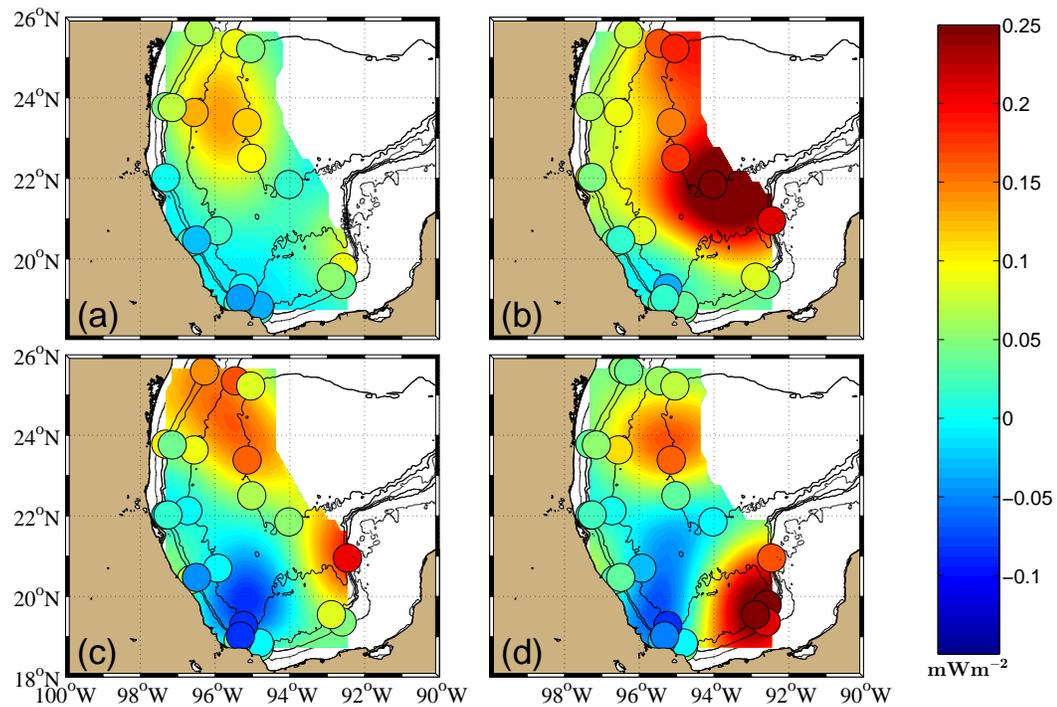


Figura 22: Distribuciones horizontales de $\langle \Pi_i \rangle$ para cada año de estudio. a) 2008-2009, b) 2009-2010, c) 2010-2011 y d) 2011-2012. Los puntos representan la posición de los anclajes, los colores de los puntos indican el valor calculado, y el mapa de color representa las variables interpoladas objetivamente con 10% de error y escalas de decorrelación de 150 km en la dirección zonal y meridional.

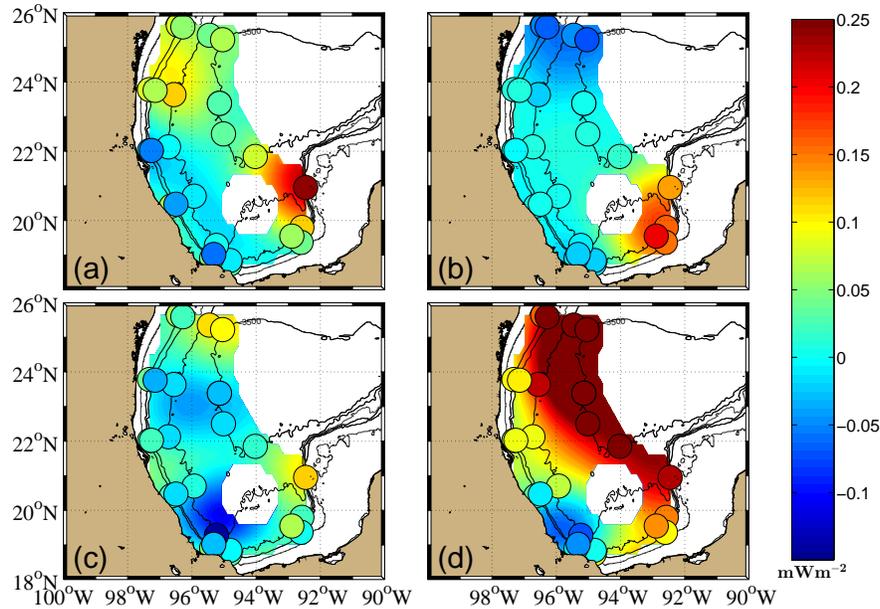


Figura 23: Como en figura 22 pero para distribuciones horizontales de $\langle \Pi_i \rangle$ estacionales. a) Primavera, b) Verano, c) Otoño e d) Invierno.

La primavera (figura 23a) y el otoño (figura 23c) parecen ser estaciones de transición, con valores tanto negativos como positivos de $\langle \Pi_i \rangle$.

El promedio total del trabajo del viento calculado por temporadas se presenta en las figuras 24 y 25. La componente Este-Oeste (figura 24a y figura 25a) tienen valores muy cercanos a cero en toda el área durante la temporada de Nortes (figura 24a), mientras que en la temporada de huracanes (figura 25a) es cercana a cero cerca de la costa, pero con valores positivos en el este y máximos en el sureste. Por otro lado la componente Norte-Sur durante la temporada de Nortes (figura 24b) presenta valores muy altos en la mayor parte de la zona de estudio, excepto en el suroeste. Sin embargo durante la temporada de huracanes, la componente Norte-Sur tiene valores cercanos a cero en toda el área excepto en el sureste.

La distribución horizontal del $\langle \Pi_i \rangle$ en la época de Nortes (figura 24c) está dominada por la componente meridional y tienen distribuciones muy similares: valores altos en aguas profundas especialmente en el norte y valores negativos en el suroeste. Sin embargo, las componentes meridional y zonal en la época de huracanes (figura 25a,b) contribuyen significativamente a la distribución horizontal de $\langle \Pi_i \rangle$, dando lugar a una

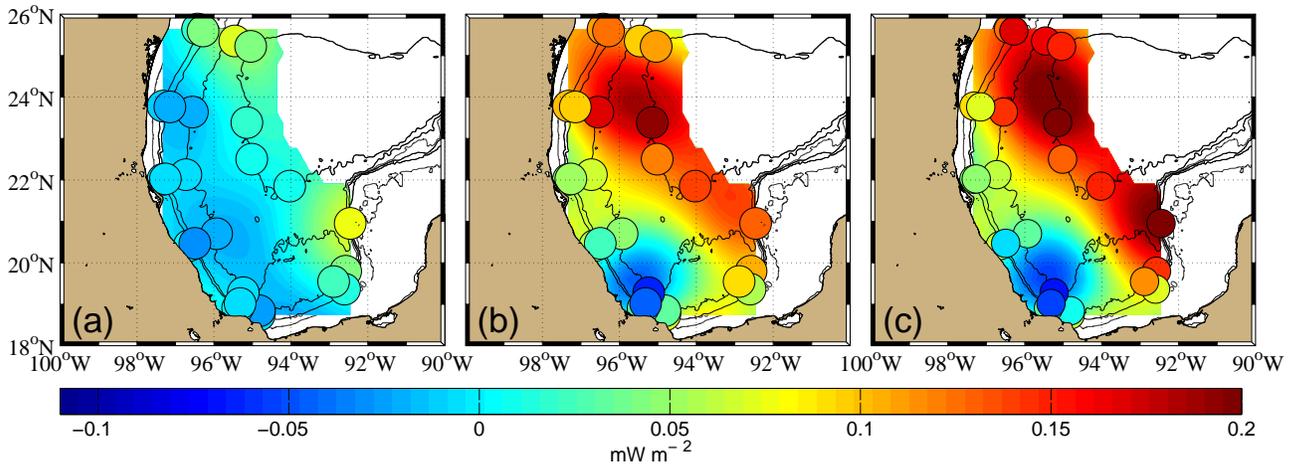


Figura 24: Como en figura 22 pero para distribuciones horizontales de trabajo del viento durante la temporada de Nortes. a) $\langle \tau_x u' \rangle$, b) $\langle \tau_y v' \rangle$ y c) $\langle \Pi_i \rangle$

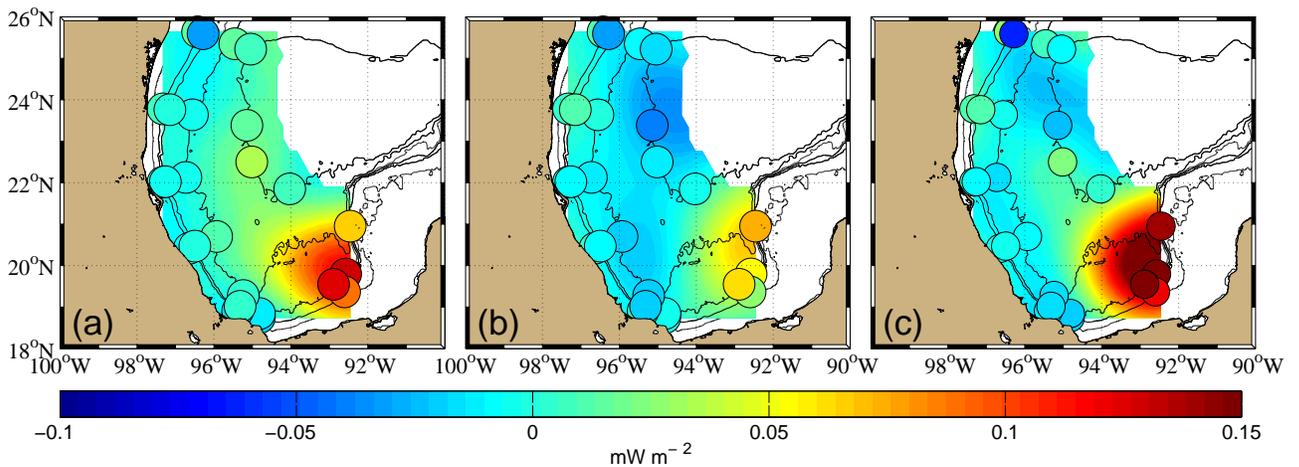


Figura 25: Como en figura 22 pero para distribuciones horizontales de trabajo del viento durante la temporada de huracanes. a) $\langle \tau_x u' \rangle$, b) $\langle \tau_y v' \rangle$ y c) $\langle \Pi_i \rangle$

distribución espacial con valores puntuales muy intensos tanto positivos (zona sureste) como negativos (zona noroeste), y en general valores cercanos a cero en la mayor parte del área.

