

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de lo Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos Autor.

CICESE@ 2022. Todos los derechos reservados

**Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California**



---

**Maestría en Ciencias  
en Oceanografía Física**

---

**Respuesta de la circulación del Caribe mexicano al paso del  
huracán Wilma**

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

Presenta:

**Valeria Fernanda Quiroz Amoroso**

Ensenada, Baja California, México  
2022

Tesis defendida por  
**Valeria Fernanda Quiroz Amoroso**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. Julio Candela Pérez**  
Director de tesis

**Dr. Federico Graef Ziehl**

**Dr. Enric Pallás Sanz**

**Dr. David Alberto Rivas Camargo**



---

**Dr. José Gómez Valdés**  
Coordinador del Posgrado en Oceanografía Física

---

**Dr. Pedro Negrete Regagnon**  
Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Valeria Fernanda Quiroz Amoroso** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Oceanografía Física.

### **Respuesta de la circulación del Caribe mexicano al paso del huracán Wilma**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Julio Candela Pérez  
**Director de tesis**

En la región del Caribe mexicano es común el paso de ciclones tropicales, por lo que es importante el estudio de la respuesta del océano, para conocer en detalle los posibles efectos. El huracán Wilma ostenta el récord del huracán con la menor presión registrada que ha pasado por la región, alcanzando este récord de 882 hPa dos días antes de tocar tierra en la isla de Cozumel. La respuesta inmediata en el océano al paso de este ciclón fue un forzamiento directo debido a los fuertes vientos del huracán, un análisis de funciones empíricas ortogonales complejas (FEOCs) en nueve anclajes desplegadas a lo largo de la región del Caribe muestran que esta respuesta se caracterizó por una rotación ciclónica en los anclajes costeros ubicados más al norte de la región. Este mismo análisis mostró que aproximadamente dos días después del paso del huracán se presentó la respuesta libre, la cual se caracterizó por una rotación anticiclónica asociada a ondas, de la respuesta libre se observaron dos tipos de ondas. Una de ellas fue una onda casi inercial con características de dispersión hacia el fondo, como lo demuestra el análisis de energía cinética inercial ( $E_{ci}$ ), por otro lado, un análisis de envolvente también mostró una velocidad de grupo vertical  $C_{gz} \approx 0.17$  km/d con propagación hacia el fondo y una velocidad de fase vertical  $C_{fz} \approx 0.31$  km/d con propagación hacia la superficie, de acuerdo a las características de propagación vertical de  $C_{gz}$  y  $C_{fz}$  de este tipo de ondas, mientras que a través de la ecuación de dispersión de las ondas casi-inerciales se obtuvieron la velocidad de grupo horizontal  $C_{gH} \approx 48$  km/d y la longitud de onda horizontal  $\lambda_H \approx 113$  km. Por otro lado, un análisis de la serie de tiempo de temperatura y la transformada wavelet mostró la existencia de una onda atrapada a la costa, generada por el huracán, con una propagación hacia el sur (con la costa a la derecha) y una atenuación de la señal en anclajes ubicados en alta mar, presentando una velocidad de fase horizontal  $C_{fH} = 4.13$  m s<sup>-1</sup>.

**Palabras clave:** Huracán Wilma, Ondas casi inerciales, Ondas Atrapadas a la costa.

Abstract of the thesis presented by **Valeria Fernanda Quiroz Amoroso** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography

### **Response of mexican Caribbean to the passage of hurricane Wilma**

Abstract approved by:

---

Dr. Julio Candela Pérez  
**Thesis Director**

In the Mexican Caribbean region, the passage of tropical cyclones is common, so it is important to study the response of the ocean, to know in detail the possible effects. Hurricane Wilma holds the record for the hurricane with the lowest recorded pressure that has passed through the region, reaching this record of 882 hPa two days before making landfall on the island of Cozumel. The immediate response in the ocean to the passage of this cyclone was a direct forcing due to the strong winds of the hurricane, an analysis of complex orthogonal empirical functions (FEOCs) in nine mooring deployed throughout the Caribbean region shows that this response is characterized by a cyclonic rotation in the coastal anchorages located further north in the region. This same analysis showed that approximately two days after the passage of the hurricane, the free response occurred, which was characterized by an anticyclonic rotation associated with waves, from the free response two types of waves were observed. One of them was a quasi-inertial wave with bottom-scattering characteristics, as shown by inertial kinetic energy ( $E_{ci}$ ) analysis, on the other hand, an envelope analysis also showed a vertical group velocity  $C_{gz} \approx 0.17$  km/d with propagation towards the bottom and a vertical phase velocity  $C_{fz} \approx 0.31$  km/d with propagation towards the surface, according to the vertical propagation characteristics of  $C_{gz}$  and  $C_{fz}$  of this type of waves, while through the amount of scattering from the quasi-inertial waves, the horizontal group velocity  $C_{gH} \approx 48$  km/d and the horizontal wavelength  $\lambda_H \approx 113$  km were obtained. On the other hand, an analysis of the temperature time series and the wavelet transform showed the existence of a wave trapped on the coast, generated by the hurricane, with a propagation towards the south (with the coast to the right) and an attenuation of the signal in anchors located offshore, presenting a horizontal phase velocity  $C_{fH} = 4.13$  m s<sup>-1</sup>.

**Keywords: Huracane Wilma, Near – Inertial Wave, Costal Trapped Wave.**

## **Dedicatoria**

**A Rebeca y Antonio mis amores**

## Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California por la oportunidad y apoyo para estudiar la maestría en Oceanografía Física.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de postgrado No. De becario: 971771.

Al Dr. Julio Candela Pérez por su gran apoyo para la realización de este trabajo, sus consejos y no permitir que los ánimos decayeran. Además de los Dr. Enric Pallás, Dr. Federico Graef y Dr. David Rivas, por sus consejos y paciencia en cada reunión de comité

A los investigadores del centro por el amor que le tienen a la ciencia y la manera en que ponen todo de su parte para compartirnos un poco de este amor.

A mi madre, mis abuelos Blanca, Juan y Teresa, mi tía Elena y mis hermanos Napoleón, Norman y Said por todo su apoyo y por siempre estar para mí en las buenas y en las malas.

A mis amigos de la universidad que siempre estuvieron para mí en cada una de las etapas de la maestría Rubí, Hiram, Aldair, Vero, Miji, Bren, Andrés y Leonardo.

A mis compañeros de la maestría Gio, Citlali, Ashida, Ivan, Keiner y Fernanda por todo su apoyo no solo en las materias sino cuando Rebe venía en camino, los llevo en el corazón.

## Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas .....	xvi
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Caribe mexicano.....	1
1.2 Huracán Wilma.....	2
1.3 Antecedentes .....	3
1.4 Justificación e hipótesis.....	6
1.5 Objetivos .....	7
1.5.1 Objetivo general.....	7
1.5.2 Objetivos específicos.....	7
<b>Capítulo 2. Metodología.....</b>	<b>8</b>
2.1 Datos .....	8
2.2 Funciones Empíricas Ortogonales Complejas .....	9
2.3 Análisis Wavelet .....	11
<b>Capítulo 3. Resultados .....</b>	<b>13</b>
3.1 Análisis de series de tiempo de corriente y temperatura.....	13
3.1.1 Análisis de serie de tiempo de corriente.....	13
3.1.2 Corriente filtrada con un pasa banda entre 28 y 48 horas .....	18
3.1.3 Análisis de series de tiempo de temperatura .....	21
3.2 Análisis de Funciones Empíricas Ortogonales Complejas (FEOCs).....	23
3.3 Análisis Wavelets.....	34
3.4 Energía cinética de ondas casi-inerciales.....	36
3.5 Propagación de ondas casi-inerciales .....	38
<b>Capítulo 4. Discusión.....</b>	<b>42</b>

<b>Capítulo 5. Conclusiones .....</b>	<b>46</b>
<b>Literatura citada .....</b>	<b>48</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>50</b>

## Lista de figuras

Figura	Página
1. Circulación media a lo largo del Caribe mexicano obtenida con la configuración CLIPPER ATL6 del modelo francés OPA, que muestra las corrientes de Caimán y Yucatán. Los vectores representan una circulación superficial media de 5 años. Tomado de: Cetina et al., (2006).....	1
2. En las gráficas se muestra a) la trayectoria del huracán Wilma del 15 de octubre a las 18 UTC al 25 de octubre a las 00 UTC del 2005 los puntos van cada 06 UTC, la ubicación de los anclajes a lo largo del Caribe mexicano (puntos rojos) y la presión mínima alcanzada por el huracán Wilma el 19 de octubre a las 12 UTC (círculo azul), y b) acercamiento a la región del Caribe mexicano donde se muestra la trayectoria de Wilma y la disposición de los anclajes sobre la región.....	3
3. Vista satelital del huracán Wilma el día 21/octubre/2005 frente a la Isla de Cozumel. Tocó tierra horas más tarde causando 4 muertes indirectas y daños económicos de aproximadamente 60000 millones de dólares (modificado de NOAA: <a href="https://www.ospo.noaa.gov/Organization/History/imagery/Wilma/index.html">https://www.ospo.noaa.gov/Organization/History/imagery/Wilma/index.html</a> ).....	4
4. Pronóstico de Contenido de Calor del Océano (CCO) (escala de colores superior) durante el huracán Wilma. El contorno negro grueso representa el CCO de 60 kJ/cm <sup>2</sup> . Las velocidades de la corriente pronosticada se representan con las flechas negras para z= -1 a -60 m de profundidad. La trayectoria de Wilma se muestra coloreada con sus velocidades máximas sostenidas del viento (escala de colores en la parte inferior izquierda). Tomada de: Oey et al. (2006).....	5
5. Distribución de los nueve anclajes.....	8
6. Series de tiempo de la corriente alrededor de 100 m de profundidad de los nueve anclajes (PM, TU, PP, CH, BB, PME, CZE TUE Y CHE), la línea punteada roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en la mayoría de los anclajes que fue el 21 de octubre de 2005.....	15
7. Series de tiempo de la corriente (m/s) en la parte superior de la columna de agua (-21 m a -117 m) y la corriente medida cerca del fondo (434 m) en el anclaje PM. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje, en este caso el 22 de octubre de 2005.....	15
8. Serie de tiempo de la componente a) norte (v) y b) este (u) de la corriente medidas a 60 m de profundidad entre el 2002 y 2018 por anclajes en PM en distintos periodos.....	16
9. Series de tiempo de la corriente (m/s) en la parte superior de la columna de agua (-75 m a -163 m) para CZE durante el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.....	16
10. Series de tiempo de la corriente (m/s) en la parte superior de la columna de agua (-90 m a -290 m) y cerca del fondo (-711 m) para CH durante el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.....	17

11.	Series de tiempo de la corriente cercana al fondo medida en PM, TU, CH y BB, la línea punteada roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje, en la mayoría de los anclajes que fue el 21 de octubre de 2005...	17
12.	Series de tiempo de la corriente alrededor de 100 m de profundidad de los nueve anclajes (PM, TU, PP, CH, BB, PME, CZE TUE Y CHE) filtradas con un filtro pasa-banda que aísla señales entre 28 y 48 horas, la línea punteada roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en la mayoría de los anclajes que fue el 21 de octubre de 2005.....	19
13.	Series de tiempo filtradas entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) en la parte superior de la columna de agua y cerca del fondo (-21 m a -117 m y -434 m) para PM durante el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 22 de octubre de 2005.....	19
14.	Series de tiempo filtradas entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) en la parte superior de la columna de agua (-75 m a -163 m) para CZE durante el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.....	20
15.	Series de tiempo filtradas entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) en la parte superior de la columna de agua y cerca del fondo (-90 m a -290 m y -711 m) para CH durante el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.....	20
16.	Series de tiempo de la corriente cerca del fondo, filtrada con un filtro pasa-banda entre 24 y 48 horas, en PM, TU, CH y BB, la línea punteada roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje, en la mayoría de los anclajes que fue el 21 de octubre de 2005.....	21
17.	Series de tiempo de temperatura (°C) del periodo 17 de octubre a 07 de noviembre de 2005 para los nueve anclajes señalados con su abreviatura. La línea discontinua roja señala el día en que el huracán estuvo más cerca del anclaje y el recuadro rojo marca los anclajes que quedaron a la derecha de la trayectoria.....	22
18.	Serie filtrada con un filtro pasa-banda entre 28 y 48 horas para los anclajes cercanos a la costa que son de norte a sur PM, TU, PP, CH y BB. La línea punteada roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el huracán y los anclajes de TU, PP, CH y BB el 21 de octubre de 2005.....	23
19.	Serie filtrada con un filtro pasa-banda entre 3 y 8 días para los anclajes cercanos a la costa que son de norte a sur PM, TU, PP, CH y BB. La línea punteada roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el huracán y los anclajes de TU, PP, CH y BB el 21 de octubre de 2005.....	23
20.	Compuesto o promedio del modo 1 para PM9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a -180°, -90°, 0° y 90°. Este compuesto en PM nos muestra una rotación ciclónica.....	25
21.	Patrón del modo 1 de FEOCs para PM9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.....	26