Durante la temporada de Nortes, no se observa una variabilidad interanual de la distribución horizontal de $\langle \Pi_i \rangle$ (figura 26) tan contrastante como en la distribución superficial de ECi total (figura 10). En los cuatro años existe trabajo del viento positivo e intenso en la zona norte y en general en las aguas profundas y negativo en el suroeste. El único año con una distribución levemente anómala es el correspondiente al 2009-2010 con valores

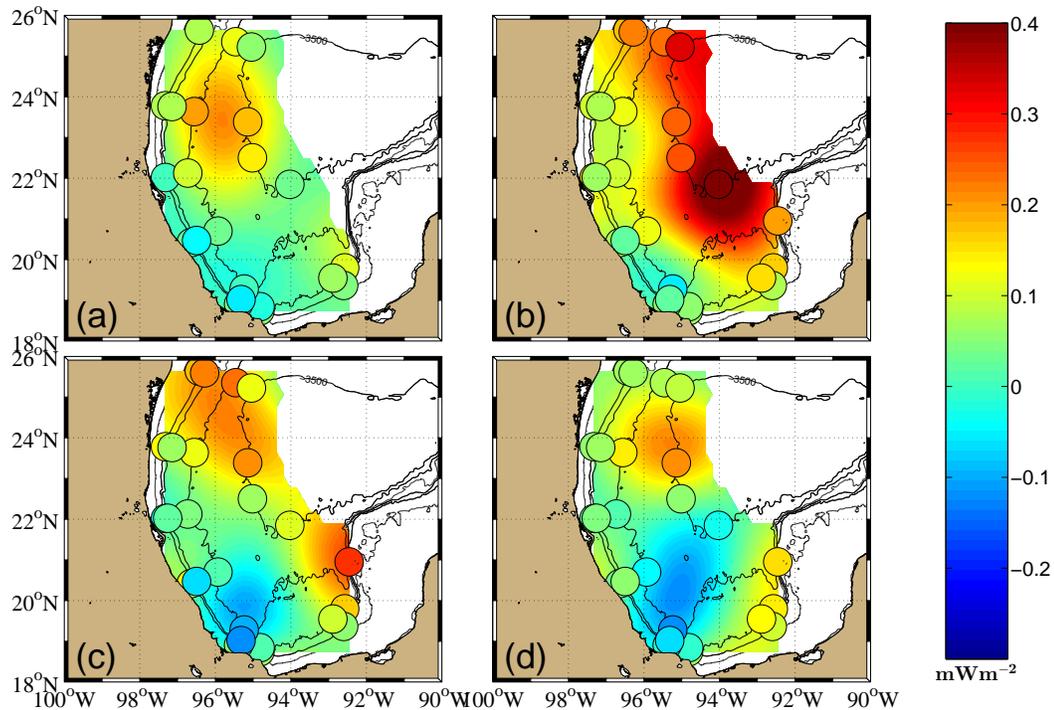


Figura 26: Como en figura 22 pero para distribuciones horizontales de $\langle \Pi_i \rangle$ para cada año de estudio durante la temporada de Nortes .a) 2008-2009, b) 2009-2010, c) 2010-2011 y d) 2011-2012.

de Π_i positivos en casi todo el GoM y con valores extremos en el centro-este (anclaje LNK3500).

Por otro lado la variabilidad interanual de la distribución horizontal de $\langle \Pi_i \rangle$ durante la temporada de huracanes es muy evidente (figura 27). El primer año de estudio (2009) el trabajo del viento es cero o muy pequeño en toda la zona. El año 2011 tiene una distribución parecida a la del 2009 pero con una tendencia hacia valores del trabajo del viento negativo. Durante el 2010 existen valores muy intensos negativos en toda la zona norte y el valor máximo positivo en el sureste. El cuarto y ultimo año (2012) parece ser el que domina el promedio, con $\langle \Pi_i \rangle$ cercano a cero en toda el área excepto en el sureste con valores extremos de 0.69 mW m^{-2} . Cabe mencionar que durante el 2009 no transitaron huracanes por la zona de estudio cuando se observa poca ECI y poco trabajo del viento, sin embargo en el 2011 ocurrieron 3 tormentas tropicales y el trabajo del viento es muy bajo lo que sugiere que las u'_h y τ_h son contrarias y por lo tanto el viento le extrae energía.

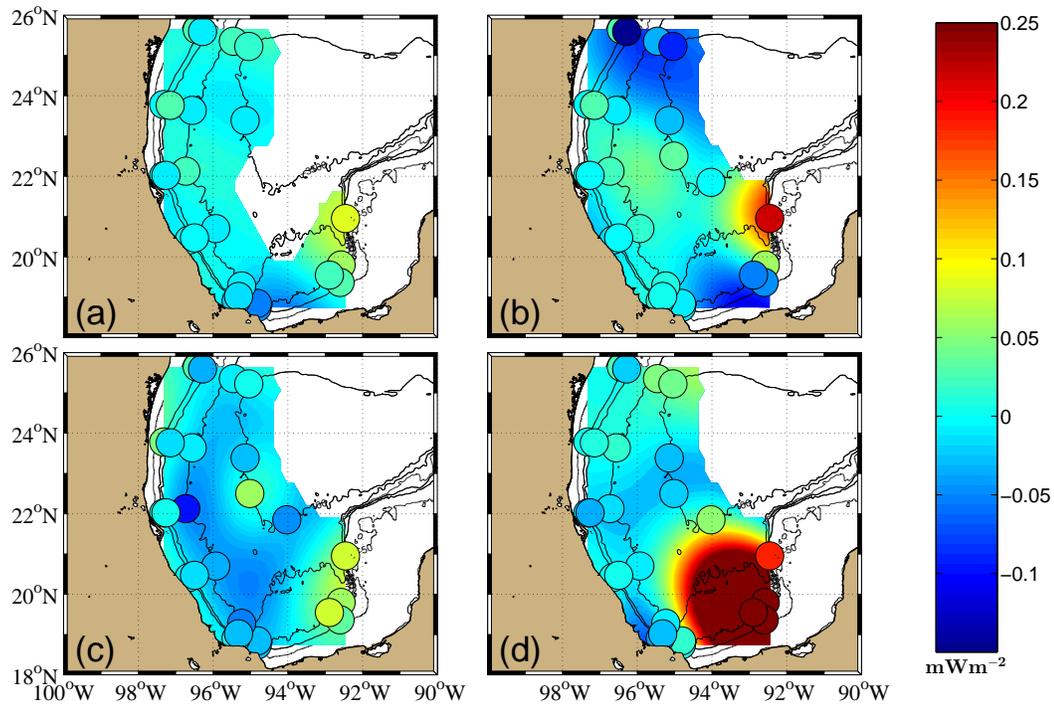


Figura 27: Como en figura 22 pero para distribuciones horizontales de $\langle \Pi_i \rangle$ para cada año de estudio durante la temporada de huracanes .a) 2009, b) 2010, c) 2011 y d) 2012.

4.3. Características de las OCIs

Se estudiaron un total de 20 eventos inerciales. Las características de cada uno de los eventos se encuentran en el apéndice B y su rango de variabilidad según el tipo de tormenta que la generó se encuentra en la tabla 4. En el caso de las ondas generadas por huracanes no se pudo calcular la C_{g_z} debido a que las fases de las ondas son muy coherentes en la vertical, lo cual implica que no se observó propagación hacia el fondo. En la tabla, los datos promedio de eventos de OCIs sugieren que las ondas generadas por huracanes suelen ser mucho más energéticas que las generadas por Nortes, como indica el valor máximo de EC_i ; también tienen mayor amplitud y una longitud de onda vertical mucho mayor. En los eventos estudiados, la frecuencia intrínseca calculada estuvo un 5 % alrededor de f para las OCIs generadas por Nortes, lo que permitió su propagación hacia el fondo. Mientras que para las OCIs generadas por huracanes la σ sólo estuvo un 3 % alrededor de f .

A continuación se presentan los resultados con mayor detalle sólo de dos eventos: uno generado por un huracán, cuando la OCI se mantuvo en el océano superior, y otro

Tabla 4: Rango de valores de las características de los eventos OCIs según el tipo de tormenta generadora.

Tormenta	σ	ECi_{\max} (m^2s^{-2})	u'_{hmax} (ms^{-1})	λ_z (m)	Cg_z (m/día)
Norte	$\pm 0.05f$	0.006-.02	0.10-.25	130-450	-(10-30)
Huracán	$\pm 0.03f$	0.008-.05	0.11-.35	200-650	NA

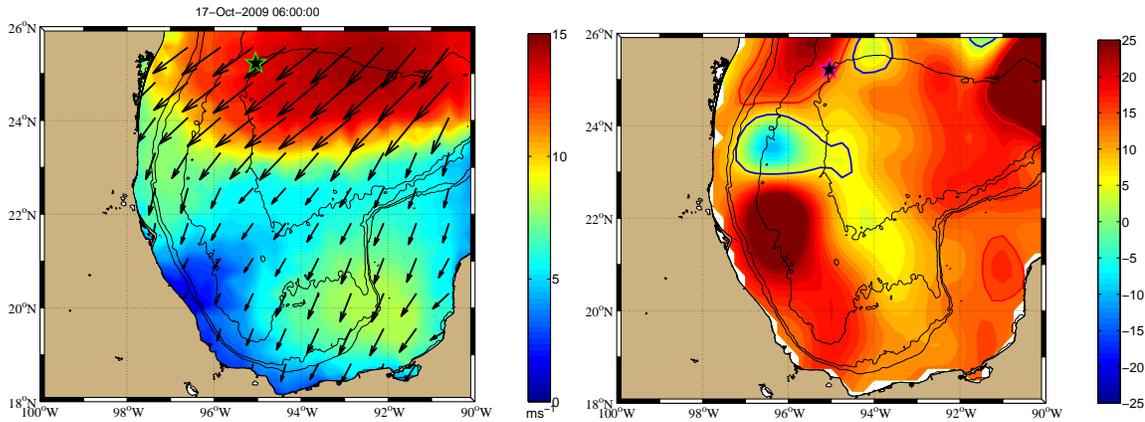


Figura 28: Mapas de condiciones locales al inicio del evento E3. a) Condiciones de viento (dirección y magnitud (m/s)), b) SLA (cm), los contornos indican la periferia de los remolinos detectados (Anticiclón (rojo) y ciclón (azul)) con el método de Chaigneau *et al.* (2009). En ambos casos la estrella simboliza la posición del anclaje donde se midió el evento.

generado por un Norte, cuando el paquete de ondas se propago hacia el fondo.

El primer evento (E3) se midió en el anclaje PER3500 y la duración del evento fue de 25 días (del 19/10/2009 al 13/11/2009). En el Apéndice B se pueden consultar las características calculadas para este evento. En la figura 28 se muestran los mapas de las condiciones ambientales al inicio del evento. En la figura 28a se muestran las condiciones de viento, donde observamos que se dirige hacia el suroeste con mayor magnitud en la zona norte, asociándolo al inicio de un evento Norte. En el segundo mapa se representa la SLA y los contornos de los remolinos detectados (ver sección 4.4), donde podemos notar que el anclaje se encontraba en la periferia de un anticiclón al inicio del evento.

En la figura 29 se muestra la evolución de la ECi y su propagación hacia el fondo. La ECi se encuentra amplificada a $z = -700$ m con valores de hasta $18 \times 10^{-3} m^2 s^{-2}$ y permanece a esta profundidad aproximadamente 5 días hasta su disipación. En la figura 30 se observa la evolución de la componente meridional de la velocidad de la corriente inercial

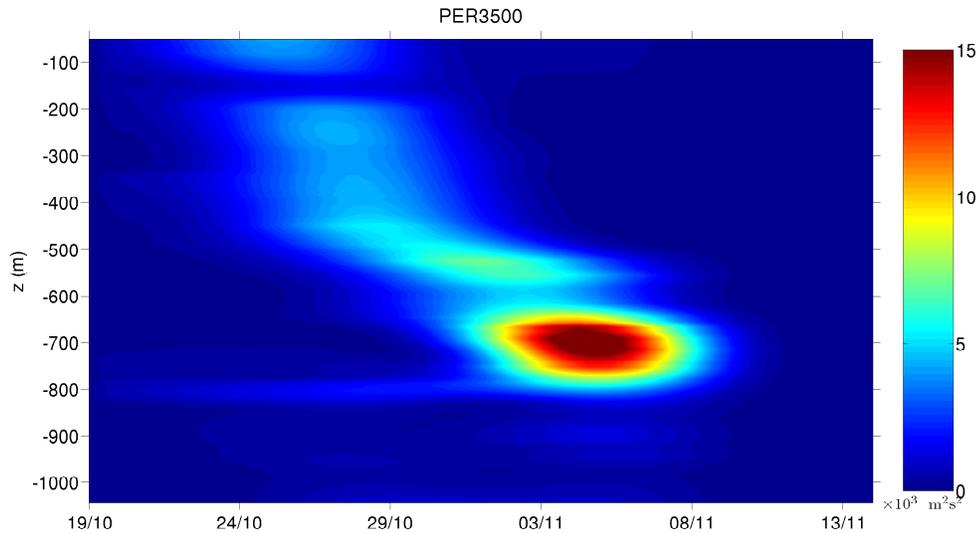


Figura 29: Serie temporal del perfil en profundidad de ECI para el evento E3.

normalizada, donde podemos notar una alternancia de fases negativas y positivas con duración aproximada de un día. Nótese que las fases parecen coherentes verticalmente debido a la escala temporal de la figura, sin embargo tienen una inclinación con pendiente positiva indicando propagación hacia el fondo. La barra de color rojo en la parte superior de esta gráfica representa el tiempo que el anclaje, y por lo tanto el paquete de ondas, estuvo dentro de un remolino anticiclónico.