22.	Compuesto o promedio del modo 2 para PM9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a $-180^\circ$ , $-90^\circ$ , $0^\circ$ y $90^\circ$ . Este compuesto en PM9 nos muestra una rotación anticiclónica.....	26
23.	Patrón del modo 2 de FEOCs para PM9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.....	27
24.	Compuesto o promedio del modo 1 para PME que corresponden a valores específicos de la fase temporal a $-180^\circ$ , $-90^\circ$ , $0^\circ$ y $90^\circ$ . Este compuesto en PME nos muestra una rotación anticiclónica.....	27
25.	Patrón del modo 2 de FEOCs para PMEs y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.....	28
26.	Compuesto o promedio del modo 1 para PMEs que corresponden a valores específicos de la fase temporal a $-180^\circ$ , $-90^\circ$ , $0^\circ$ y $90^\circ$ . Este compuesto en PM9 nos muestra una rotación anticiclónica.....	29
27.	Patrón del modo 1 de FEOCs para PMEs y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.....	30
28.	Grafica de la distancia mínima al huracán contra el tiempo de respuesta máxima, con un ajuste lineal para a) la respuesta Forzada y b) la respuesta libre.....	31
29.	Gráfica de la distancia mínima alcanzada contra la varianza explicada por cada modo en la respuesta forzada (rojo) y la respuesta libre (verde).....	31
30.	Transformada Wavelet de la serie de tiempo de temperatura en PM a $-129$ m y PME a $-554$ m para el periodo septiembre de 2004 a diciembre de 2005. La barra de colores es la potencia relativa, las líneas de contorno negro indican el 95% de significancia, las líneas blancas en los extremos indican el intervalo de confianza del 95% y la línea punteada negra vertical indica la fecha en la que paso el huracán Wilma sobre el Caribe mexicano.....	34
31.	Transformadas wavelets de la corriente a $\sim 100$ m de profundidad para anclajes costeros (izquierda) y anclajes alejados de la costa (derecha) del periodo 01 septiembre de 2005 a 20 de diciembre de 2005. La línea punteada negra indica la fecha en que se dio la distancia mínima entre los anclajes y el ojo del huracán Wilma, las líneas negras indican el 95 % de significancia y las líneas blancas el intervalo de confianza del 95%.....	35
32.	Transformadas wavelets de la temperatura a diferente profundidad para anclajes costeros (izquierda) y anclajes en alta mar (derecha) del periodo 01 septiembre de 2005 a 20 de diciembre de 2005. La línea punteada negra indica la fecha en que se dio la distancia mínima entre los anclajes y el ojo del huracán Wilma, las líneas	

	negras indican el intervalo de 95% de significancia y las líneas blancas el intervalo de confianza del 95%.....	36
33.	Energía Cinética casi inercial ( $E_c$ ) de los 9 anclajes a la derecha se encuentran los anclajes ubicados en el exterior y la izquierda los anclajes más cercanos a la costa, PM y PME son anclajes que se encuentran a la derecha de la trayectoria. La línea negra punteada indica la fecha en que se dio la distancia mínima entre el huracán y cada uno de los anclajes.....	37
34.	Envolvente de la componente v de la corriente en PM9 filtrada por paso-banda de 24 a 48 horas en función de la profundidad de -100 m a -540 m. Donde r es el coeficiente de correlación.....	39
35.	Envolvente de la componente v de la corriente en TUE9 filtrada por paso-banda de 24 a 48 horas en función de la profundidad de -61 m a -501 m. Donde r es el coeficiente de correlación.....	39
36.	Envolvente de la componente v de la corriente en CHE9 filtrada por paso-banda de 24 a 48 horas en función de la profundidad de -28 m a -108 m. Donde r es el coeficiente de correlación.....	40
37.	Nivel del mar absoluto (colores) y corriente geostrófica (vectores) para diferentes fechas entre el 15 octubre y 12 de diciembre, donde se muestra la evolución temporal de un remolino ciclónico ubicado al sur oeste de la Península de Yucatán, basados en la base de datos de AVISO. Los puntos rojos indican la ubicación de los 9 anclajes, la línea magenta la trayectoria del huracán y el círculo rosa, el radio de vientos máximos de 32 km del huracán Wilma.....	44
38.	Transformadas wavelets de la temperatura a diferente profundidad para anclajes costeros (izquierda) y anclajes en alta mar (derecha) del periodo septiembre de 2005 a diciembre de 2005. Las líneas negras indican el intervalo de 5% de confianza y las líneas blancas el 95% de confianza. La línea punteada negra indica el 21 de octubre de 2005 fecha en la que Wilma toco tierra en Cozumel como huracán categoría 4, la línea punteada magenta indica el 03 de octubre de 2005 fecha en la que Stan tocó tierra al sur de Cozumel como tormenta tropical y la línea punteada verde indica el 19 de julio de 2005 fecha en la que el huracán Emily tocó tierra en Playa de Carmen como huracán categoría 4.....	45
39.	Series de tiempo de la corriente (m/s) en la parte superior de la columna de agua (-100 m a -540 m) en el anclaje PME9s. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 22 de octubre de 2005.....	51
40.	Series de tiempo de la corriente (m/s) profunda (-1091 m a -1147 m) en PME para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.....	51
41.	Series de tiempo de la corriente (m/s) en la parte superior de la columna de agua (-61 m a -501 m) y profunda (-1221 m) en TUE para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.....	52
42.	Series de tiempo de la corriente (m/s) (-28 m a -108 m) en CHE para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la	

	distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.....	52
43.	Series de tiempo de la corriente (m/s) (-27 m a -115 m y a -530 m) en TU para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.....	52
44.	Series de tiempo de la corriente (m/s) (-22 m a -118 m) en PP para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.....	52
45.	Series de tiempo de la corriente (m/s) (-29 m a -117 m y a -793 m) en BB para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.....	52
46.	Series de tiempo filtradas con un filtro pasa-banda entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) medida por el ADCP (-100 m a -540 m) en PME para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.....	52
47.	Series de tiempo filtradas con un filtro pasa-banda entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) medida por el ADCP (-61 m a -1221 m) en TU para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.....	52
48.	Series de tiempo filtradas con un filtro pasa-banda entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) medida por el ADCP (-28 m a -108 m) en CHE para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.....	52
49.	Series de tiempo filtradas con un pasa-banda entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) medida por el ADCP (-61 m a -501 m, y a -1221 m) para TUE9 para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.....	52
50.	Series de tiempo filtradas con un filtro pasa-banda entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) medida por el ADCP (-22 m a -118 m) en PP para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.....	52
51.	Series de tiempo filtradas con un frltro pasa-banda entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) medida por el ADCP (-29 m a -117 m, y a - 793 m) en BB para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.....	52

52.	Compuesto o promedio del modo 1 para la respuesta forzada en CZE9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a $-180^\circ$ , $-90^\circ$ , $0^\circ$ y $90^\circ$ . Este compuesto en CZE9 nos muestra una rotación ciclónica.....	52
53.	Patrón del modo 1 de FEOCs para CZE9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.....	52
54.	Compuesto o promedio del modo 2 para la respuesta forzada en TU9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a $180^\circ$ , $-90^\circ$ , $0^\circ$ y $90^\circ$ . Este compuesto en TU9 nos muestra una rotación ciclónica.....	52
55.	Patrón del modo 1 de FEOCs para TU9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.....	52
56.	Compuesto o promedio del modo 2 para la respuesta forzada en TUE9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a $180^\circ$ , $-90^\circ$ , $0^\circ$ y $90^\circ$ . Este compuesto en TUE9 nos muestra una rotación anticiclónica.....	52
57.	Patrón del modo 1 de FEOCs para TUE9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.....	52
58.	Compuesto o promedio del modo 2 para la respuesta forzada en PP9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a $180^\circ$ , $-90^\circ$ , $0^\circ$ y $90^\circ$ . Este compuesto en PP9 nos muestra una rotación ciclónica.....	52
59.	Patrón del modo 1 de FEOCs para PP9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.....	52
60.	Compuesto o promedio del modo 2 para la respuesta forzada en CH9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a $180^\circ$ , $-90^\circ$ , $0^\circ$ y $90^\circ$ . Este compuesto en CH9 nos muestra una rotación anticiclónica.....	52
61.	Patrón del modo 1 de FEOCs para CH9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.....	52
62.	Compuesto o promedio del modo 2 para la respuesta forzada en CHE9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a $180^\circ$ , $-90^\circ$ , $0^\circ$ y $90^\circ$ . Este compuesto en CHE9 nos muestra una rotación anticiclónica.....	52
63.	Patrón del modo 1 de FEOCs para CHE9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s	

	(azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.....	52
64.	Compuesto o promedio del modo 2 para la respuesta forzada en CZE9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a 180°, -90°, 0° y 90°. Este compuesto en CZE9 nos muestra una rotación anticiclónica.....	52
65.	Patrón del modo 2 de FEOCs para CZE9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.....	52
66.	Compuesto o promedio del modo 1 para la respuesta de relajación en TUE9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a 180°, -90°, 0° y 90°. Este compuesto en TUE9 nos muestra una rotación anticiclónica.....	52
67.	Patrón del modo 1 de FEOCs para TUE9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.....	52
68.	Compuesto o promedio del modo 1 para la respuesta de relajación en TU9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a 180°, -90°, 0° y 90°. Este compuesto en TU9 nos muestra una rotación anticiclónica.....	52
69.	Patrón del modo 1 de FEOCs para TU9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.....	52
70.	Compuesto o promedio del modo 1 para la respuesta de relajación en PP9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a 180°, -90°, 0° y 90°. Este compuesto en PP9 nos muestra una rotación anticiclónica.....	52
71.	Patrón del modo 1 de FEOCs para PP9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.....	52
72.	Compuesto o promedio del modo 1 para la respuesta de relajación en CHE9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a 180°, -90°, 0° y 90°. Este compuesto en CHE9 nos muestra una rotación anticiclónica.....	52
73.	Patrón del modo 1 de FEOCs para CHE9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.....	52
74.	Compuesto o promedio del modo 1 para la respuesta de relajación en CH9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a 180°, -90°, 0° y 90°. Este compuesto en CH9 nos muestra una rotación anticiclónica.....	52
75.	Patrón del modo 1 de FEOCs para CH9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.....	52

76. Compuesto o promedio del modo 1 para la respuesta de relajación en BB9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a  $180^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Este compuesto en BB9 nos muestra una rotación anticiclónica..... 52
77. Patrón del modo 1 de FEOCs para BB9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo..... 52
78. Compuesto o promedio del modo 2 para la respuesta de relajación en BB9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a  $180^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Este compuesto en BB9 nos muestra una rotación anticiclónica..... 52
79. Patrón del modo 2 de FEOCs para BB9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo..... 52

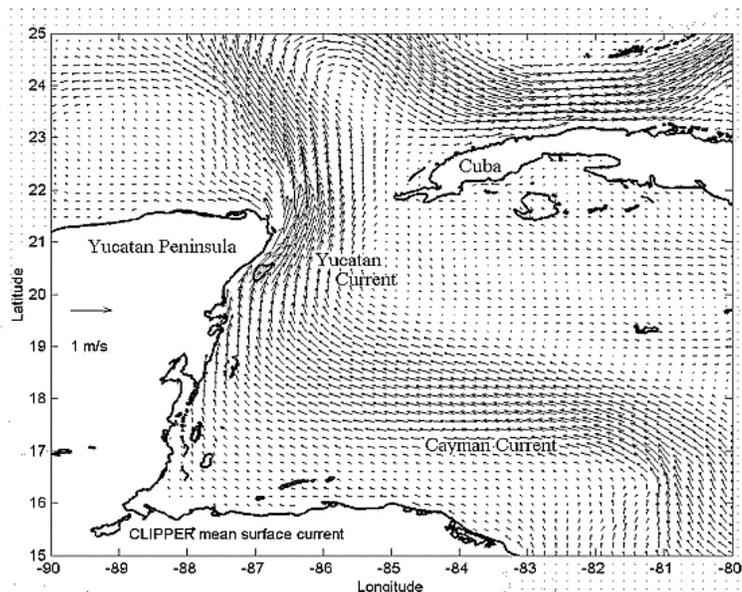
## Lista de tablas

Tabla	Página
1. Localización de los nueve anclajes de la campaña CANEK en 2004. La localización de los anclajes con ADCP de norte a sur son: Puerto Morelos (PM), Puerto Morelos Exterior (PME), Cozumel Exterior (CZE), Tulum (TU), Tulum Exterior (TUE), Punta Pájaros (PP), Chinchorro (CH), Chinchorro Exterior (CHE) y Boca Bacalar (BB).....	9
2. Descripción del modo que representa la respuesta forzada en los nueve anclajes, incluyendo la fecha en que se dio la respuesta máxima. Los anclajes marcados en gris quedaron a la derecha de la trayectoria. Donde PME9i corresponde a mediciones de un ADCP instalado a 1159 m de profundidad.....	24
3. Descripción del modo que representa la respuesta forzada en los nueve anclajes, incluyendo la fecha en que se dio la respuesta máxima. Los anclajes marcados en gris quedaron a la derecha de la trayectoria. Donde PME9i corresponde a mediciones de un ADCP instalado a 1159 m de profundidad.....	28
4. Periodos y frecuencias de los de los modos complejos en los anclajes tanto en la respuesta forzada como en la respuesta libre. Donde $T_i$ es el periodo inercial, $f_i$ es la frecuencia inercial, $T$ es el periodo del modo, $f_e$ es la frecuencia efectiva del modo y $t_m$ el tiempo en que se dio la repuesta máxima.....	32

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 Caribe mexicano

El mar Caribe se ubica al sureste del Golfo de México y al oeste del océano Atlántico, entre las latitudes 9° y 22° N y las longitudes 89° y 60° O. Sus límites según la Organización Hidrográfica Internacional (IHO, por sus siglas en inglés), son el Canal de Yucatán; entre la península del mismo nombre y Cuba; el paso de los vientos; entre Cuba y República Dominicana; y las Antillas Menores. Además, se comunica con el océano Pacífico a través del canal de Panamá. El mar también limita con 12 países continentales y 22 territorios insulares, que conforman la llamada región del Caribe. La profundidad promedio del mar es de 2200 m, siendo el punto más profundo la Fosa Caimán (7686 m), la superficie total del mar Caribe es de 2.755 millones de km<sup>2</sup>, siendo el tercer mar más grande del mundo.



**Figura 1** Circulación media a lo largo del Caribe mexicano obtenida con la configuración CLIPPER ATL6 del modelo francés OPA, que muestra las corrientes de Caimán y Yucatán. Los vectores representan una circulación superficial media de 5 años. Tomado de: Cetina et al., (2006).

El Caribe mexicano es una de las subregiones que conforman el mar Caribe, es una importante zona turística para el país, por el color turquesa del agua y la exuberante vegetación característica de esta región. En esta zona (noroccidente) la corriente del Caribe (que es una corriente superficial de agua cálida

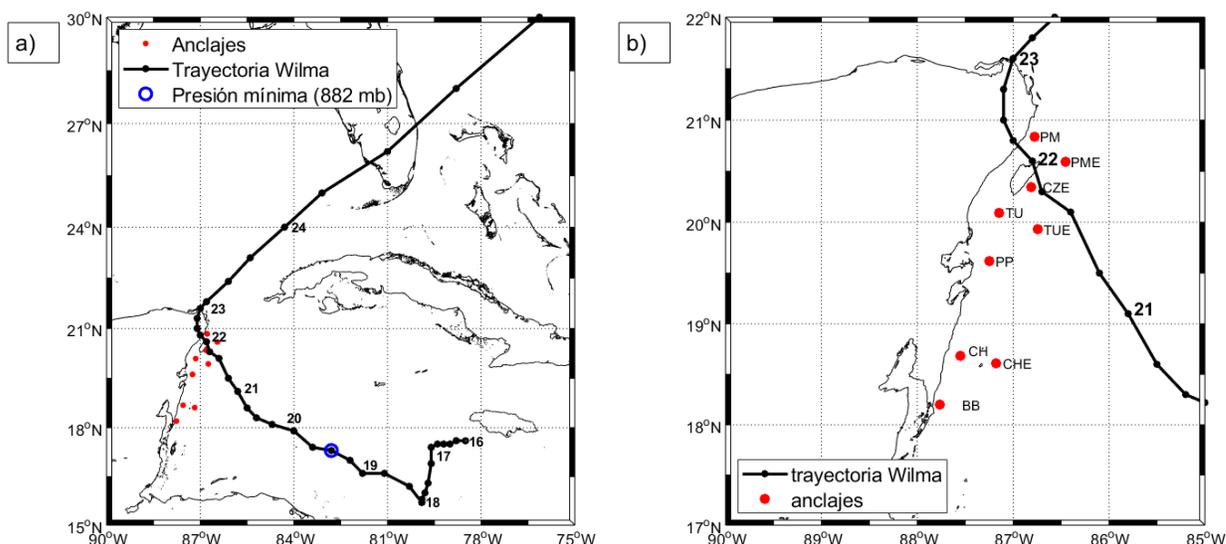
que se deriva de la unión de la corriente ecuatorial del norte y la de Guyana) se convierte en la corriente de Yucatán, que juega un papel importante en la circulación del sistema Mar Caribe – Golfo de México; es una de las corrientes de frontera occidental más intensa (Fig. 1), tiene un velocidad media de 1.5 m/s, alcanza magnitudes de 3 m/s y aporta la mayor parte del transporte del Mar Caribe hacia el Golfo de México, siendo este de  $23 \text{ Sv} \pm 1 \text{ Sv}$  (para un intervalo de confianza del 95%) (Ochoa et al., 2001; Sheinbaum et al., 2002).

Además, Cetina et al. (2006) encontraron que las corrientes en la parte norte de la región tienen una dirección predominante hacia el noreste a lo largo de la costa y tienden a aumentar de velocidad, alcanzando hasta 2.4 m/s al norte de Cozumel. Mientras que, en Banco Chinchorro existen periodos de ~ una semana en los que el flujo se invierte hacia el sur. También encontraron que la dinámica de la región está fuertemente influenciada por el paso de remolinos, que tienen un periodo de alrededor de 3 meses, y que el flujo sobre los canales de Cozumel y Banco Chinchorro se encuentra en balance geostrófico la mayor parte del tiempo, presentando periodos de ageostrofia asociada a un término advectivo relacionado con el paso de estos remolinos.

## 1.2 Huracán Wilma

El huracán Wilma (Fig. 2) fue el vigésimo primero de la temporada de huracanes del 2005 en la cuenca del Atlántico (fue la segunda temporada más activa en la historia registrada, detrás de la temporada de 2020). Se formó el 14 de octubre al suroeste de Jamaica como un disturbio tropical, para el 15 de octubre la circulación se definió mejor y se le designó la categoría de depresión tropical, se movió lenta y erráticamente hacia el sur-suroeste durante los siguientes dos días, alcanzando la categoría de tormenta tropical el 17 de octubre por la madrugada.

El 18 de octubre viró hacia el oeste-noroeste y se convirtió en huracán, tuvo un crecimiento exponencial y en tan solo 24 horas alcanzó la categoría 5 en la escala de huracanes de Saffir-Simpson, un evento sin precedentes en la cuenca del Atlántico. Durante este episodio el ojo del huracán se contrajo a un diámetro de 3.704 km; siendo el ojo más pequeño medido por el Centro Nacional de Huracanes (NHC, por sus siglas en inglés) hasta esa fecha. Además, la presión central mínima estimada en el momento de máxima intensidad fue de 882 hPa (es posible que la presión mínima real haya sido inferior a este valor), que es un récord histórico hasta la fecha en la cuenca del Atlántico.



**Figura 2** En las gráficas se muestra a) la trayectoria del huracán Wilma del 15 de octubre a las 18 UTC al 25 de octubre a las 00 UTC del 2005 los puntos van cada 06 UTC, la ubicación de los anclajes a lo largo del Caribe mexicano (puntos rojos) y la presión mínima alcanzada por el huracán Wilma el 19 de octubre a las 12 UTC (círculo azul), y b) acercamiento a la región del Caribe mexicano donde se muestra la trayectoria de Wilma y la disposición de los anclajes sobre la región.

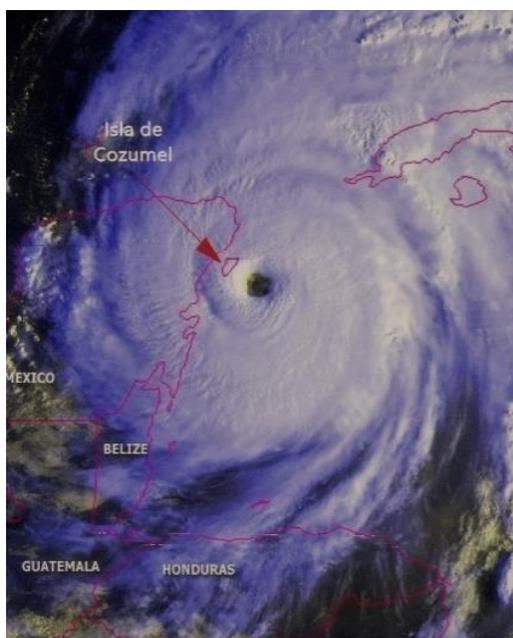
Wilma mantuvo la categoría 5 hasta el 20 de octubre, para el 21 de octubre cambio su trayectoria hacia el noroeste (apuntando hacia la Península de Yucatán) y se volvió huracán categoría 4, ese mismo día por la tarde Wilma tocó tierra en la Isla de Cozumel y seis horas después cruzó la costa de la Península de Yucatán (Fig. 3), volviendo a tocar tierra al sur de Playa del Carmen. Un sistema de alta presión atmosférica al norte detuvo al huracán en esta zona hasta el 22 de octubre cuando la zona de alta presión se disipó y el huracán comenzó a moverse lentamente hacia el norte, causando daños severos en el noreste de la Península de Yucatán. Wilma se internó en el Golfo de México el 23 de octubre por la madrugada como huracán categoría 2 y continuó su trayectoria hacia la Península de Florida.

### 1.3 Antecedentes

Debido a los efectos que generan sobre el océano los ciclones tropicales, sobre todo aquellos que alcanzan la categoría de huracán o huracán mayor, se han realizado distintas investigaciones utilizando datos observados (ya sea de anclajes que se encontraban en el sitio durante el paso del huracán o con perfiladores colocados horas o días antes de su paso) o modelos numéricos. Para describir las distintas respuestas del océano al paso de estas intensas tormentas generalmente se divide la respuesta del océano en dos etapas. La primera es la etapa forzada que ocurre cuando el océano es influenciado directamente

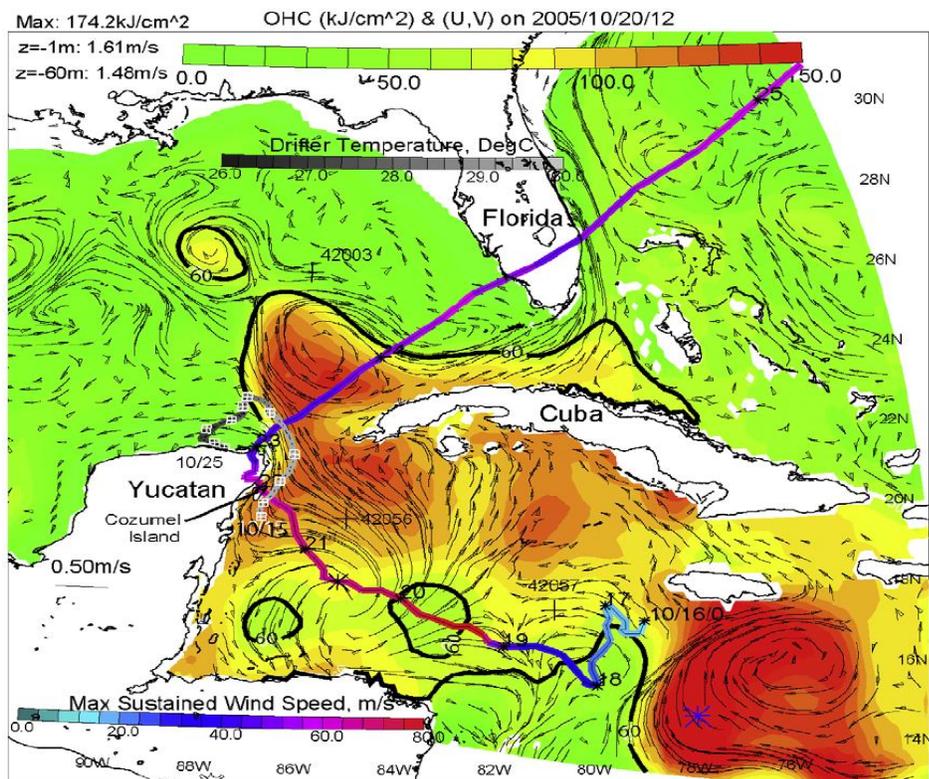
por el fuerte esfuerzo del viento del huracán, se trata de una respuesta local (dependiente del tiempo y la profundidad) y su escala temporal es el tiempo que dure la tormenta en el sitio. La segunda etapa es la de relajación o libre que es baroclínica y no-local (tridimensional y dependiente del tiempo) se genera después del paso de la tormenta y tiene una escala de tiempo de 5 -10 días (Price et al (1993)).

Una de las respuestas al paso de un huracán en el océano, es la disminución de la temperatura superficial del mar (TSM, a partir de ahora) que se genera durante la etapa forzada debido a la mezcla vertical generada por el esfuerzo del viento que trae agua más profunda y fría a la superficie, además, se observa un máximo de la respuesta de la TSM a la derecha de la trayectoria del huracán, así como la respuesta de la corriente y la energía, debido a la asimetría del huracán (ubicando siempre los vientos máximos a la derecha del huracán tomando como referencia su trayectoria). Estas características de la respuesta de la TSM al paso de un huracán se observaron en modelos numéricos y datos obtenidos de perfiladores y anclajes (Sandford et al. 1987 y 2010, Price et al. 1993 y Price 1980). También, como parte de la respuesta de la etapa forzada se observa un flujo medio que tiene una circulación ciclónica, debida a un remolino ciclónico que es amplificado durante la etapa forzada y que genera una asimetría entre los lados del ciclón (Pallàs et al. 2016a).



**Figura 3** Vista satelital del huracán Wilma el día 21/octubre/2005 frente a la Isla de Cozumel. Tocó tierra horas más tarde causando 4 muertes indirectas y daños económicos de aproximadamente 60000 millones de dólares (modificado de NOAA: <https://www.ospo.noaa.gov/Organization/History/imagery/Wilma/index.html>).

Una respuesta importante de la etapa de relajación es la generación de oscilaciones casi-inerciales en mar abierto y oscilaciones sub-inerciales en la plataforma que finalmente rompen y mezclan el océano. Pallás et al. (2016a) analizaron la estela de onda casi-inerciales generadas por el paso del huracán Ida (2009) sobre el Golfo de México, encontraron que las oscilaciones casi-inerciales de longitud de onda vertical de 850 – 1280 m generadas se propagan hacia el norte y hacia abajo penetrando muy por debajo de la termoclina, y se encuentran a la derecha de la trayectoria. También Pallàs et al., (2016b) analizaron el atrapamiento de ondas tras el paso de dos huracanes consecutivos sobre la base la Corriente de Lazo (Gustav e Ike en 2008) a partir de observaciones y un modelo numérico, encontraron que la energía casi-inercial y la cizalladura vertical incrementaron en un factor de  $\sim 2$  debido a la interacción onda a onda casi-inercial y onda – flujo medio. Por otro lado, Pearce (2011) utilizó 31 anclajes distribuidos a lo largo de la plataforma de Texas para estudiar la formación de oscilaciones sub-inerciales (periodo  $> 2$  días), encontró que después del paso del huracán se formó una onda atrapada a la costa con un periodo de dos a cuatro días que se propagó hacia el oeste a una velocidad de 6 m/s y que esta señal se detectó muy al sur.



**Figura 4** Pronóstico de Contenido de Calor del Océano (CCO) (escala de colores superior) durante el huracán Wilma. El contorno negro grueso representa el CCO de 60 kJ/cm<sup>2</sup>. Las velocidades de la corriente pronosticada se representan con las flechas negras para z= -1 a -60 m de profundidad. La trayectoria de Wilma se muestra coloreada con sus velocidades máximas sostenidas del viento (escala de colores en la parte inferior izquierda). Tomada de: Oey et al. (2006).