En la figura 31a se muestra el espectro rotatorio en frecuencia de la componente CW respecto a la profundidad. El pico espectral y la mayor parte de la energía se encuentra un 10% por debajo de f . En concordancia con la figura 29 la mayor cantidad de energía se concentra a los $\sim 700\text{m}$. Otra forma para obtener la frecuencia Euleriana es con la frecuencia “carrier”. Para ello las series de tiempo de velocidad son ajustadas por mínimos cuadrados a un modelo de onda plana con pesos u_1 y u_2 :

$$u(t) = u_1 \cos(\sigma t) + u_2 \sin(\sigma t) + u_r,$$

donde σ son las frecuencias Eulerianas de prueba ($[0.8 - 1.2]f$) y u_r es la corriente residual. Una medida de la calidad del ajuste viene dada por el coeficiente de correlación

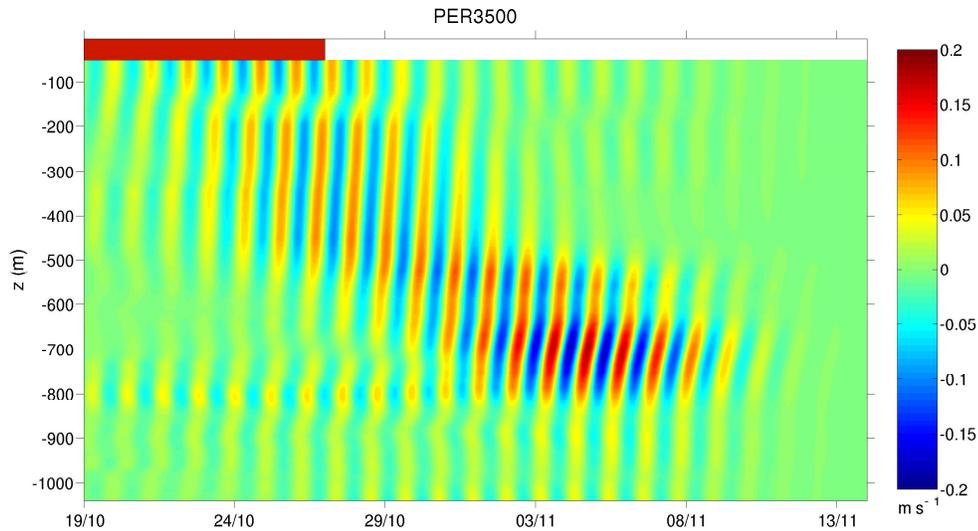


Figura 30: Evolución temporal del perfil en profundidad de la componente v' para el evento E3. En la parte superior el cuadro rojo representa el tiempo que el anclaje estuvo dentro de un remolino anticiclónico.

conjunto (Jaimes y Shay, 2010):

$$r = \frac{(r_u^2 + r_v^2)^{1/2}}{2^{1/2}},$$

donde $[r_u, r_v] = \frac{Cov_{xy}}{S_x^2 S_y^2}$, son los coeficientes de correlación entre las velocidades del modelo y las observaciones, Cov_{xy} es la covarianza entre las corrientes observadas y modeladas; y S_x^2 y S_y^2 son las matrices de varianza de las velocidades observadas y modeladas. La frecuencia euleriana estimada es la frecuencia de la onda plana que tiene mayor correlación con la serie temporal de velocidad medida. En la figura 31b se muestra la correlación conjunta (r) en función de la profundidad. La frecuencia Euleriana se encuentra por encima de f en los primeros ~ 200 m y por debajo entre los $[450 - 800]$ m en consistencia con la figura 31a. De las dos estimaciones de la frecuencia Euleriana se deduce que el paquete de ondas tenía una $\sigma = -0.04f$, es decir, subinercial.

En la figura 32 se muestra el espectro rotatorio (CW y CCW) de número de onda vertical ($k_z = \frac{2\pi}{\lambda_z}$) calculado a partir del promedio de todos los espectros de los perfiles de velocidad durante el evento de OCIs. El espectro es un promedio de $25 \times 24 = 600$ espectros. Leaman y Sandford (1975) concluyen que sí el vector velocidad rota CW (CCW) respecto al vector número de onda, el paquete de ondas se propaga hacia el fondo (su-

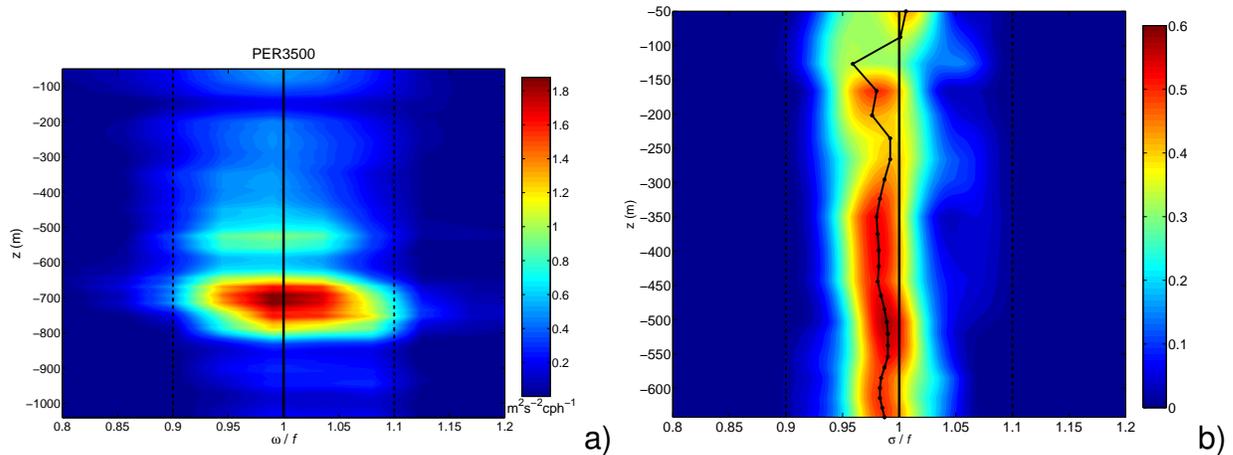


Figura 31: Medidas de la frecuencia euleriana. a) Perfil de energía espectral respecto a la frecuencia. ($\text{m}^2\text{s}^{-2}\text{cph}^{-1}$), y b) Perfil de frecuencia “carrier”.

perficie), i.e., $Cg_z < 0$ ($Cg_z > 0$). En la gráfica podemos observar que se propaga mucha más energía hacia el fondo que hacia la superficie para todos los números de onda, i.e., mayor energía espectral CW que CCW. Con este espectro podemos obtener también la longitud de onda vertical $\lambda_z = 360\text{m}$, calculada como el promedio de la longitud de onda asociada al pico espectral CW.

El segundo evento (E5) se midió en el anclaje PER3500, y la duración del evento fue de 21 días (del 26/06/2010 al 17/07/2010). En el apéndice B se pueden consultar las características calculadas para este evento. En la figura 33 se muestran los mapas de las condiciones ambientales al inicio del evento. En la figura 33a muestran las condiciones de viento, donde observamos que tiene el comportamiento de un huracán cuyo centro se ubica en el sureste. En el segundo mapa se representa la SLA y los contornos de los remolinos detectados, donde podemos notar que el anclaje se encontraba dentro de un ciclón al inicio del evento.

En las siguientes figuras (figuras 34 a 37) se muestran las mismas características que para el evento E3. La ECI (figura 34), se concentra en el océano superior sin propagarse significativamente hacia el fondo con un valor máximo superficial ($z = 51\text{m}$) de $48.3 \times 10^{-3} \text{m}^2\text{s}^{-2}$. En la figura 35 se muestra la evolución de la componente meridional de la velocidad de la corriente inercial, donde podemos observar que las fases de la onda son bastante coherentes en los primeros 500 m de la columna de agua aunque sí se

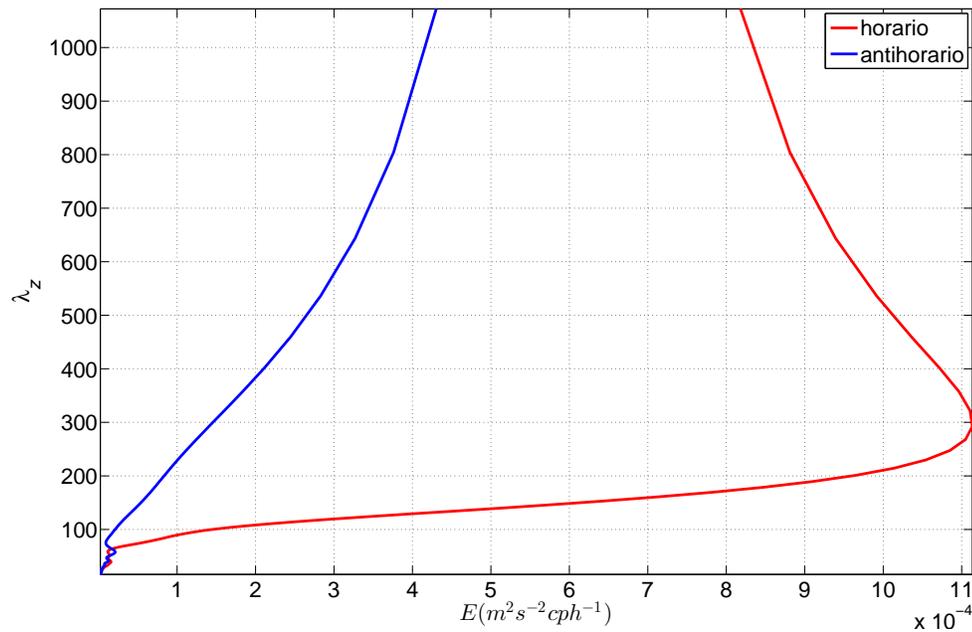


Figura 32: Promedio en el tiempo del espectro rotatorio de número de onda vertical del evento E3. Energía espectral CW (línea roja) y CCW (línea azul).

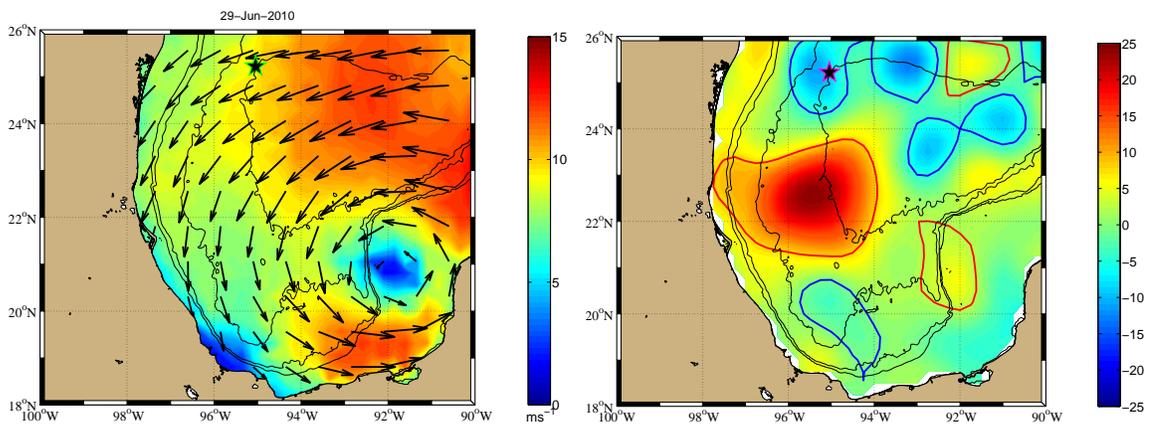


Figura 33: Mapas de condiciones locales al inicio del evento E5. a) Condiciones de viento (dirección y magnitud (m/s)), b) SLA (cm), los contornos indican la periferia de los remolinos detectados (Anticiclón (azul) y ciclón (rojo)) con el método de Chaigneau *et al.* (2009). En ambos casos la estrella simboliza la posición del anclaje donde se midió el evento.

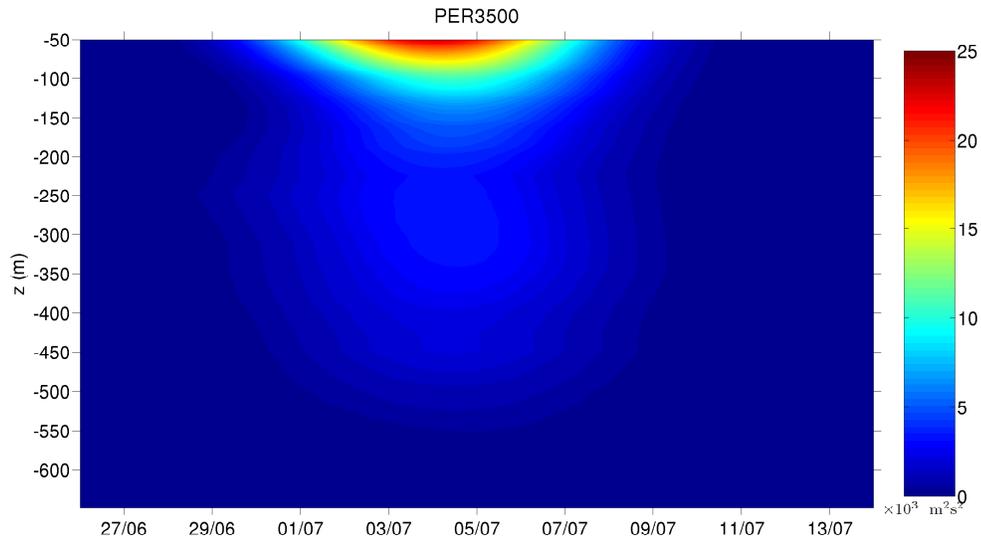


Figura 34: Serie temporal del perfil en profundidad de ECI para el evento E3.

observa cierta inclinación, especialmente en los primeros 200m. Es decir, parte de la ECI de la capa de mezcla ha escapado presumiblemente por bombeo inercial (Price, 1983). La barra de color azul en la parte superior de esta gráfica representa el tiempo que el anclaje, y por lo tanto el paquete de ondas, estuvo dentro de un remolino ciclónico.

En la figura 36a se muestra el espectro rotatorio en frecuencia a cada profundidad. Se observa que en este evento, el pico espectral y la mayor parte de la energía se encuentra un 10% alrededor y ligeramente por encima de f , consistente con la posición del anclaje dentro de un remolino ciclónico. En la figura 36b se muestra la correlación conjunta (r) en función de la profundidad y se observa que la frecuencia Euleriana en el océano superior es ligeramente mayor que f o muy cerca de f , aunque entre $\sim [200 - 500]$ m la frecuencia Euleriana parece que esta ligeramente por debajo de f en la región de la termoclina (~ 250 m). Esto sugiere que estas ondas han sido generadas por bombeo inercial y no directamente por el esfuerzo del viento del huracán sobre la superficie.

Finalmente, en la figura 37 se muestra nuevamente que la mayor parte de la energía CW esta asociada a OCIs con longitudes de onda de $\lambda_z = 640$ m.

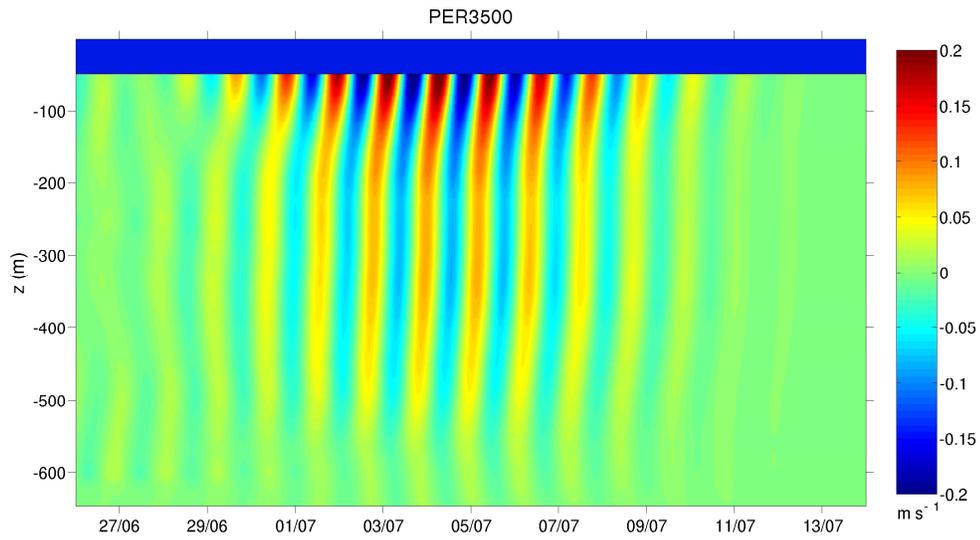


Figura 35: Evolución temporal del perfil en profundidad de la componente v' para el evento E5. En la parte superior el cuadro azul representa el tiempo que el anclaje estuvo dentro de un remolino ciclónico.

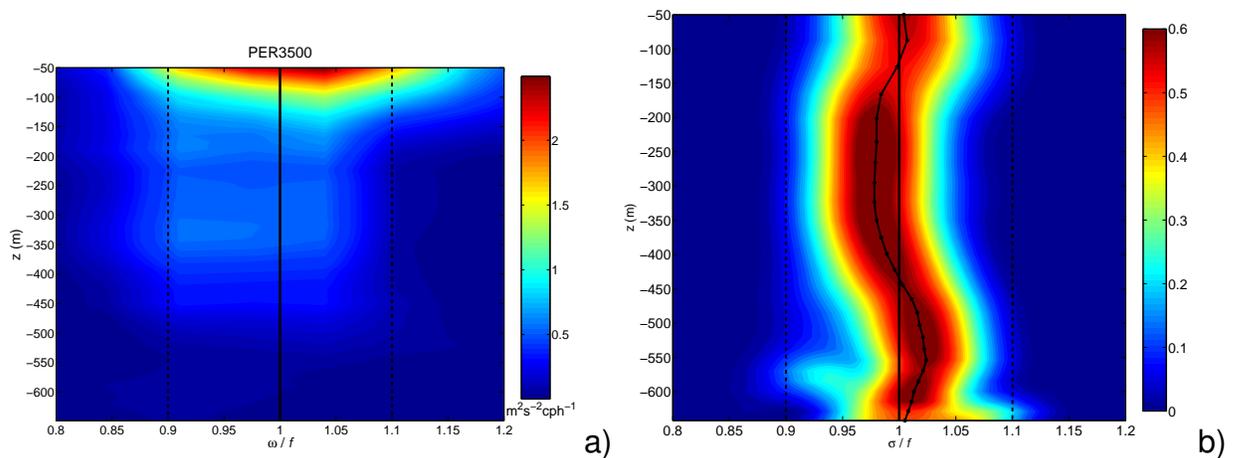


Figura 36: Medidas de la frecuencia euleriana. a) Perfil de energía espectral respecto a la frecuencia. ($\text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{cph}^{-1}$), y b) Perfil de frecuencia “carrier”.

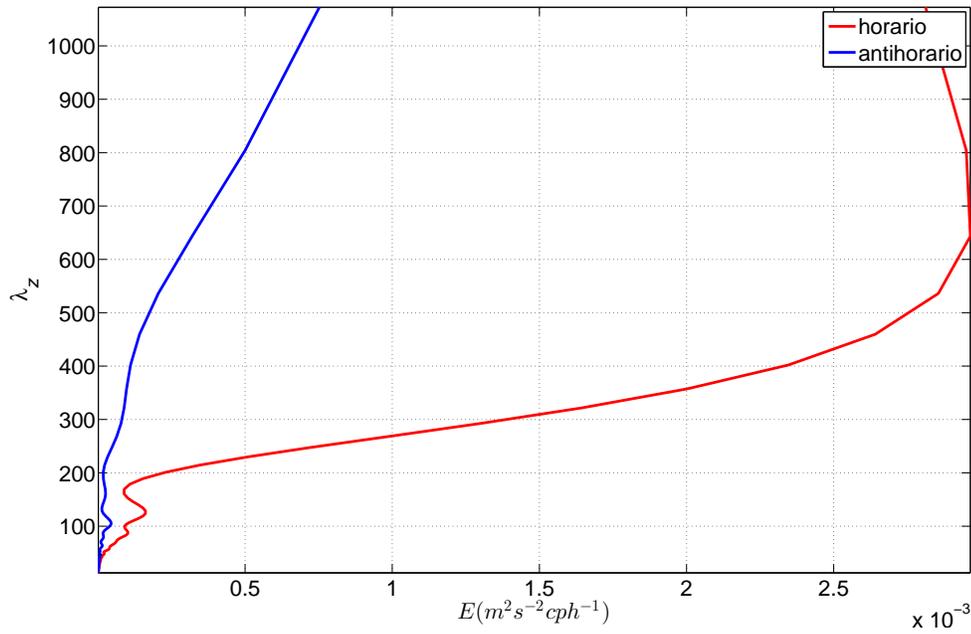


Figura 37: Promedio en el tiempo del espectro rotatorio en número de onda vertical del evento E5. Energía espectral CW (línea roja) y CCW (línea azul).

4.4. Propagación de OCIs hacia el fondo: efecto de la vorticidad

Como comentamos en la sección 3.2.3 las ondas se propagan en un medio no homogéneo, por lo tanto se deben normalizar los perfiles verticales de velocidad y estirar la coordenada de profundidad con el perfil promedio de Brunt-Väisälä. En la figura 38 se muestra un ejemplo del perfil de la velocidad promedio (\mathbf{u}_h), la velocidad promedio normalizada (\mathbf{u}_h^s) y el perfil de Brunt-Väisälä promedio del golfo de México (N_{GoM}). En la figura se observa que el perfil normalizado tiene velocidades mayores en el fondo que en superficie, contrario a lo que se presenta en el perfil sin normalizar, esto nos sugiere que las ondas están influenciadas por la estratificación.