También se ha descrito el efecto de los huracanes sobre el mar de manera teórica utilizando modelos numéricos o analíticos, Kuo y Ichiye (1977) analizaron la respuesta de un océano barotrópico a un huracán en movimiento utilizando un modelo numérico para un océano rectangular de profundidad constante con una costa al oeste. Observaron que se genera un giro elongado de la corriente en balance geostrófico a la mitad del océano después del paso del huracán, y un fuerte transporte hacia el sur cerca de la costa oeste como una onda atrapada a la plataforma. Además, Lu et al. (2010) utilizaron un modelo analítico que proporciona una teoría de la respuesta de un océano estratificado a un huracán en movimiento. Encontraron que la estructura de la circulación oceánica inducida por el huracán es un remolino bastante similar al del huracán en la atmósfera. Además, el paso del huracán en mar abierto genera muchos procesos, incluyendo la excitación de ondas casi-inerciales.

## 1.4 Justificación e hipótesis

Como ya se mencionó anteriormente, el paso de huracanes sobre el océano genera diferentes respuestas que pueden afectar las zonas costeras, dañar estructuras construidas en alta mar como las plataformas petroleras, e interrumpir actividades económicas como la pesca, el turismo, la actividad portuaria y la acuicultura causando importantes pérdidas económicas. Conocer y describir la respuesta del océano a un huracán mayor como es el caso de Wilma puede ayudar a la prevención y mitigación de daños futuros tras el paso de estas intensas tormentas por la región del Caribe mexicano. El paso de Wilma sobre el Caribe mexicano causó la muerte de 4 personas, y grandes daños estructurales en zonas turísticas y urbanas de Cozumel, Isla Mujeres, la Riviera Maya y Cancún, así como pérdida de territorio costero por la entrada de agua de mar, que derivaron en pérdidas económicas por ~ 60 millones de dólares principalmente debido a que durante varios meses el turismo paró (en diciembre esta región suele ser uno de los principales destinos turísticos de canadienses y estadounidenses) (Pasch et al. (2005).

Como es sabido el paso de huracanes genera dos tipos de respuestas: la etapa forzada y la etapa de relajación, en el caso del huracán Wilma la respuesta forzada se observa en aquellos anclajes cercanos a la trayectoria del huracán y es una respuesta inmediata al paso de Wilma sobre los anclajes. La respuesta libre se divide en una respuesta en forma de onda casi-inercial en los anclajes que se encuentran en mar abierto, y otra de frecuencia subinercial que se observa en los anclajes más cercanos a la costa y se extiende desde Puerto Morelos hasta Boca Bacalar.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo general**

Aplicando distintos métodos estadísticos y matemáticos a series de tiempo de velocidad de la corriente y temperatura obtenidas de nueve anclajes desplegados a lo largo del Caribe Mexicano, describir los tipos de respuesta del océano el paso del huracán Wilma sobre la región.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Analizar las series de tiempo de velocidad de la corriente y temperatura utilizando diferentes métodos estadísticos, e identificar las posibles respuestas del océano durante y después del paso del ciclón tropical sobre la región del Caribe Mexicano.
- Identificar patrones en la respuesta del océano aplicando el método de Funciones Empíricas Ortogonales Complejas (FEOCs) a las series de tiempo de los perfiles verticales de la velocidad de la corriente.
- Realizar una descripción del efecto inmediato del paso de Wilma sobre los anclajes.
- Describir las frecuencias observadas tras el paso de Wilma utilizando el análisis Wavelet.

## Capítulo 2. Metodología

### 2.1 Datos

Durante la campaña de CANEK de 2004 se instalaron nueve anclajes a lo largo de la costa del Caribe mexicano equipados con perfiladores acústicos (ADCP's) y correntímetros puntuales midiendo corriente y temperatura a diferentes profundidades, a partir de estos anclajes se obtuvieron datos horarios únicos de la velocidad de la corriente y de temperatura correspondientes al periodo septiembre de 2004 – abril de 2006, en la figura 5 se muestra la ubicación de los anclajes y en la tabla 1 sus características. Este periodo abarca la temporada de huracanes de 2005 la segunda temporada más activa después de 2020 (en todo el periodo de registro de 1950 a la fecha), dentro de esta temporada se generó Wilma, que es el huracán más intenso que ha azotado la costa del Caribe mexicano hasta la fecha.

Se escogió un periodo que va del 01 de septiembre al 22 de diciembre de 2005, para analizar la velocidad de la corriente y la temperatura antes del paso de Wilma sobre el Caribe mexicano, la respuesta de ambas variables a su paso y el después del paso del huracán.

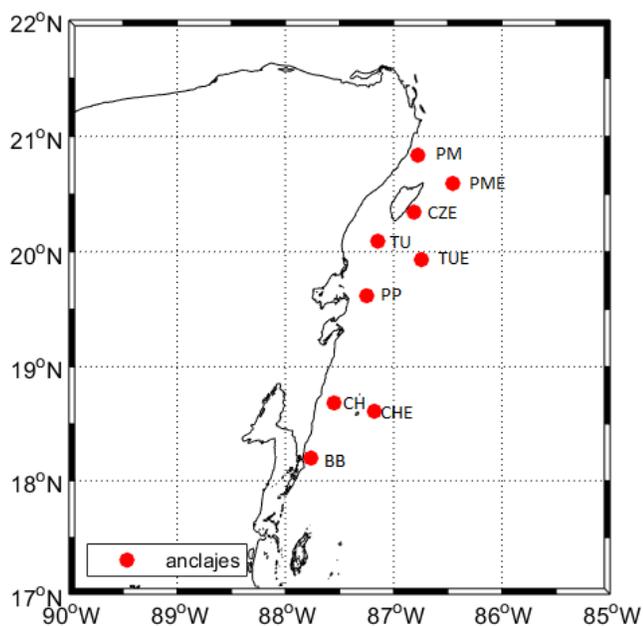


Figura 5 Distribución de los nueve anclajes

**Tabla 1** Localización de los nueve anclajes de la campaña CANEK en 2004. La localización de los anclajes con ADCP de norte a sur son: Puerto Morelos (PM), Puerto Morelos Exterior (PME), Cozumel Exterior (CZE), Tulum (TU), Tulum Exterior (TUE), Punta Pájaros (PP), Chinchorro (CH), Chinchorro Exterior (CHE) y Boca Bacalar (BB).

Anclaje	Lon (°)	Lat (°)	Profundidad máxima (m)	Profundidad del ADCP (m)	Profundidad del correntímetro puntual (m)
Puerto Morelos (PM)	-86.7765	20.8371	444	129	434
Puerto Morelos Exterior (PME)	-86.4535	20.5928	1170	554 1159	
Cozumel Exterior (CZE)	-86.8119	20.3444	587	175	
Tulum (TU)	-87.1465	20.0924	540	130	530
Tulum Exterior (TUE)	-86.7433	19.9324	1231	515	1221
Punta Pájaros (PP)	-87.2487	19.6185	1077	130	1067
Chinchorro (CH)	-87.6836	18.6836	723	307	711
Chinchorro Exterior (CHE)	-87.1783	18.6095	620	121	
<i>Boca Bacalar (BB).</i>	-87.7649	18.2002	803	133	793

## 2.2 Funciones Empíricas Ortogonales Complejas

El análisis de Funciones Empíricas Ortogonales Complejas (FEOCs) permite detectar eficientemente características de propagación dentro de un conjunto de datos (especialmente cuando están distribuidos en varias frecuencias), además, es un método fácil de aplicar. El método consiste en crear series de tiempo complejas añadiendo a las series de tiempo originales su transformada de Hilbert como la parte compleja, y a partir de esta nueva serie de tiempo imaginaria calcular los eigenvectores complejos, relacionados con la matriz de covarianza o correlación de las series complejas.

Siguiendo el método de Venegas (2001), primero se considera la serie de tiempo original (antes se elimina la media y se normaliza) como  $\varphi_m(t)$ , donde  $m = 1, \dots, M$  son las ubicaciones y  $t = 1, \dots, N$  es el paso del tiempo. Se procede a hacer esta serie de tiempo compleja añadiéndole su transformada de Hilbert  $\varphi_m^c(t)$  como su parte imaginaria:

$$\phi_m(t) = \varphi_m(t) + i\varphi_m^c(t) \quad (1)$$

La representación de Fourier de  $\varphi_m(t)$  es:

$$\varphi_m(t) = \sum a_m(\omega) \cos \omega t + b_m(\omega) \text{sen } \omega t \quad (2)$$

y la transformada de Hilbert de  $\varphi_m^c(t)$  es

$$\varphi_m^c(t) = \sum b_m(\omega) \sin \omega t - a_m(\omega) \cos \omega t \quad (3)$$

La transformada de Hilbert  $\varphi_m^c(t)$  proporciona información sobre la razón de cambio de la serie de tiempo a cada tiempo  $t$ . Es también llamada “función de cuadratura” debido a que representa a  $\varphi_m(t)$  desfasada por  $\pi/2$  para todas las frecuencias presentes en la serie original.

Después se preparan las observaciones “complejizadas”  $\Phi_m(t)$  eliminando la media temporal y normalizando dividiendo por su desviación estándar (esto se debe hacer a la serie original y compleja por separado). Así se obtienen series de tiempo estandarizadas  $F_m(t)$  de  $N \times M$ , que se organizan en una matriz  $F$ . Posteriormente se calcula la matriz de covarianza compleja  $R_{FF}$  del campo complejo  $F_m(t)$ :

$$R_{FF} = F * F \quad (4)$$

Donde el  $F^*$  es la conjugada transpuesta de  $F$  (equivalente a la transpuesta de la matriz compleja), la matriz compleja  $R_{FF}$  es de  $M \times M$ . Por último, se buscan los eigenvalores (reales) y eigenvectores (complejos) de la matriz de covarianza compleja  $R_{FF}$  obteniendo:

$$R_{FF} * E = E * \Lambda \quad (5)$$

Donde el resultado es una matriz diagonal  $\Lambda$  de  $M \times M$  que contiene eigenvalores reales  $\lambda_k$  y una matriz  $E$  de  $M \times M$  con eigenvectores complejos  $E_m^k$  donde  $m = 1 \dots M$  es la ubicación espacial y  $k = 1 \dots$  representa los modos. Pero solo los primero  $K$  eigenvalores no son cero así que la dimensión efectiva de  $\Lambda$  es  $K \times K$  y la de  $E$  es  $M \times K$ . Los eigenvectores  $E_m^k$  son los patrones espaciales del análisis FEOCs y están compuestos de una parte real y una parte imaginaria, y pueden ser expresados en términos de una amplitud espacial  $B_m^k$  y una fase espacial  $\theta_m^k$ .

$$E_m^k(t) = B_m^k e^{i\theta_m^k} \quad (6)$$

Las componentes principales  $A^k(t)$  se obtienen proyectando los datos originales en los eigenvectores  $E_m^k$ , son también complejas, y consisten en la amplitud temporal  $C^k(t)$  y la fase temporal  $\psi^k(t)$ .

$$A^k = C^k(t) e^{i\psi^k(t)} \quad (7)$$

Las medidas dadas por  $E_m^k$  y  $A^k(t)$  constituyen una descripción general de las características del movimiento en el campo original. Una forma de presentar los resultados del análisis de FEOC es a través de la reconstrucción del campo original basándose en la representación de un solo modo. Para el modo  $k$ :

$$F^k(t) = E^{k*} A^k(t) \quad (8)$$

En este trabajo se tomó la parte real de los primeros dos modos de esta reconstrucción, por lo que tenemos 2 mapas del comportamiento de estos dos modos para cada tiempo  $t$ . Para representar cada modo, se hicieron compuestos (promedios) de estos mapas a los tiempos  $t$  que corresponden a valores específicos de la fase temporal, por ejemplo, a  $-180^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ . De esta forma se obtuvieron imágenes instantáneas de la señal de interés en las diferentes fases del ciclo de una oscilación "típica".

### 2.3 Análisis Wavelet

El análisis Wavelet se introdujo por primera vez en la década de 1980 para el procesamiento de datos sísmicos, y hasta 1993 se introdujo en la meteorología y la Oceanografía, debido a que tiene varias ventajas respecto al análisis de Fourier que son particularmente atractivas. A diferencia de la transformada de Fourier, que genera valores promediados de series de tiempo de amplitud y fase para cada componente de frecuencia, la transformada wavelet produce una estimación "instantánea" localizada de la amplitud y la fase de cada componente espectral en el conjunto de datos. Esto le da al análisis wavelet una ventaja en el análisis de series de datos no estacionarios en los que las amplitudes y fases de los constituyentes pueden cambiar rápidamente en tiempo o espacio. Mientras que una transformada de Fourier de la serie de tiempo no estacionaria eliminaría cualquier información detallada sobre los procesos cambiantes, el análisis de wavelet intenta rastrear la evolución de las características de la señal a través del tiempo (Emery y Thomson, 2001).

Como ya se mencionó el análisis Wavelet ha sido utilizado en muchos estudios de series de tiempo no estacionarias, por ejemplo, Pearce (2011) en su trabajo de tesis de maestría utilizó este análisis en datos de corriente y mareas para identificar los movimientos periódicos excitados por el huracán Andrew en la plataforma Texas – Louisiana. De manera similar, en este trabajo se utiliza el análisis Wavelet para encontrar los movimientos periódicos en datos de corriente y temperatura en el mar Caribe causados por el Huracán Wilma utilizando el paquete de software de Wavelet cruzadas y coherencia de Wavelet

proporcionado por Aslak Grinsted, John Moore y Svetlana Jevrejeva basado en el paquete de software de Torrance y Compo para Ondas Atrapadas a la Costa (Torrance y Compo, 1998).