Para conocer la distribución vertical de ECI dentro de remolinos anticiclónicos y ciclónicos se utilizaron los periodos de datos cuando el anclaje estuvo dentro de un remolino mayor a 40 km por más de 4 días y con una posición relativa de la mitad del radio del remolino hacia el centro. Con estos criterios únicamente los datos de 13 anclajes, principalmente los profundos (i.e., 2000 y 3500 m), son incluidos en el análisis. A estas series de tiempo de velocidad (de 4 días) se les aplica un filtro pasa banda Butterworth en el rango de frecuencias $[0.9 - 1.1]f$ para después calcular la ECI. Esto se realiza en todas

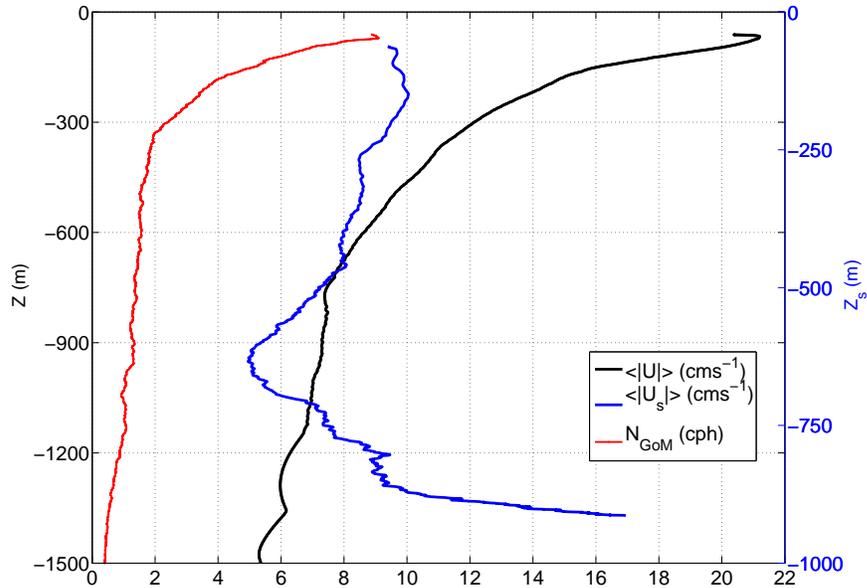


Figura 38: Perfil promedio de velocidad total u_h (línea negra), velocidad normalizada u_h^s (línea azul) y frecuencia de Brunt-Väisälä promedio del GoM N_{GoM} (línea roja) del anclaje LNK3500.

las profundidades con el fin de obtener perfiles de ECI dentro de remolinos ciclónicos y anticiclónicos. El mismo cálculo pero con la energía espectral, muestra los mismos resultados, por lo tanto sólo se presentan los perfiles verticales promedio de ECI.

En la figura 39a se muestran los perfiles promedio y la desviación estándar de ECI dentro de remolinos ciclónicos y anticiclónicos no normalizados. Se observa que la ECI es máxima dentro de los ciclones, alrededor de los 150 m con una desviación estándar muy alta, y que la ECI disminuye respecto a la profundidad, mientras que dentro de los anticiclones se observan valores altos en la mayor parte de la columna de agua con un máximo absoluto alrededor de los ~ 300 m.

En los perfiles promedio de ECI normalizados (figura 39b) se observan valores bajos de ECI en los primeros 300 m, tanto en remolinos ciclónicos como en anticiclónicos. En el resto de la columna, la ECI dentro de ciclones parece ser muy baja en general, mientras que dentro de los anticiclones se intensifica en diversos niveles con un máximo absoluto a los ~ 1000 m. Este máximo absoluto coincide con la base de los remolinos mesoescalares del oeste del GoM (Sosa Gutiérrez, 2014).

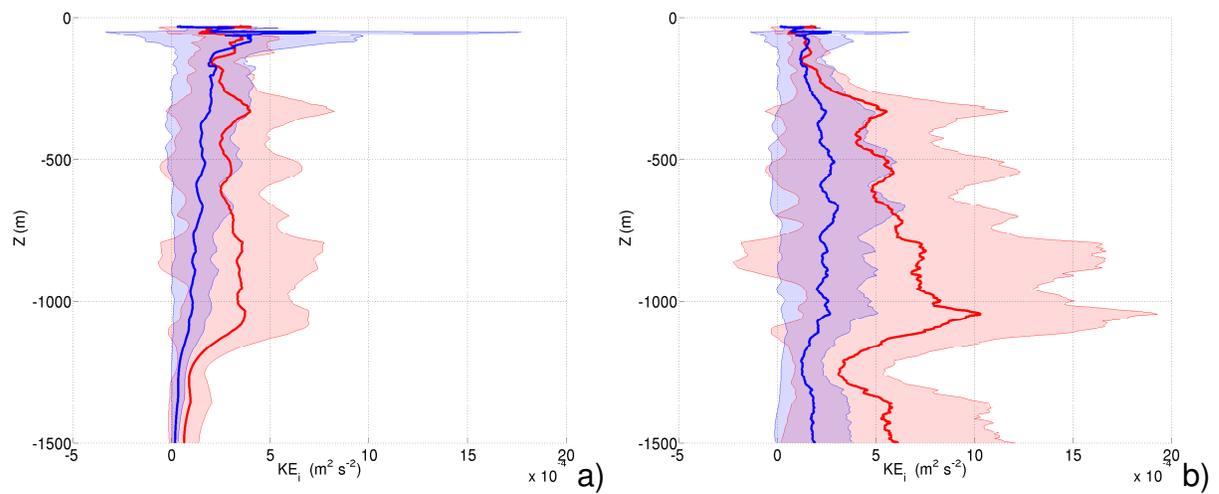


Figura 39: Promedio de la ECI dentro de remolinos anticiclónicos (línea roja) y ciclónicos (línea azul). La sombra representa la variabilidad de la ECI. a) Perfil de ECI y b) Perfil de ECI normalizado .

Capítulo 5. Discusión

La distribución horizontal de todas las variables (EC_i , R_i , PE_i , OPI y EDI) presentó un comportamiento similar en el promedio anual. Los valores más altos se ubican en aguas profundas, mientras que en la zona somera los valores son bajos. Esta distribución coincide con la reportada por Jarosz *et al.* (2007) quienes observaron, en el caño De Soto al norte del GoM, que la energía asociada a las OCIs aumenta desde la plataforma hacia aguas profundas. En contraste con lo reportado por Chen *et al.* (1996), en el norte del GoM, que observan gran cantidad de EC_i en el quiebre de la plataforma que decae gradualmente hacia la costa y rápidamente hacia aguas profundas. Estos autores también observan que la EC_i es mayor durante los meses de verano (junio- septiembre) que durante los meses de no verano (noviembre-mayo). Ellos asocian este comportamiento a la presencia de una capa de mezcla menor durante el verano, debido a que el esfuerzo del viento transfiere momento al océano rápidamente en capas de mezcla poco profundas (Pollard, 1970). Nuestros resultados presentan un comportamiento diferente, con valores de EC_i promedio mayores durante el invierno que durante el verano, así como mayor EC_i en promedio durante la temporada de Nortes (octubre-mayo) que durante la temporada de huracanes (junio-septiembre).

En diferentes partes del mundo se ha discutido el comportamiento estacional de las OCIs. Chaigneau *et al.* (2008) reportan mayor EC_i durante el invierno que durante el verano asociándolo al mayor número de tormentas en todas las cuencas oceánicas. En contraste Park *et al.* (2005) reporta mayor EC_i durante el verano, en la mayoría de las cuencas oceánicas, asociándolo a la estacionalidad de la capa de mezcla.

La variación estacional de nuestros resultados no se puede relacionar con la variabilidad de la capa de mezcla debido a la falta de datos de temperatura y salinidad en los primeros metros de la columna de agua (< 70 m) que no permite calcular la profundidad de la capa de mezcla. Pero en nuestra zona de estudio los resultados sugieren que la estacionalidad de la EC_i se debe a la variación temporal de las tormentas características del GoM (i.e. Nortes y huracanes). Esto quiere decir que existe un máximo de EC_i en la mayor parte del área durante el invierno, asociado a un número máximo de eventos Norte de escala sinóptica, mientras que en el verano la EC_i tiene una distribución muy pun-

tual tanto espacial como temporal, asociada a la trayectoria de los huracanes. Durante el otoño no se aprecia una distribución característica de ECI y esto se debe a la incursión tanto de huracanes como de Nortes, por lo cual la descripción de las OCIs y su relación con el viento no es la adecuada en términos de estaciones del año.

Separar el año en temporada de Nortes y de huracanes nos permitió una mejor descripción de la distribución horizontal de la ECI. Durante la temporada de Nortes la distribución de OCIs es muy uniforme con valores altos en aguas profundas principalmente en el sur y valores bajos cerca de la costa oeste. Durante esta temporada no parece existir una variabilidad interanual marcada, mientras que durante la temporada de huracanes, la distribución horizontal de ECI, tiene importantes diferencias de año a año según el número de tormentas ocurridas y su intensidad.

Si nos enfocamos en la variabilidad interanual, se puede observar mejor la importancia de los Nortes y huracanes. Durante el año 2008-2009, la ECI tuvo valores muy pequeños en la mayor parte de la zona de estudio y por lo tanto el trabajo del viento fue muy cercano a cero en todo el GoM, lo que podemos asociar con la ausencia de tormentas tropicales o huracanes durante el verano y también a un bajo número de eventos Norte el resto del año con un promedio de 15.

El segundo año de estudio (2009-2010) observamos valores máximos de ECI en aguas profundas; esto coincide con el año en que pasaron dos tormentas tropicales en la zona centro y sur del GoM y un huracán en el centro-norte durante los meses de junio a agosto. Durante los meses de octubre a mayo se observó el máximo número de eventos Norte con un promedio de 23 eventos por año. El tercer año (2010-2011) tuvo un comportamiento parecido, con el paso de tres tormentas tropicales en la zona centro-sur del GoM y un número alto de eventos Norte (21). Este gran número de eventos extremos generó una alta cantidad de ECI en la mayor parte de la zona de estudio. El año 2011-2012 la ECI posee valores bajos en general excepto en el sureste. Esto coincide con el año en que se generaron dos tormentas tropicales en la zona sureste durante el mes de agosto, mientras que durante el resto del año sólo se presentaron en promedio 16 eventos Norte.

Se observa que tanto la variabilidad interanual como la variabilidad estacional de la

distribución horizontal de EC_i se puede asociar a las marcadas diferencias en la intensidad y cantidad de eventos extremos de viento ocurridos durante el año. Durante la época de Nortes la distribución es uniforme, con valores mayores en aguas profundas mientras que durante la temporada de huracanes, la EC_i se distribuye alrededor de la trayectoria del huracán, especialmente a la derecha de la dirección de propagación de la tormenta (Price, 1983).

Los resultados del análisis del trabajo del viento representa de mejor manera las diferencias interanuales y estacionales, así como la importancia de separar el año en temporadas. En promedio el $\langle \Pi_i \rangle$ es mayor en aguas profundas y máximo en la zona norte y cerca de la península de Yucatán este mismo comportamiento se observa durante la temporada de Nortes. Cuando analizamos por componentes el trabajo del viento, se observa que en el promedio anual la componente dominante es $\langle \tau_y v \rangle$ lo que nos confirma que la temporada de Nortes es la que domina el promedio anual de la distribución horizontal de $\langle \Pi_i \rangle$.

Como se dijo anteriormente la EC_i es máxima alrededor de los 22° N entre 93° y 96° O, pero el máximo de $\langle \Pi_i \rangle$ se encuentra desfasado hacia el norte. ¿Cómo explicamos este comportamiento? En este trabajo planteamos dos hipótesis para explicar estas diferencias: la primera se refiere al tiempo de permanencia de las OClS en superficie y la segunda la relacionamos a la intensidad, duración y rotación del vector esfuerzo del viento durante la temporada de Nortes.