## Capítulo 3. Resultados

---

### 3.1 Análisis de series de tiempo de corriente y temperatura

#### 3.1.1 Análisis de serie de tiempo de corriente

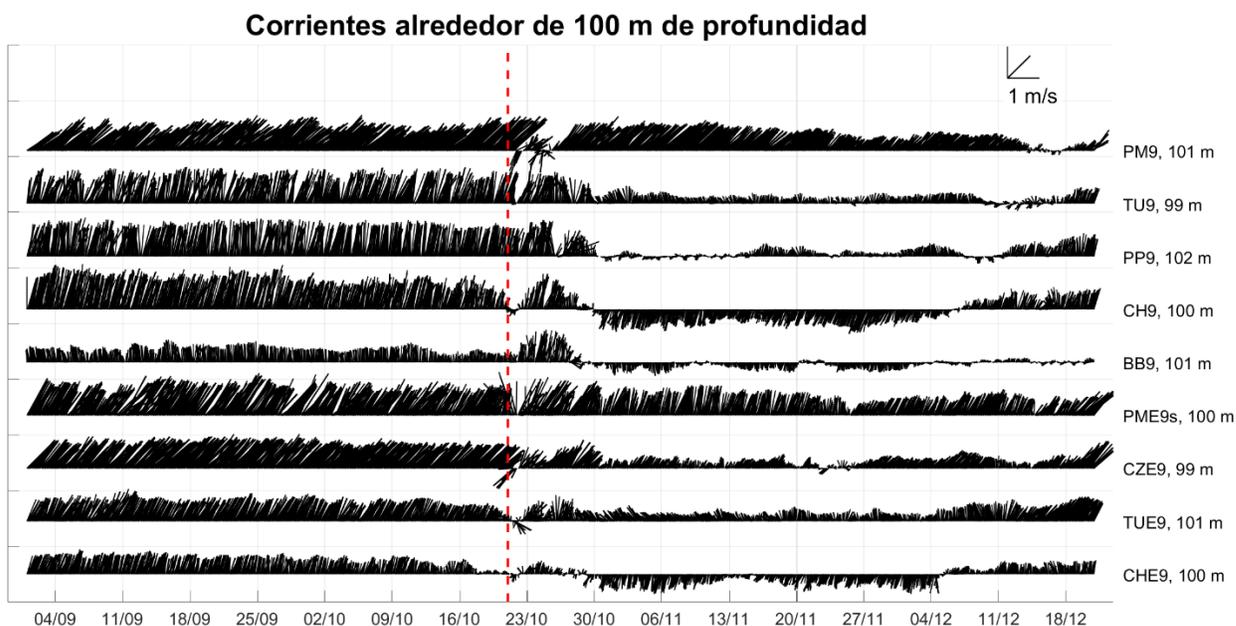
Las series de tiempo de corriente un mes antes del paso del huracán Wilma mostraron que la corriente en los nueve anclajes permaneció en dirección noreste. Tras el paso de Wilma sobre el Caribe mexicano se observaron distintas respuestas en las corrientes medidas, sin embargo, casi todas menos PME cambiaron de dirección hacia el suroeste. Las corrientes a 100 m de profundidad en los nueve anclajes mostraron que, en PM, CH, CZE, TUE y CHE se observó la inversión de la corriente en dirección suroeste y sureste. Además, se pudo observar una inversión aproximadamente una semana después del paso de Wilma de la corriente hacia el sur en CH, BB y CHE que duró alrededor de cinco semanas y media. Por otro lado, en CZE, TU y PP se observó una disminución en la magnitud de la corriente que duró aproximadamente cinco semanas (Fig. 6).

A continuación, se describirá la respuesta a diferentes profundidades de tres de los anclajes, las demás descripciones se encuentran en el anexo A. En PM la corriente cambió de dirección por aproximadamente medio día hacia el suroeste en el momento que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje (22 de octubre). Volvió a virar en dirección noreste por alrededor de dos días (cuando el ojo del huracán se encontraba en tierra), para virar nuevamente al suroeste por un tiempo corto el 24 de octubre de 2005 cuando el huracán se internó en el Golfo de México como categoría 2, este comportamiento se observó en toda la columna medida por el ADCP (de los 21 m a los 117 m de profundidad) y aun en la corriente observada a 434 metros de profundidad por el corrientímetro puntual. Para finales de noviembre se observa otra pequeña inversión de la corriente hacia el suroeste entre los 93 y 117 metros de profundidad (Fig. 7). Es importante mencionar que durante todo el tiempo de registro (septiembre de 2004 – abril de 2006) en este anclaje no se tuvo una inversión de la corriente hacia el suroeste tan prominente como la que ocurrió durante el paso de Wilma. Aún más, revisando el registro histórico que se tiene de la corriente frente a Puerto Morelos desde 2002 hasta 2018, se puede observar que la inversión de la corriente debida al paso de Wilma es la más intensa registrada en este periodo de más de 16 años de mediciones (fig. 8).

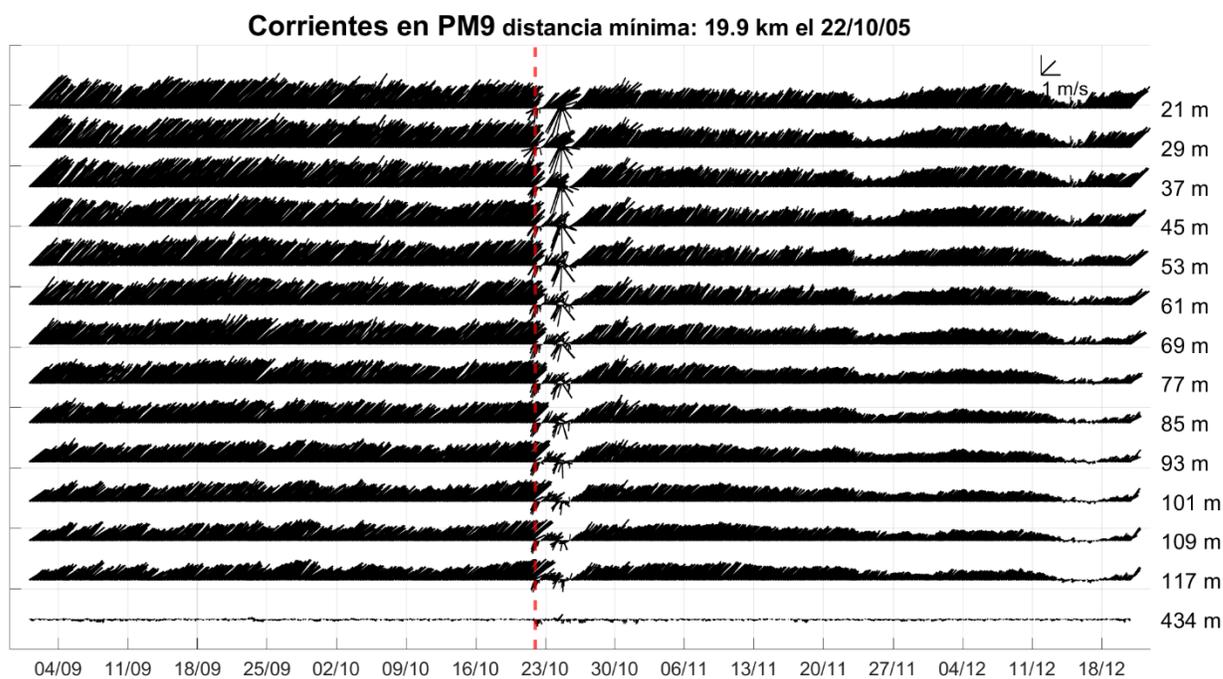
Por otro lado, en CZE que es un anclaje pegado a la costa exterior de la isla de Cozumel donde el huracán impactó por primera vez en tierra, también se observó una inversión de la dirección de la corriente hacia el suroeste en toda la columna medida por el ADCP (de los 73 m a los 163 m) por aproximadamente un día. Después de esto recuperó su dirección hacia el noreste y una semana después se observó una disminución de la magnitud de la corriente de  $\sim 0.2$  m/s, por alrededor de cuatro semanas (Fig. 9).

En CH otro anclaje cercano a la costa localizado dentro del Canal de Chinchorro (entre Banco Chinchorro y la Península de Yucatán) se observó también una inversión y disminución en la magnitud de la corriente el día 21 de octubre (distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje) que duró alrededor de un día. Sin embargo, esto solo se observó de los 90 m a los 130 m de profundidad, mientras que, de los 150 m a los 190 m se observó disminución en la magnitud de la corriente, y en el resto de la columna de agua medida (210 m a 290 m) no se observa alguna respuesta inmediata. Un día después de la distancia mínima se observó en toda la columna medida por el ADCP (90 m a 290 m) un aumento en la magnitud de la corriente de  $\sim 0.1$  m/s que duró aproximadamente 5 días, posterior a esto la corriente disminuyó su magnitud gradualmente por alrededor de dos días, después la corriente se invirtió hacia el sur en toda la columna de agua por cinco semanas y media. En este anclaje se tienen mediciones de la corriente profunda a 711 m, en la cual se observó un comportamiento oscilatorio en la dirección de la corriente entre el norte y el sur antes del paso del huracán. Tras el paso del huracán Wilma y el día en que se dio la distancia mínima no se observó un cambio inmediato en el comportamiento de la corriente, pero cuatro días después la corriente cambió su dirección hacia el sur por tres días para volver a tener un comportamiento oscilatorio por cinco días y posteriormente fijar su dirección hacia el sur por aproximadamente cinco semanas (Fig. 10).

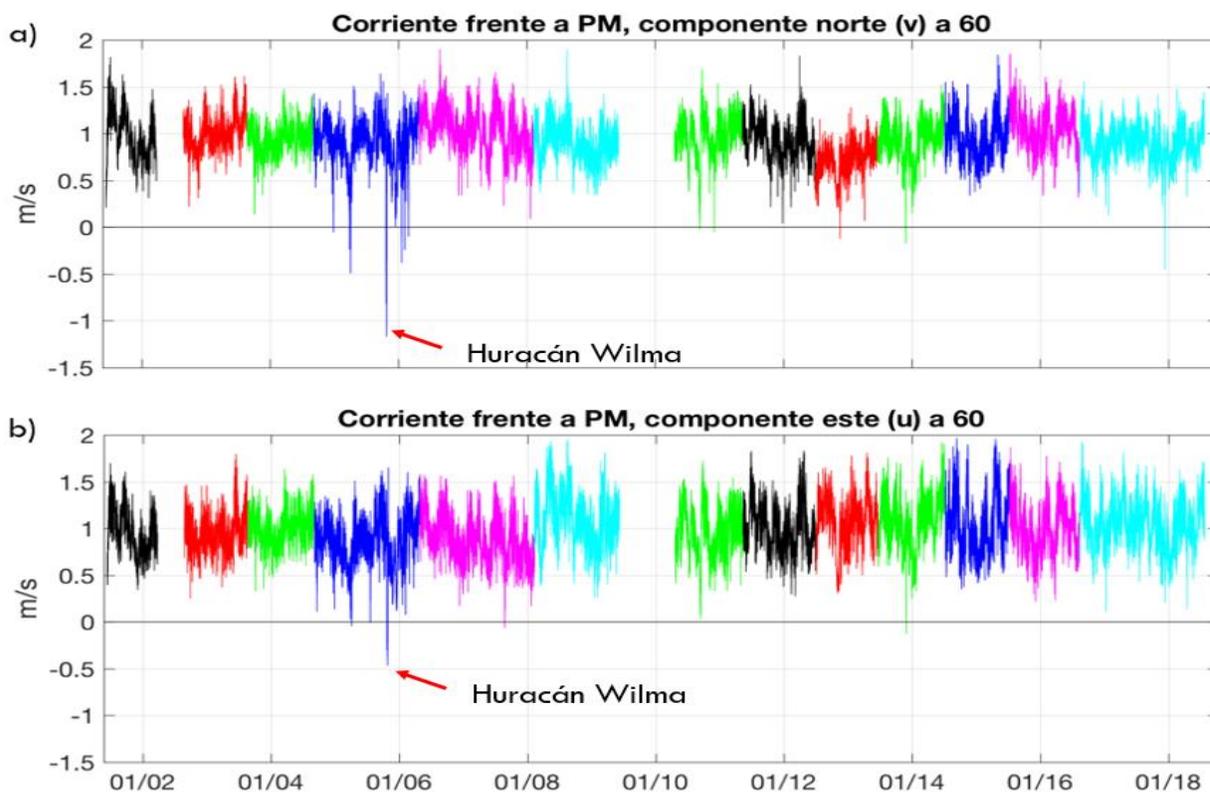
Los anclajes con mediciones con corrientímetros cerca del fondo son PM, TU, CH y BB (Fig. 11) donde se midió la corriente a 434 m, 530 m, 711 m y 793 m de profundidad, respectivamente. En todos los anclajes la corriente cerca al fondo es muy variable y de poca magnitud al estar dentro de la capa límite de fondo, tras el paso de Wilma sobre la región del Caribe el 21 de octubre se observó un aumento marcado en la magnitud de la corriente en PM y TU que duró alrededor de una semana. Por otro lado, en BB este aumento fue muy ligero y se observó también alrededor de una semana. En CH se observó que la corriente se mantuvo en dirección sur al igual que sucedió en la parte más somera medida por el ADCP, es por esto que se puede afirmar que en CH toda la columna de agua se mantuvo en dirección sur tras el paso de Wilma por alrededor de 38 días.



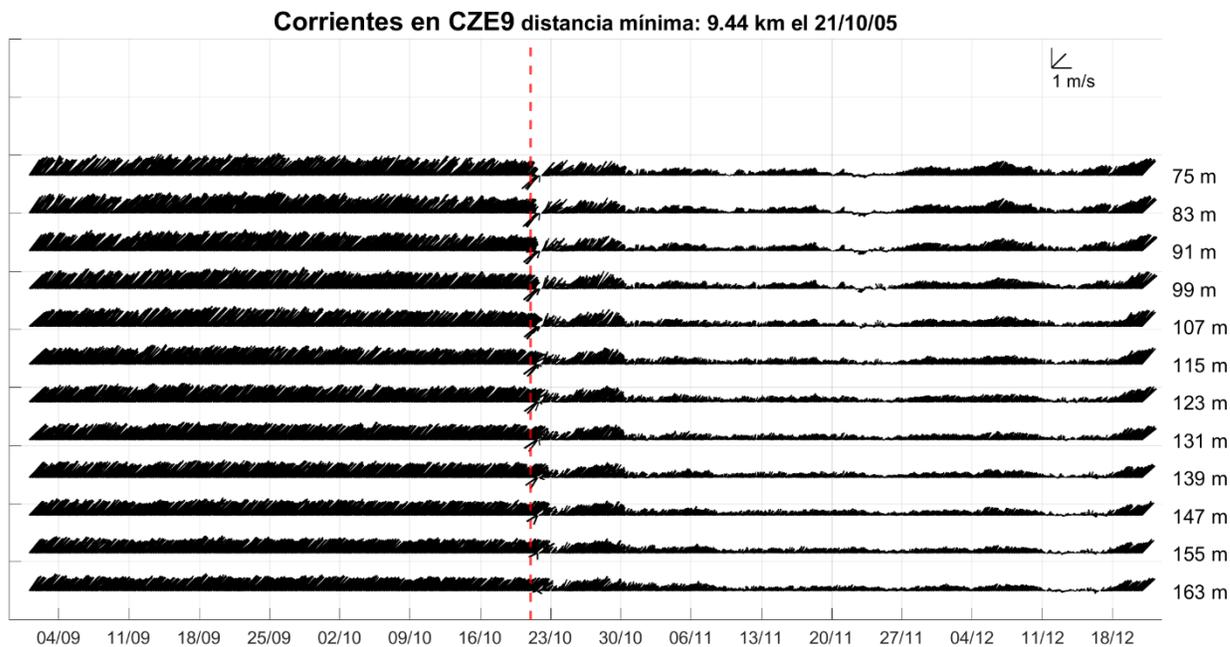
**Figura 6** Series de tiempo de la corriente alrededor de 100 m de profundidad de los nueve anclajes (PM, TU, PP, CH, BB, PME, CZE TUE Y CHE), la línea punteada roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en la mayoría de los anclajes que fue el 21 de octubre de 2005.



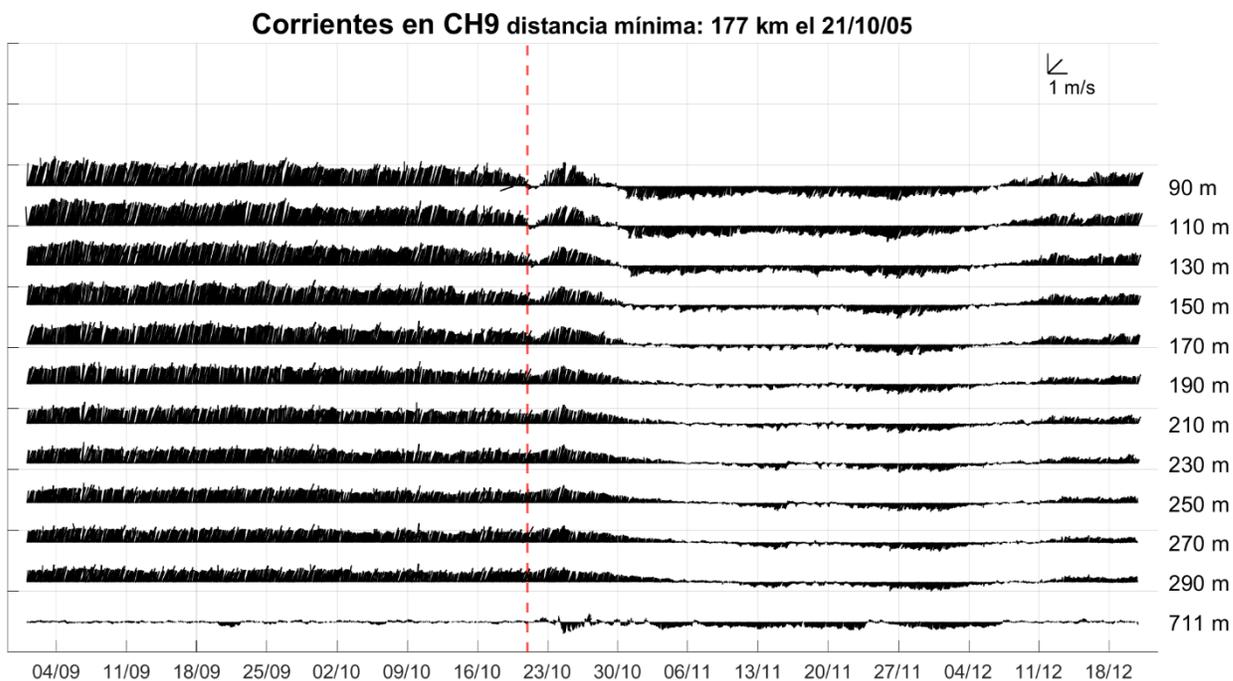
**Figura 7** Series de tiempo de la corriente (m/s) en la parte superior de la columna de agua (-21 m a -117 m) y la corriente medida cerca del fondo (434 m) en el anclaje PM. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje, en este caso el 22 de octubre de 2005.



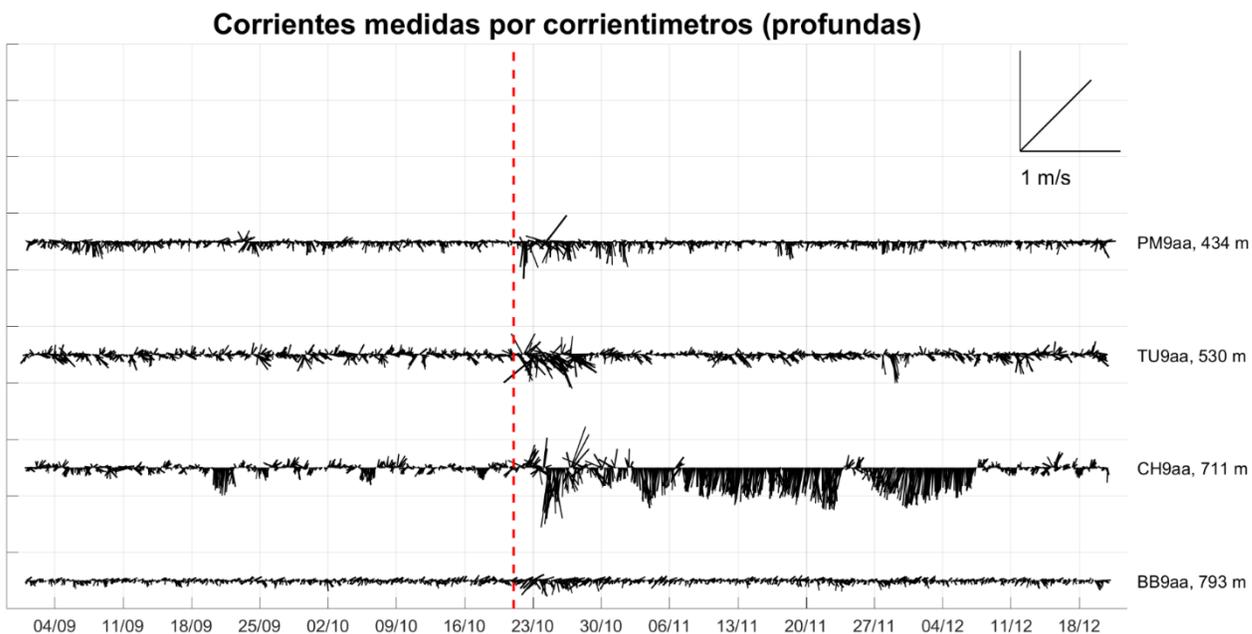
**Figura 8** Serie de tiempo de la componente a) norte (v) y b) este (u) de la corriente medidas a 60 m de profundidad entre el 2002 y 2018 por anclajes en PM en distintos periodos.



**Figura 9** Series de tiempo de la corriente (m/s) en la parte superior de la columna de agua (-75 m a -163 m) para CZE9 durante el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.



**Figura 10** Series de tiempo de la corriente (m/s) en la parte superior de la columna de agua (-90 m a -290 m) y cerca del fondo (-711 m) para CH durante el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.



**Figura 11** Series de tiempo de la corriente cercana al fondo medida en PM, TU, CH y BB, la línea punteada roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje, en la mayoría de los anclajes que fue el 21 de octubre de 2005.

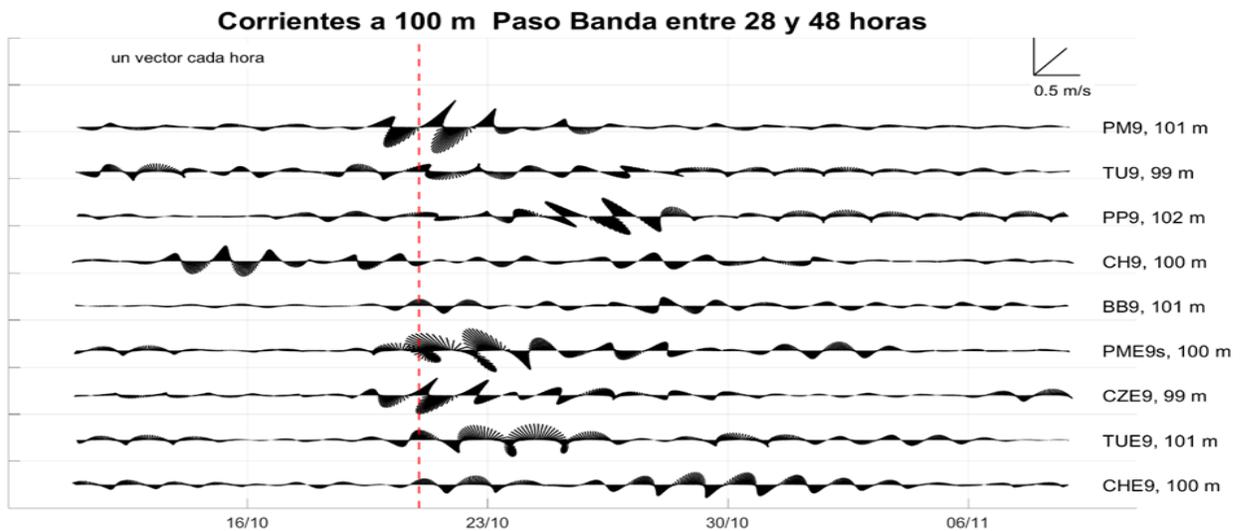
### 3.1.2 Corriente filtrada con un pasa banda entre 28 y 48 horas

A continuación, se filtran las series de tiempo de la corriente con un filtro pasa banda que aísla periodos entre 28 y 48 horas para observar posibles ondas casi-inerciales. El periodo inercial promedio en la región es de 35.85 horas, considerando una latitud promedio de 19.5 grados, i.e.,  $T_i = 2\pi/f/3600$  h, donde  $f$  es el parámetro de Coriolis. En todos los anclajes se observan ondas casi-inerciales asociadas a una rotación anticiclónica antes, durante y después del paso de Wilma. Sin embargo, en casi todos se observa una intensificación en la magnitud de la corriente cuando el huracán se aproxima a la región del Caribe mexicano y pasa sobre este, como se muestra en la figura 12 con las corrientes alrededor de 100 m, aun así, la respuesta de esta intensificación en cada anclaje es distinta, por lo que a continuación se describe la respuesta en PM, CZE y CH. El resto de descripciones puede encontrarlas en el anexo A. En PM (Fig. 13) se observó rotación anticiclónica desde antes del paso del huracán Wilma, sin embargo, incrementa la magnitud de esta rotación anticiclónica dos días antes de que suceda la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje, además se observó que existió una mezcla entre rotación ciclónica y anticiclónica del vector velocidad horizontal en la columna de agua medida por el ADCP (21 a 117 m de profundidad), este comportamiento permaneció durante todo el periodo de medición, pero con una magnitud de la rotación menor. Además, en este anclaje se midió la corriente en el fondo a 434 m, aquí se observa una intensificación de la magnitud de las ondas casi-inerciales dos días antes de que suceda la distancia mínima y permanecen así hasta una semana y media después (Fig. 13).

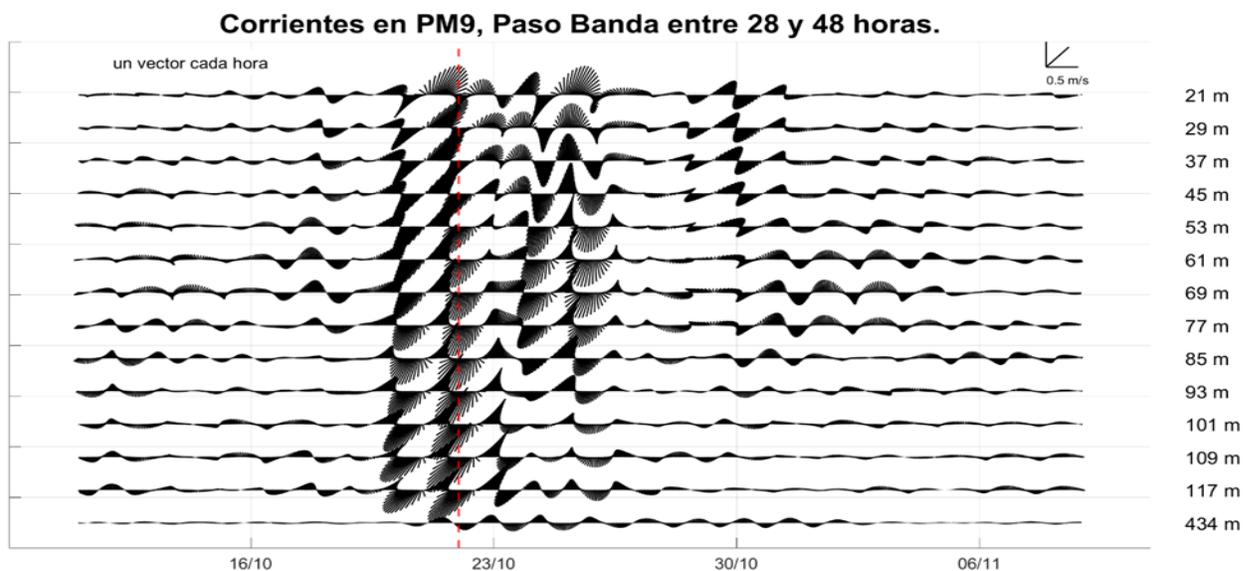
Por otro lado, en CZE la intensificación de las ondas casi-inerciales se observa también alrededor de dos días antes de la distancia mínima de los 75 m hasta los 139 m y de los 147 m a los 163 m se observa aproximadamente un día antes. Esta intensificación de la onda perdura por alrededor de una semana de los 75 m a los 131 m, y de los 139 m a los 163 m dura alrededor de dos semanas y media (Fig. 14). Además, también se observa una mezcla entre rotaciones ciclónicas y anticiclónicas durante el paso de Wilma y un aumento considerable en la magnitud de la corriente relacionada a esta rotación.