La primera hipótesis, como se dijo, esta relacionada al tiempo de permanencia de las OClS en superficie. En la figura 8 se muestra esta variable o escala de decaimiento, que claramente tiene una distribución horizontal similar a la de la EC_i , con valores máximos en el centro del área de estudio. En esta zona las OClS permanecen en promedio dos o más periodos inerciales (> 3 días) mientras que en el norte las ondas sólo permanecen cerca de la superficie en promedio durante un periodo inercial (~ 1 día). Esto ocasiona que exista en promedio más EC_i en el sur. Este comportamiento lo asociamos con la vorticidad local y su efecto en las OClS. En la parte sur (norte) existe en promedio vorticidad positiva (negativa), lo que permite que en el sur las OClS se mantengan mayor tiempo en superficie, pero de este efecto se discutirá más adelante.

La segunda hipótesis son las diferentes características del viento y eventos Norte en la zona de estudio. En la tabla 3 se da una breve descripción de estas diferencias: en la zona norte ocurren más eventos en promedio por año y duran más tiempo que en el resto del GoM. De igual manera en los anclajes de la zona este (i.e. anclajes profundos: 3500 m, y CAM2000 y CAM130) se observa un mayor número de eventos que en el oeste (i.e. anclajes someros: 130 y 500 m), con valores promedio de 20 y 16 eventos por año, respectivamente. La duración de los eventos también es un factor importante que está relacionado con la hipótesis anterior. Los eventos Norte duran más tiempo en la zona norte con valores promedio de 40 h, lo que quiere decir que el viento intenso se mantiene por más de un periodo inercial produciendo por lo tanto $\Pi_i > 0$ en general. Mientras que en el sur del GoM los eventos Norte duran aproximadamente 20 h, y el periodo inercial es aproximadamente de 35 h, por lo tanto el viento no alcanza a persistir el tiempo suficiente para generar un trabajo del viento positivo (aunque puede depender de cuando se generó la onda).

Estas diferencias de la duración del viento en el norte y sur del GoM, también puede explicar la gran cantidad de energía en la zona sur. Pollard (1970) concluye que las fluctuaciones del viento que tienen una duración menor a la de un periodo inercial son más eficientes en la generación de ondas inerciales. Por lo tanto podemos inferir que en el sur del GoM las fluctuaciones de los eventos Norte, con una duración aproximadamente de 20 h, generan mayor cantidad de OCIs que en el norte.

Otra característica del viento que puede explicar la distribución de $\langle \Pi_i \rangle$ es la rotación de las componentes del viento en sentido CW o CCW. Al calcular en los anclajes un espectro rotatorio del viento durante la temporada de Nortes, se pudo observar que cuando el viento presentaba un pico espectral de las componentes CW cerca o en la frecuencia inercial, el trabajo del viento era mayor en promedio. Sin embargo este pico espectral no se observa todos los años, ni en todos los anclajes con valores altos de Π_i por lo que aun queda por investigar las causas de las diferencias. En la figura 40 se muestra un ejemplo de los espectros rotatorios durante la temporada de Nortes del año 2009-2010.

De manera similar, Chen *et al.* (1996) y Jarosz *et al.* (2007) asocian la mayor cantidad

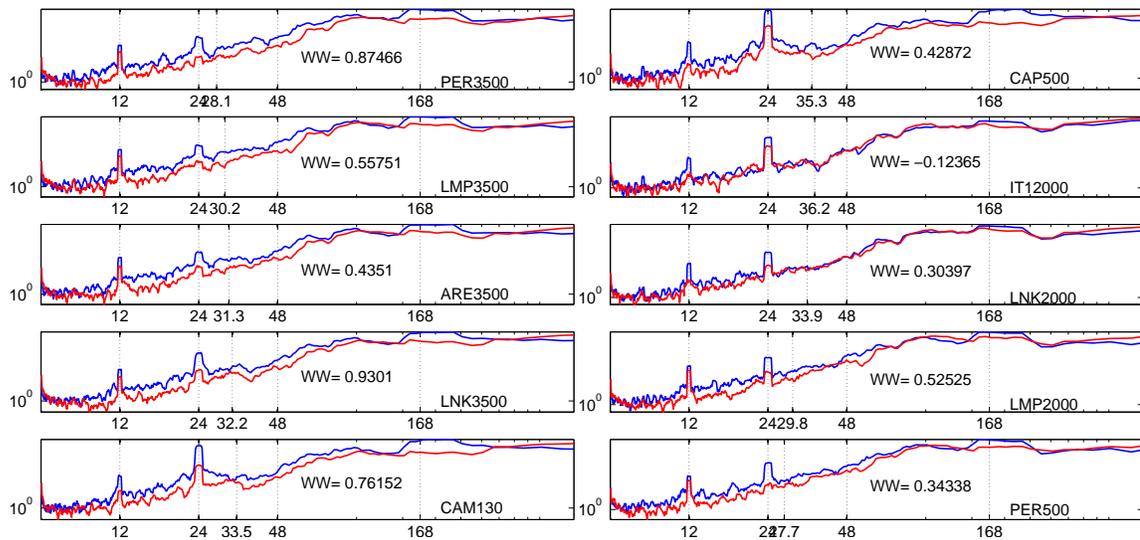


Figura 40: Espectro rotatorio del viento en diferentes anclajes para la temporada de Nortes del año 2009-2010. En todos los espectros la línea azul (roja) corresponde a la energía CW (CCW).

de ECi con el viento que rota en sentido CW, así como con el paso de frentes fríos (Nortes). Estos autores no calculan el trabajo del viento para sus datos sino que relacionan las series de tiempo y calculan su covarianza (Jarosz *et al.*, 2007), o calculan el espectro rotatorio del viento en el anclaje en el cual se midieron la OCi (Chen *et al.*, 1996). Es importante recalcar que el espectro rotatorio del viento presenta un pico espectral significativo en la frecuencia diurna en la mayor parte del GoM, y en la zona que se realizan estos estudios se presenta un periodo inercial muy cercano a las 24 h. D' Asaro (1985) calculó el trabajo del viento en una boya de la NOAA ubicada en 93.75° O y 23.09° N. Él utilizó los datos de viento de la boya y con el modelo de Pollard y Millard (1970) generó las corrientes inerciales, a las cuales posteriormente se les calculó el Π_i . El valor promedio reportado durante el invierno 1978-1979 fue de 1.1 mW m^{-2} . Este valor es muy superior al valor promedio máximo calculado por nosotros durante los 4 inviernos (0.55 mW m^{-2}), reportado en el anclaje LNK3500. Este autor sugiere que la resolución temporal del viento es un factor importante que puede subestimar el Π .

5.1. Efecto de la vorticidad sobre las OCIs

Según la teoría, las OCIs se pueden propagar hacia el fondo cuando la frecuencia de las ondas es mayor a la frecuencia efectiva, definida como la suma de la vorticidad planetaria y un medio de la vorticidad local ($f_e = f + \zeta/2$). Por lo tanto las ondas se

propagan hacia el fondo dentro de los anticiclones ($f_e = f - \zeta/2$, i. e. $\omega > f_e$). Lee y Niiler (1998) proponen una “chimenea inercial” que ocurre dentro de regiones cerradas de con vorticidad relativa negativa (anticiclones). Esto quiere decir que la propagación de las OCIs depende del signo de la vorticidad vertical. En remolinos anticiclónicos la energía se propaga hacia el fondo y hacia el núcleo del remolino. En remolinos ciclónicos, al contrario, la energía se propaga hacia afuera del núcleo del remolino y no hacia el fondo.

En la figura 39, que representa el perfil de la ECI promedio dentro de remolinos ciclónicos y anticiclónicos, se puede destacar que existe mayor cantidad de energía dentro de los remolinos anticiclónicos en la mayor parte de la columna de agua, excepto en los primeros 100 m. En los perfiles no normalizados (39a) se observa un máximo de energía dentro de ciclones alrededor de los 50 m y muy poca energía en el resto de la columna, mientras que dentro de remolinos anticiclónicos se observa un nivel casi constante de ECI en la columna de agua, con un máximo absoluto a los 300 m. La desviación estándar dentro de remolinos ciclónicos es mucho mayor en los primeros 200 m, indicando que puede existir una gran cantidad de ECI atrapada en la capa de mezcla, mientras que en los remolinos anticiclónicos la desviación estándar es mayor entre los [300 – 1200] m.

Este comportamiento se enfatiza más en los perfiles promedio normalizados (figura 39b) en los cuales se observa una gran cantidad de ECI en la mayor parte de la columna de agua dentro de remolinos anticiclónicos con un máximo absoluto a los 1000 m que coincide con la extensión vertical de los remolinos de mesoescala ubíquos en el GoM. Dentro de los remolinos ciclónicos la ECI es baja y constante en toda la columna de agua. Esto apoya la teoría de que las OCIs se propagan hacia el fondo dentro de remolinos anticiclónicos, mientras que en los ciclónicos las OCIs se mantienen en la capa de mezcla hasta su disipación. En el GoM la circulación esta dominada por ciclones y anticiclones de mesoescala, por lo tanto se espera que las OCIs estén afectadas gran parte del tiempo por los remolinos.

Como se dijo en la descripción de la zona de estudio, en el suroeste del GoM existe un remolino ciclónico semipermanente (Vázquez de la Cerda *et al.*, 2005), que oscila en su posición pero permanece en el área entre los 93.5° y 98° O y 18° a 22° N (Sandoval Hernández, 2011) mientras que en la zona por encima de los 22° N generalmente se

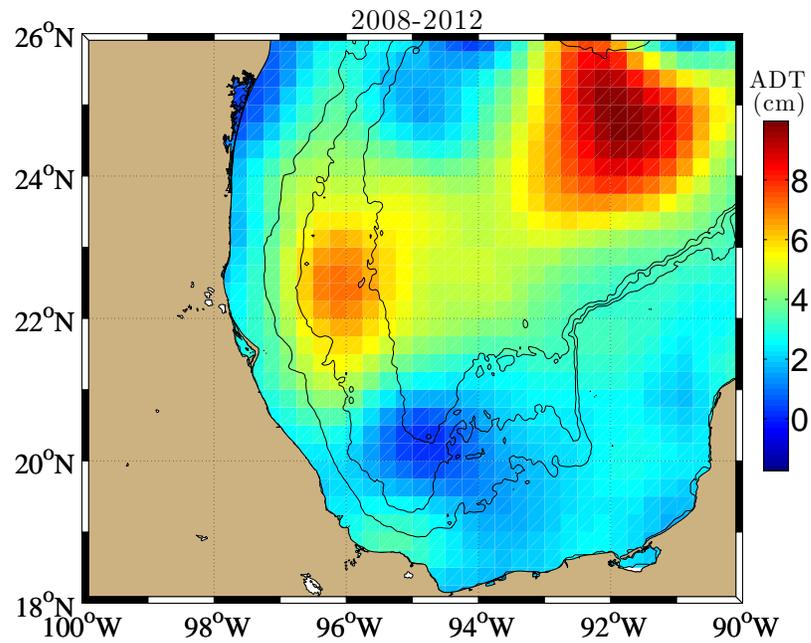


Figura 41: ADT promedio de octubre 2008 a septiembre 2012 en el oeste del GoM.

observa la llegada de anticiclones. En la figura 41 se representa la ADT promedio de octubre 2008 a septiembre 2012 y se observa que la zona sur ($< 21^\circ \text{N}$) está dominada por ADT negativa representativa de vorticidad positiva, mientras que en el norte ($> 21^\circ \text{N}$) la ADT en general es positiva.

Basandonos en lo anterior se realizó un perfil promedio de ECI de los anclajes ubicados al norte ($> 21.5^\circ \text{N}$) y otro perfil promedio de los anclajes del sur (latitud $< 21.5^\circ \text{N}$). En la figura 42 se observan estos perfiles promedio en línea roja para los perfiles del sur, y azul para los perfiles del norte. En sombra se representa la desviación estándar. En promedio existe mayor cantidad de ECI en los anclajes del sur en los primeros 50 m, mientras que en el resto de la columna de agua los anclajes del norte presentan mayor ECI, con un máximo aproximadamente a los 150 m. Los anclajes del sur, sin embargo, presentan una desviación estándar mucho mayor en los primeros 200 m, indicando que existen anclajes con mucha ECI en esta parte de la columna de agua, incluso mayor a los anclajes del norte. Este comportamiento modula la distribución horizontal superficial promedio de ECI, con valores altos en el sur (ver figura 4) donde tenemos en promedio vorticidad positiva y valores bajos de ECI en el norte donde domina la vorticidad positiva.

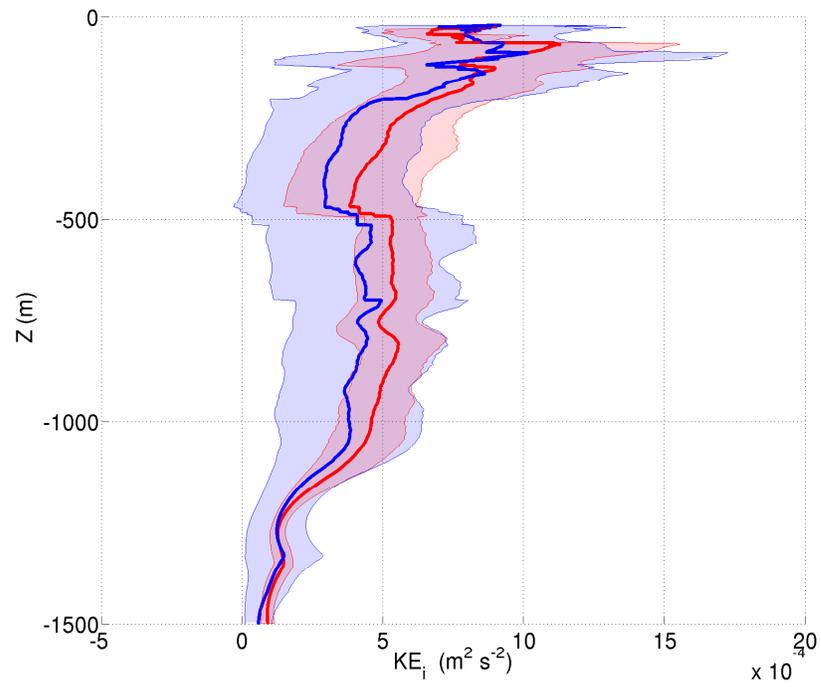


Figura 42: Perfiles verticales de ECI promedio de 2008 a 2012. En línea roja representa los anclajes ubicados a una latitud superior a 21.5° N. La línea azul representa los anclajes ubicados al sur (Lat < 21.5 ° N). En ambos casos la sombra representa una desviación estándar.

Capítulo 6. Conclusiones

- La mayor ECI superficial (< 70 m) se localiza en la región del sureste del GoM, entre los 94° y 96° O alrededor de los 22° N. Esta distribución de ECI es consistente con otras medidas de la magnitud de las OCIs (PEi y Ri) y también coincide con la región donde las OCIs permanecen mas tiempo en la superficie (EDi).
- La ECI es mayor en aguas profundas que en aguas someras. Este comportamiento es evidente en los promedios anuales, estacionales y por temporadas, y lo podemos asociar a una mayor cantidad e intensidad de las tormentas que influyen en la región de aguas profundas, ya sea Nortes o huracanes. En aguas someras sólo se observa gran cantidad de ECI cuando tormentas tropicales o huracanes transitan cerca de la costa.
- Los eventos de OCIs no presentan una estacionalidad definida (primavera, verano, otoño e invierno). Este resultado esta de acuerdo con el comportamiento del viento que tampoco presenta una estacionalidad definida. Por ello se sugiere que para una descripción correcta de la ECI es mas adecuado promediar los eventos por temporadas con forzamientos de viento característicos, es decir temporada de Nortes y temporada de huracanes.
- Se estima un mayor trabajo del viento en el norte, donde los eventos Norte ocurren con mayor frecuencia y con mayor duración que en las regiones del sur. El trabajo del viento también es mayor en aguas profundas asociado a un mayor número de eventos Norte en esta región.
- El trabajo del viento asociado a tormentas tropicales o huracanes es muy puntual al igual que las OCIs generadas a lo largo de su trayectoria y predominantemente a la derecha de esta.
- La componente $\langle \tau_y v' \rangle$ del trabajo del viento es la más importante, lo que refleja, en promedio, que los vientos Nortes son el principal forzamiento de OCIs en el oeste del GoM.
- Las características promedio de las OCIs generadas por Nortes (huracanes) son: $\sigma = -0.02f (+.01f)$, $\lambda_z = 340 (420)$ m, $Cg_z = -20 (NA)$ m/dia, ECI máxima en la

superficie $ECi_{maxs} = 8.2 (13.5) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, $ECi_{max} = 13.8 (20.9) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ y velocidad máxima $u_h = 0.16 (0.21) \text{ ms}^{-1}$.

- La distribución de ECi dentro de remolinos anticiclónicos es mayor que en los ciclónicos en casi toda la columna de agua, mientras que en superficie los ciclones poseen mayor ECi . Este comportamiento reportado esta de acuerdo con la teoría.
- Los resultados promedio indican que la distribución horizontal de $\langle \Pi_i \rangle$ no coincide con la de ECi , i.e. Π es máxima en el norte sin embargo la ECi es máxima al sur. Aunque no podemos explicar exactamente los procesos dinámicos que provocan esta discrepancia, se especula que las distribuciones de $\langle \Pi_i \rangle$ y ECi no coinciden debido a una combinación de (i) vorticidad local positiva (negativa) en el sur (norte) que permite que las ondas permanezcan más (menos) tiempo en superficie y (ii) la mayor (menor) escala temporal de las fluctuaciones en la zona norte (sur) y por lo tanto menor (mayor) efectividad en generar OCIs.

Lista de referencias

- Alford, M. H. (2001). Internal Swell Generation : The Spatial Distribution of Energy Flux from the Wind to Mixed Layer Near-Inertial Motions. *Journal of Physical Oceanography*, **31**(8): 2359–2368.
- Alford, M. H. y Whitmont, M. (2007). Seasonal and Spatial Variability of Near-Inertial Kinetic Energy from Historical Moored Velocity Records. *Journal of Physical Oceanography*, **37**(8): 2022–2037.
- Anderson, S. y Sharma, N. (2008). Satellite-Tracked Drifter Measurements of Inertial Currents in the Gulf of Mexico. En: *Current Measurement Technology, 2008. CMTC 2008. IEEE/OES/ 9th Working Conference on*. IEEE, pp. 285–288.
- Baines, P. (1973). The generation of internal tides by flat-bump topography. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, **20**(2): 179–205.
- Chaigneau, A., Pizarro, O., y Rojas, W. (2008). Global climatology of near-inertial current characteristics from Lagrangian observations. *Geophysical Research Letters*, **35**(13): L13603.
- Chaigneau, A., Eldin, G., y Dewitte, B. (2009). Eddy activity in the four major upwelling systems from satellite altimetry (1992–2007). *Progress in Oceanography*, **83**(1-4): 117–123.
- Chen, C., Reid, R. O., y Nowlin, W. (1996). Near-inertial oscillations over the Texas-Louisian shelf. *Journal of Geophysical Research*, **101**(C2): 3509–3524.
- D' Asaro, E. (1985). The energy flux from the wind to near inertial motions in the surface mixed layer. *Journal of Physical Oceanography*, **15**(8): 1043–1059.
- de Velasco, G. G. y Winant, C. D. (1996). Seasonal patterns of wind stress and wind stress curl over the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, **101**(C8): 18127.
- DiMego, G. J., Bosart, L. F., y Endersen, G. W. (1976). An examination of the frequency and mean conditions surrounding frontal incursions into the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Monthly Weather Review*, **104**(6): 709–718.
- Dubranna, J., Pérez-Brunius, P., López, M., y Candela, J. (2011). Circulation over the continental shelf of the western and southwestern Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, **116**(C8): C08009.
- Expósito-Díaz, G., Salas-de León, D., Monreal-Gómez, M. A., Salas-Monreal, D., y Vázquez-Gutiérrez, F. (2009). Inertial currents in the southern Gulf of Mexico Corrientes inerciales en el sur del Golfo de México. *Ciencias Marinas*, **35**(3): 287–296.
- Ford, R. (1994). Gravity wave radiation from vortex trains in rotating shallow water. *Journal of Fluid Mechanics*, **281**: 81–118.
- Garret, C. (2001). What is the “Near-Inertial” Band and Why Is It Different from the Rest of the Internal Wave Spectrum? *Journal of Physical Oceanography*, **31**(4): 962–971.

- Garret, C. y Munk, W. (1975). Space- Time scales of internal waves: A progress report. *Journal of Geophysical Research*, **80**(3): 291–297.
- Gonella, J. (1971). A local study of inertial oscillations in the upper layers of the ocean. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, **18**(8): 775–788.
- Jaimes, B. y Shay, L. K. (2010). Near-Inertial Wave Wake of Hurricanes Katrina and Rita over Mesoscale Oceanic Eddies. *Journal of Physical Oceanography*, **40**(6): 1320–1337.
- Jarosz, E., Hallock, Z., y Teague, W. (2007). Near- inertial currents in the DeSoto Canyon region. *Continental Shelf Research*, **27**(19): 2407–2426.
- Javam, A., Imberger, J., y Armfield, S. W. (2000). Numerical study of internal wave–wave interactions in a stratified fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, **415**: 65–87.
- Jiang, J., Lu, Y., y Perrie, W. (2005). Estimating the energy flux from the wind to ocean inertial motions: The sensitivity to surface wind fields. *Geophysical Research Letters*, **32**(15): L15610.
- Jochum, M., Briegleb, B. P., Danabasoglu, G., Large, W. G., Norton, N. J., Jayne, S. R., Alford, M. H., y Bryan, F. O. (2013). The Impact of Oceanic Near-Inertial Waves on Climate. *Journal of Climate*, **26**(9): 2833–2844.
- Kunze, E. (1985). Near Inertial wave propagation in geostrophic shear. *Journal of Physical Oceanography*, **15**(5): 544–565.
- Kunze, E. (1986). The mean and Near-Inertial velocity fields in a Warm-core ring. *Journal of Physical Oceanography*, **16**(8): 1444–1461.
- Kunze, E. y Sanford, T. B. (1984). Observations of Near- Inertial Waves in a Front. *Journal of Physical Oceanography*, **14**(3): 566–581.
- Kuo, A. C. y Polvani, L. M. (1999). Wave–vortex interaction in rotating shallow water. Part 1. One space dimension. *Journal of Fluid Mechanics*, **394**: 1–27.
- Large, W. y Pond, S. (1981). Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *Journal of Physical Oceanography*, **11**(3): 324–336.
- Leaman, K. y Sandford, T. (1975). Vertical Energy Propagation of Inertial Waves: A Vector Spectral Analysis of Velocity Profiles. *Journal of Geophysical Research*, **80**(15): 1975–1978.
- Lee, D.-k. y Niiler, P. (1998). The inertial chimney: The near-inertial energy drainage from the ocean surface to the deep layer. *Journal of Geophysical Research*, **103**(6): 7579–7591.
- Mooers, C. N. K. (1975). Several effects of a baroclinic current on the cross-stream propagation of inertial internal waves†. *Geophysical Fluid Dynamics*, **6**(3): 245–275.