En CH se observan ondas casi-inerciales en todo el periodo y una pequeña intensificación de las ondas un día después de que sucedió la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje, duró aproximadamente tres días y ocurrió en toda la columna medida por el ADCP (90 m a 290 m). En el fondo, a 711 m ocurrió una intensificación de la magnitud de la onda más significativa (respecto a la magnitud de las ondas en el fondo) también un día después de que ocurriera la distancia mínima, además de una mezcla entre rotación ciclónica y anticiclónica, estos efectos perduraron por aproximadamente dos semanas (Fig. 15).

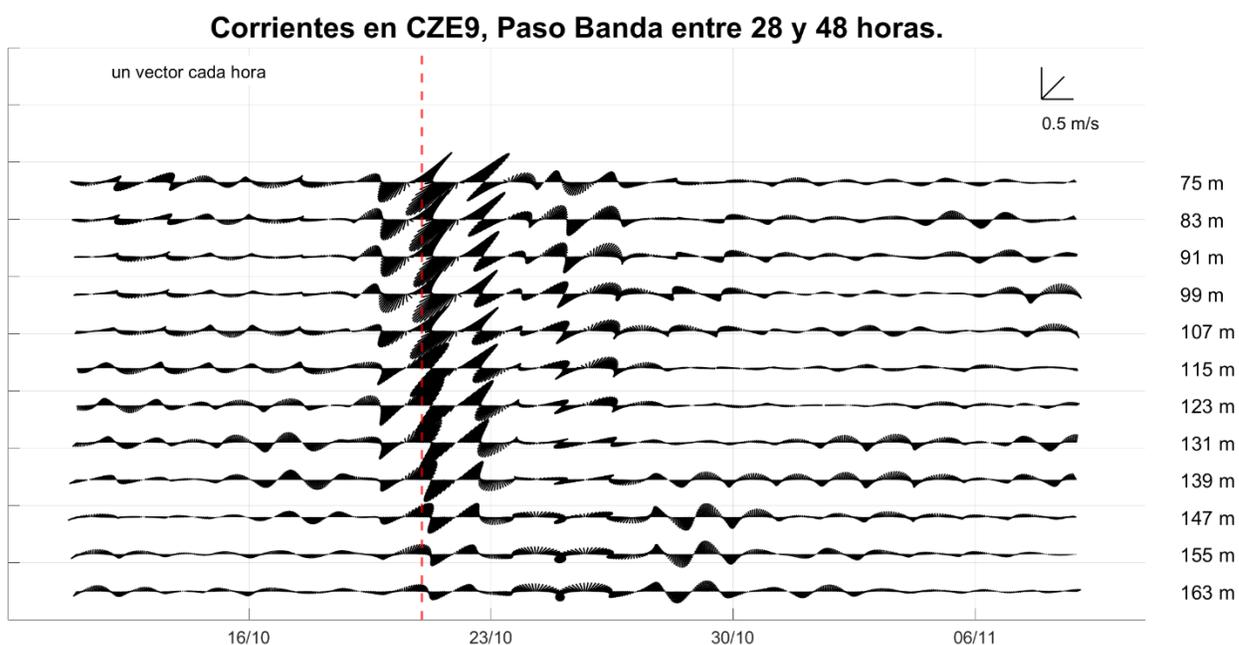
Las series de tiempo de corriente cercanas al fondo mostraron formación de ondas casi-inerciales en distintos momentos. En PM y TU la formación de estas ondas se da aproximadamente un día antes del paso de Wilma por el Caribe mexicano, y dura semana y media en PM y una semana en TU. Por otro lado, en CH estas ondas se generan cinco días antes de que se dé la distancia mínima, sin embargo, tras el paso del huracán estas ondas se ven intensificadas y duran alrededor de dos semanas y media. En BB la corriente es muy pequeña y tiene una intensificación muy ligera tras el paso de Wilma (Fig. 16).



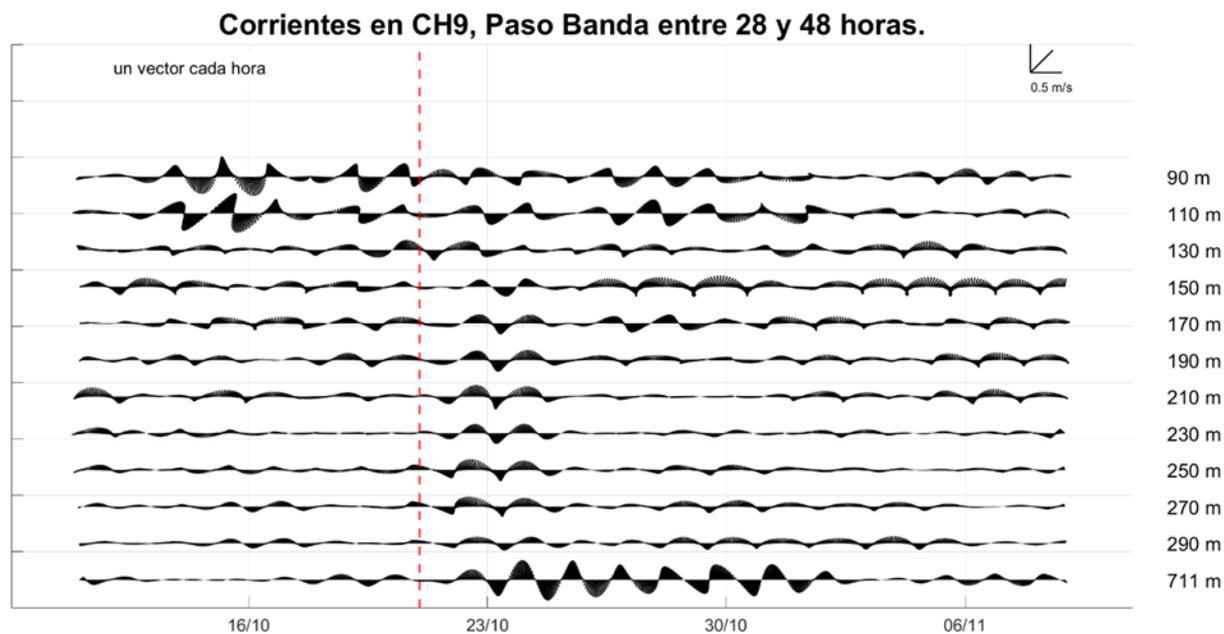
**Figura 12** Series de tiempo de la corriente alrededor de 100 m de profundidad de los nueve anclajes (PM, TU, PP, CH, BB, PME, CZE TUE Y CHE) filtradas con un filtro pasa-banda que aísla señales entre 28 y 48 horas, la línea punteada roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en la mayoría de los anclajes que fue el 21 de octubre de 2005.



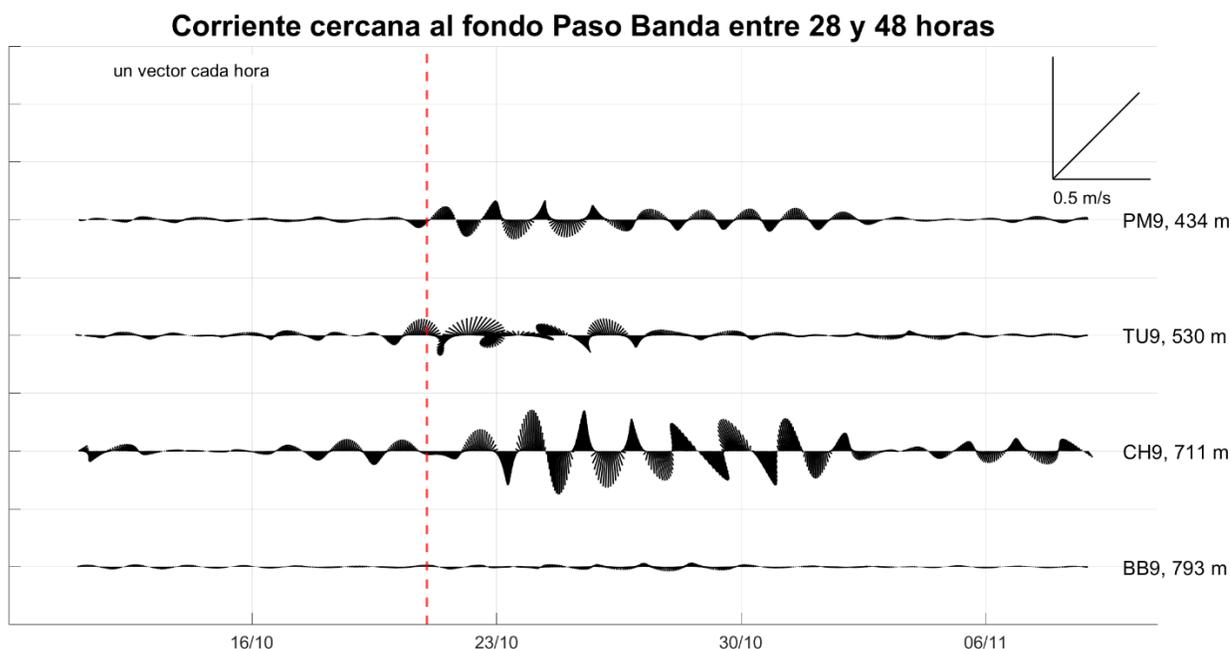
**Figura 13** Series de tiempo filtradas entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) en la parte superior de la columna de agua y cerca del fondo (-21 m a -117 m y -434 m) para PM durante el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 22 de octubre de 2005.



**Figura 14** Series de tiempo filtradas entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) en la parte superior de la columna de agua (-75 m a -163 m) para CZE durante el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.



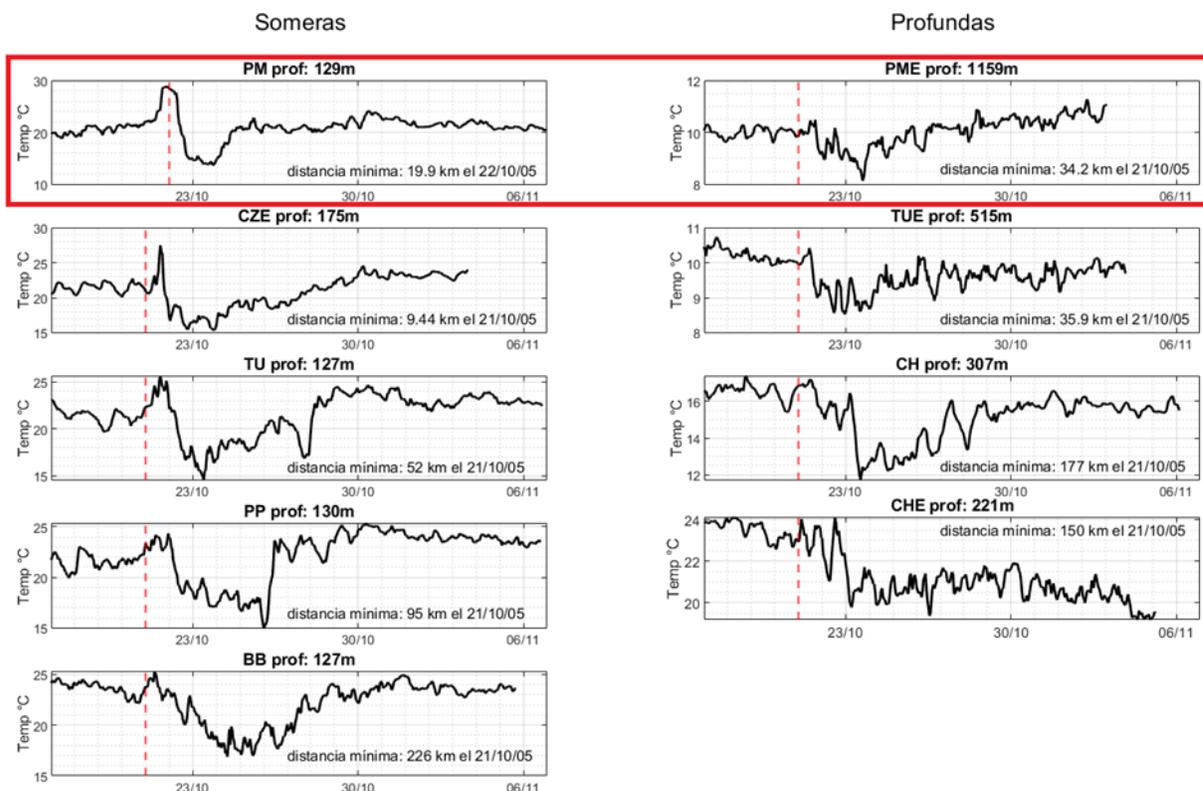
**Figura 15** Series de tiempo filtradas entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) en la parte superior de la columna de agua y cerca del fondo (-90 m a -290 m y -711 m) para CH durante el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.