- Pallàs-Sanz, E. y Viúdez, A. (2008). Spontaneous Generation of Inertia–Gravity Waves during the Merging of Two Baroclinic Anticyclones. *Journal of Physical Oceanography*, **38**(1): 213–234.
- Park, J. J., Kim, K., y King, B. a. (2005). Global statistics of inertial motions. *Geophysical Research Letters*, **32**(14): n/a–n/a.
- Park, J. J., Kim, K., y Schmitt, R. W. (2009). Global distribution of the decay timescale of mixed layer inertial motions observed by satellite-tracked drifters. *Journal of Geophysical Research*, **114**: C11010.
- Perkins, H. (1976). Observed effect of an eddy on inertial oscillations. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, **23**(11): 1037–1042.
- Pollard, R. T. (1970). On the generation by winds of inertial waves in the ocean *. *Deep-Sea Research*, **17**(4): 795–812.
- Pollard, R. T. y Millard, C. (1970). Comparison between observed and simulated wind-generated inertial oscillations *. *Deep Sea Research*, **17**(4): 813–821.
- Price, J. (1983). Internal wave wake of a moving storm. Part 1: Scales, energy budget and observations. *Journal of Physical Oceanography*, **13**: 949–965.
- Rattray, M. (1960). On the Coastal Generation of Internal Tides. *Tellus A*, **12**(1): 54–62.
- Sandoval Hernández, E. (2011). *Estudio del ciclón en el Golfo de Campeche con datos lagrangeanos y experimentos de laboratorio*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Shay, L. y Elsberry, R. (1987). Near-Inertial ocean current response to hurricane Frederic. *Journal of Physical Oceanography*, **17**(8): 1249–1267.
- Shay, L. K., Chang, S. W., y Elsberry, R. (1990). Free Surface Effects on the Near-Inertial Ocean Current Response to a Hurricane. *Journal of Physical Oceanography*, **20**(9): 1405–1424.
- Sosa Gutiérrez, E. R. (2014). *Caracterización de la estructura vertical de los remolinos de mesoescala en el Golfo de México*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Vázquez de la Cerda, A., Reid, R. O., DiMarco, S. F., y Jochens, A. E. (2005). Bay of Campeche Circulation: An Update. *Circulation in the Gulf of Mexico: observations and models*, **161**: 279–293.
- Viúdez, A. y Dritschel, D. G. (2006). Spontaneous generation of inertia–gravity wave packets by balanced geophysical flows. *Journal of Fluid Mechanics*, **553**: 107–117.
- Webster, F. (1968). Observations of inertial-period motions in the deep sea. *Reviews of Geophysics*, **6**(4): 473–490.
- White, W. B. (1972). Doppler shift in the frequency of inertial waves observed in moored spectra. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, **19**(8): 595–600.

Zavala-Hidalgo, J., Romero-centeno, R., Mateos-jasso, A., y Morey, S. L. (2014). The response of the Gulf of Mexico to wind and heat flux forcing: What has been learned in recent years? *Atmósfera*, **27**(3): 317–334.

Apéndice A. Descripción vertical de un anclaje

Como ejemplo , en la figura 43 se muestra a configuración del anclaje profundo Lanka-wasa 3500 (LNK3500). Para este anclaje se instalaron: 4 perfiladores acústicos (ADCP)

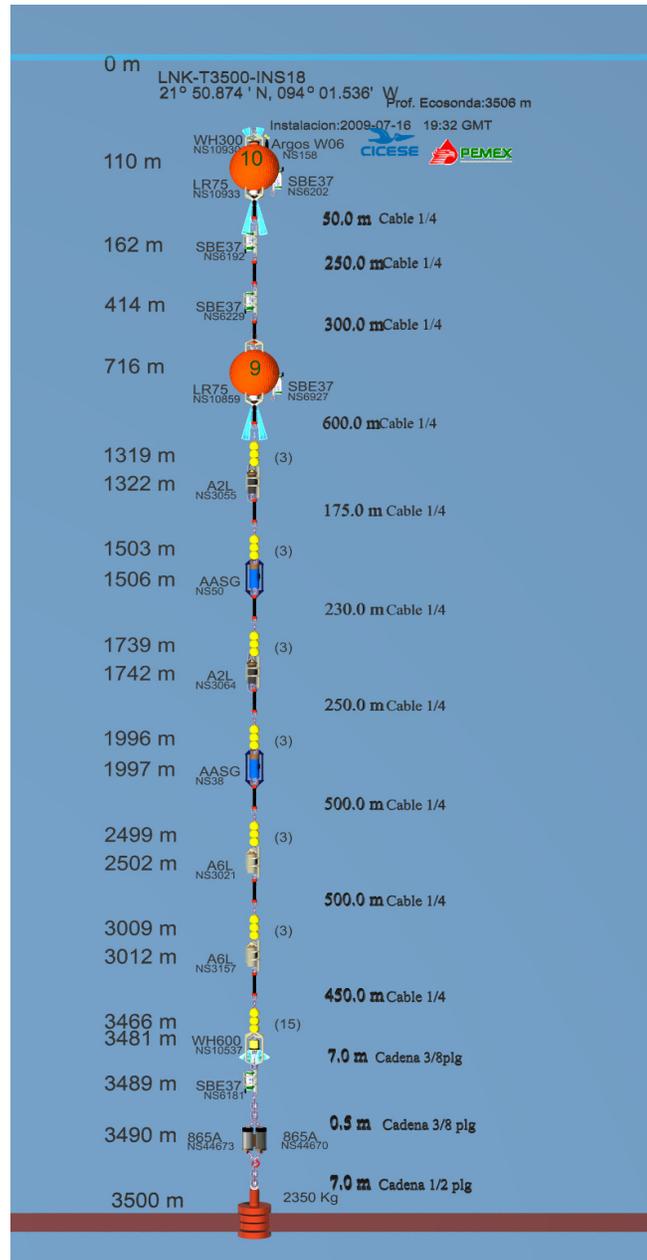


Figura 43: Configuración vertical del anclaje Lakahuasa 3500 (LNK3500) localizado en el Oeste del GoM.

- WH300: Perfil acústico, ADCP Teledyne RDI Work Horse Sentinel 300, frecuencia

acústica 300 KHz, se encuentra a $\sim 110\text{m}$ mirando hacia arriba. El rango vertical de muestreo es de $[1 - 154]\text{m}$, el tamaño de celda vertical es de 8 m, la resolución de la velocidad de 0.1 cm s^{-1} , y la precisión de la velocidad de $\pm 0.5\text{ cm s}^{-1}$.

- LR75: Perfilador Acústico, ADCP TEledyne RDI Work Horse Long Ranger, frecuencia acústica 75 KHz, a $\sim 110\text{m}$ mirando hacia abajo. El rango vertical de muestreo es de 600m el tamaño de celda vertical de 16m, la resolución de la velocidad de 0.1 cm s^{-1} , y la precisión de la velocidad de $\pm 0.5\text{ cm s}^{-1}$.
- LR75: Perfilador Acústico, ADCP TEledyne RDI Work Horse Long Ranger, frecuencia acústica 75 KHz, a $\sim 716\text{m}$ mirando hacia abajo. Tiene las mismas características que el aparato anterior.
- WH600: Perfilador Acústico, ADCP Teledyne RDI Work Horse Sentinel 600, frecuencia acústica 600 KHz, a $\sim 3481\text{ m}$ mirando hacia abajo. El rango vertical de muestreo es de $[1 - 154]\text{ m}$, el tamaño de celda vertical de 4 m, la resolución de la velocidad de 0.1 cm s^{-1} , y la precisión de la velocidad de $\pm 0.3\text{ cm s}^{-1}$.

Todos los ADCP mencionados tienen sensores estandar de temperatura (rango -5° C a 45° C , precisión $\pm 0.4^\circ\text{ C}$, resolución 0.01° C). Los LR75 tienen sensores de presión (rango máximo 2000 m precisión 0.25 % de rango escala total).

Ademas se instalaron 3 *MicroCAT*:

- *SBE37: Sensor de Temperatura, Conductividad y Presión (opcional), Sea Bird Electronics SBE-37 Microcat, a $\sim 162\text{ m} \sim 414\text{ m} \sim 3489\text{ m}$; las mediciones conductividad: rango de 0 a 7 S/m; precisión $\pm 0.0003\text{ S/m}$; resolución 0.00001 S/m , temperatura: rango de -5° C a 45° C ; precisión $\pm 0.002^\circ\text{ C}$; resolución 0.0001° ; y presión: rango profundidades 20/100/350/600/1000/2000/3500/7000 m; precisión $\pm 0.1\%$ de rango escala total; resolución 0.002% rango escala total.*

Y 6 corrientímetros puntuales:

- *A2L y A6L: Corrientímetro puntual acústico, Nortek Aquadopp, a $1322\text{ m} \sim 1742\text{ m} \sim$*

2502 m ~ 3012 m *su frecuencia acústica es de 2 MHz e intervalo de muestreo: 15 minutos, promedio de 100 segundos a 24 Hz*

- *AASG: Corrientímetro puntual acústico, Aanderaa Seaguard, frecuencia acústica 2 MHz, instalado a ~ 1506 m ~ 1997 m , intervalo de muestreo: 30 minutos, 150 pings.*

Finalmente se instalaron los liberadores acústicos Teledyne Benthos 865A a ~ 3490 m

Apéndice B. Características de OCIs

Tabla 5: Características de 20 eventos de OCIs. Nombre de identificación del evento (E), Frecuencia euleriana respecto de f , ECI máxima calculada (ECI_{max}), profundidad de la ECI_{max} , ECI máxima superficial ($ECI_{max,sup}$), profundidad de la $ECI_{max,sup}$, velocidad inercial máxima (u'_{max}), longitud de onda vertical (λ_z), Velocidad de grupo vertical (C_{gz}), tipo de tormenta que generó la Oci, viento máximo (U_{10}) y signo de la vorticidad local (ζ).

Evento	σ %	ECI_{max} ($\times 10^{-3} m^2 s^{-2}$)	z (m)	$ECI_{max,sup}$ ($\times 10^{-3} m^2 s^{-2}$)	Z_{sup} (m)	u'_{max} (ms^{-1})	λ_z (m)	C_{gz} (m/día)	Tormenta	$ U_{10} _{max}$ (ms^{-1})	ζ
E1	-1	22.6	505	19.2	105	0.25	400	-16.6	Norte	13.12	positivo
E3	-4	16.3	275	8	51	0.18	360	-23.4	Norte	10.87	negativo
E4	-3	10	82	6.9	66	0.13	360	-15.2	Norte	10.99	negativo
E5	1	48.7	51	48.7	51	0.37	640	-	Huracán	21.45	positivo
E6	3		82	5.7	66	0.11	640	-	Huracán	18.61	positivo
E10	-4	9.8	75	8.8	30	0.14	260	-13.3	Norte	12.21	positivo
E11	-1	6.1	61	6.1	61	0.11		-	Norte	12.21	Ciclón
E14	-1	16.8	146	11.9	82	0.18	450	-34.8	Norte	12.5	-
E15	1	24.5	355	6.3	51	0.22	350	-26.5	Norte	12.2	negativo
E20	-3	16.6	550	3.5	175	0.19	320	-	Huracán	20.59	positivo
E22	0	14.7	610	10		0.18	270	-	Huracán	13.3	positivo
E25	2	15	1050	6.5	30	0.18	400	-	Norte	12.1	-
E26	3	10	100	5	89	0.58	120	-	Norte	20.1	-
E16	-5	12.6	655	5	61	0.17	210	-	Norte	18.13	-
E17	-3	7.3	1000	6	105	0.12	290	-	Norte	11.7	negativo
E24	-1	23.2	655	2.4	105	0.22	270	-	Huracán	18.8	positivo
E28	1	17.3	60	17.3	60	0.17	160	-	Huracán	13.9	-
E27	-3	15.9	75	12.5	60	0.18	200	-16	Norte	14.5	-
E31	3	17.5	670	10.5	34	0.19	650	-23	Huracán	10.5	-