**Figura 16** Series de tiempo de la corriente cerca del fondo, filtrada con un filtro pasa-banda entre 24 y 48 horas, en PM, TU, CH y BB, la línea punteada roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje, en la mayoría de los anclajes que fue el 21 de octubre de 2005.

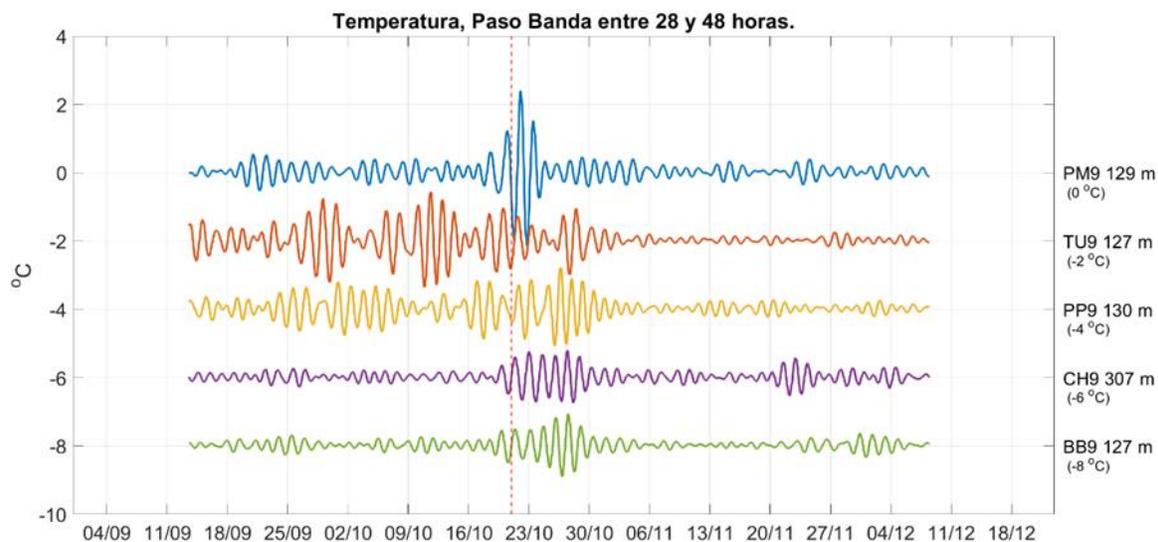
### 3.1.3 Análisis de series de tiempo de temperatura

Las series de tiempo de la temperatura se registraron en cada instrumento utilizado en los anclajes, es decir, por los ADCPs y los corrientímetros puntuales, a sus profundidades nominales de instalación. En todos los anclajes donde se midió en la parte somera se registró un aumento en la temperatura de entre 3 y 5 °C e inmediatamente después un rápido descenso de esta. En el caso de PM este comportamiento se observó poco antes de que se diera la distancia mínima entre el huracán y el anclaje, en CZE, TU, PP y BB se observó horas después del paso de Wilma, coincidiendo los picos de máximo aumento de la temperatura, teniendo una disminución de entre 6 y 14 °C. Los anclajes con mediciones más profundas como son PME, TUE, CH y CHE muestran una respuesta oscilatoria, con una amplitud de entre 0.5 y 1.5 °C. Además, a estas profundidades la recuperación de los valores de temperatura fue más prolongada (por lo menos dos semanas), mientras que en la zona más somera los valores comenzaron a recuperarse días después del paso de Wilma (entre 4 y 5 días) (Figura 17). Al parecer el aumento inicial de la temperatura en las mediciones alrededor de los 100 m de profundidad se debe a una mezcla inicial con aguas más someras (provenientes del frente de la tormenta como anticipación al incremento del nivel del mar) seguida de una mezcla más intensa que incorpora aguas más profundas que ocasionan un rápido descenso de la temperatura que se prolonga por varios días.

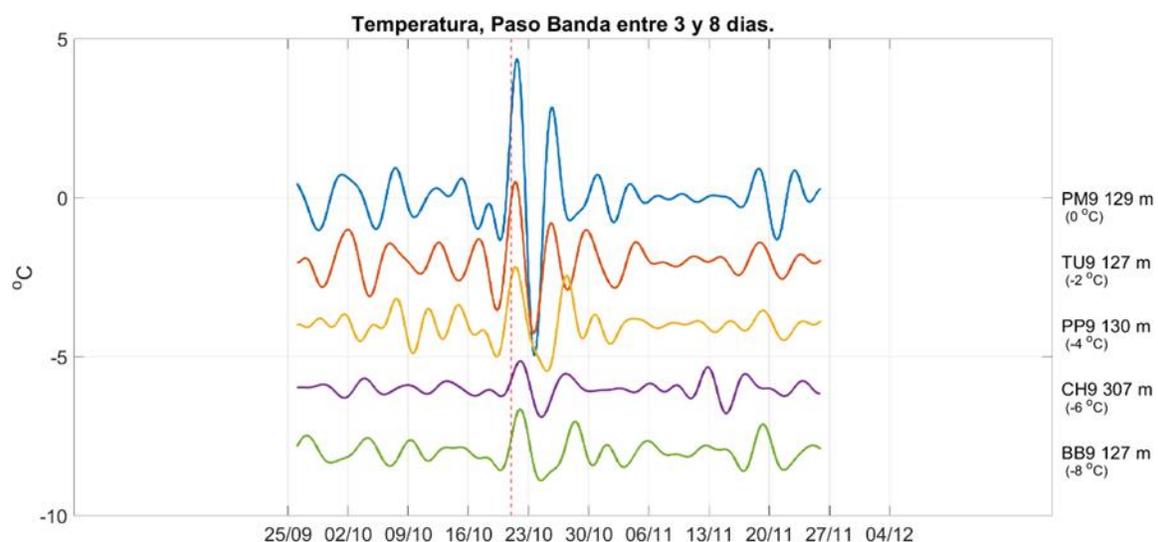


**Figura 17** Series de tiempo de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) del periodo 17 de octubre a 07 de noviembre de 2005 para los nueve anclajes señalados con su abreviatura. La línea discontinua roja señala el día en que el huracán estuvo más cerca del anclaje y el recuadro rojo marca los anclajes que quedaron a la derecha de la trayectoria.

Con el objetivo de investigar la propagación de señales a lo largo de la costa debido a la posible excitación de ondas atrapadas, se aplicaron dos filtros a las series de tiempo de temperatura de los anclajes más cercanos a la costa, que son de norte a sur PM, TU, PP, CH y BB. El primer filtro fue de 28 a 48 horas y se hizo para observar la formación de ondas casi-inerciales, y el segundo filtro de 3 a 8 días que se hizo para observar ondas sub-inerciales. En el primer filtro (Fig. 18) se observó una intensificación de las ondas casi-inerciales tras el paso del huracán Wilma. En el segundo filtro (Fig. 19) se observó un pulso intenso de una onda cercana a la costa desde PM hasta BB, este pulso se observa desde los 127 m hasta los 307 m de profundidad, viaja a una velocidad de 4.13 m/s desde PM hasta BB con la costa a la derecha y recorriendo una distancia de 310.76 km en 20.85 horas.



**Figura 18** Serie filtrada con un filtro pasa-banda entre 28 y 48 horas para los anclajes cercanos a la costa que son de norte a sur PM, TU, PP, CH y BB. La línea punteada roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el huracán y los anclajes de TU, PP, CH y BB el 21 de octubre de 2005.



**Figura 19** Serie filtrada con un filtro pasa-banda entre 3 y 8 días para los anclajes cercanos a la costa que son de norte a sur PM, TU, PP, CH y BB. La línea punteada roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el huracán y los anclajes de TU, PP, CH y BB el 21 de octubre de 2005.

### 3.2 Análisis de Funciones Empíricas Ortogonales Complejas (FEOCs)

Para diferenciar los tipos de respuestas generadas por el huracán Wilma en el mar Caribe y conocer los patrones verticales de estas respuestas se realizó un análisis de FEOCs, utilizando las series de tiempo sin normalizar (para no eliminar la importancia de la respuesta en los diferentes niveles medidos por los ADCPs) y filtradas con un pasa-banda que aísla periodos entre 28 y 48 horas (para enfatizar la respuesta

casi-inercial). Se tomaron los dos primeros modos del análisis de FEOCs debido a que estos muestran la respuesta forzada y libre dependiendo el anclaje, los dos modos además explican la mayor parte de la varianza del campo total, explicando entre un 58 % (en CH) y 87 % (en CZE y BB).

**Tabla 2** Descripción del modo que representa la respuesta forzada en los nueve anclajes, incluyendo la fecha en que se dio la respuesta máxima. Los anclajes marcados en gris quedaron a la derecha de la trayectoria. Donde PME9i corresponde a mediciones de un ADCP instalado a 1159 m de profundidad.

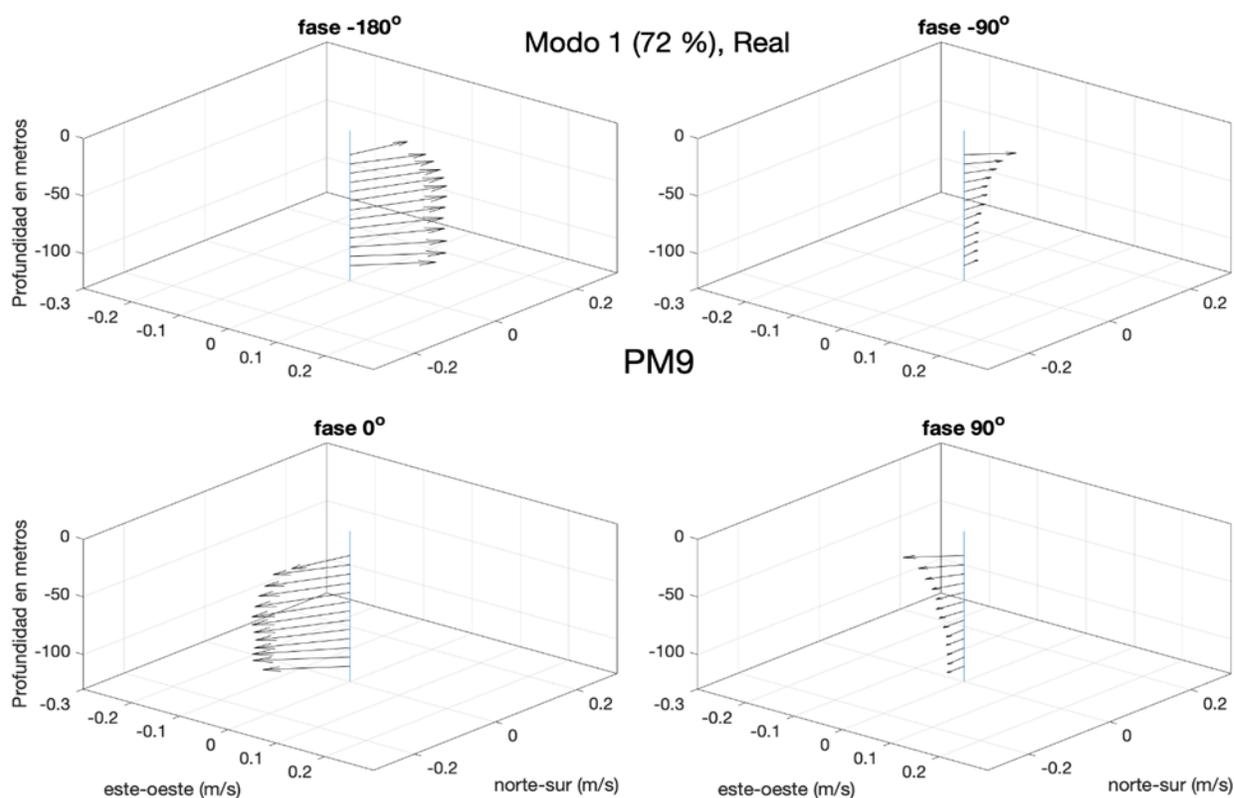
Respuesta Forzada						
Anclaje	modo	Distancia mínima (km)	%	Rotación	Fecha en que se dio la distancia mínima	Máxima respuesta (hora Z)
PM9	1	19.9	72	Ciclónico	03/22/10/2005	12/21/10/2005
TU9	2	52	20	Ciclónico	18/21/10/2005	05/22/10/2005
PP9	2	95	10	Ciclónico	18/21/10/2005	12/21/10/2005
CH9	2	177	20	Anticiclónico	06/21/10/2005	17/22/10/2005
PME9	2	34.2	20	Anticiclónico	22/21/10/2005	19/21/10/2005
PME9i	2	34.2	26	Ciclónico	22/21/10/2005	22/23/10/2005
CZE9	1	9.94	78	Ciclónico	19/21/10/2005	16/21/10/2005
TUE9	2	35.9	13	Anticiclónico	15/21/10/2005	09/21/10/2005
CHE9	2	150	13	Anticiclónico	04/21/10/2005	17/22/10/2005

La respuesta forzada fue representada por el modo 1 en PM (Fig. 20 y 21) y CZE (explican el 72% y 78% de la varianza total, respectivamente), y el modo 2 en TU, y PP (explican el 20% y 10% de la varianza total, respectivamente), se trató de una rotación ciclónica y fue una respuesta inmediata al paso del huracán (tal como lo observó Price et al., en 1993), cuyo máximo se dio el 21 de octubre a distintas horas según el anclaje. El radio de vientos máximos del huracán fue de 32 km, sin embargo, también se observó una respuesta forzada en anclajes a 52 y 95 km que corresponden a TU y PP, respectivamente.

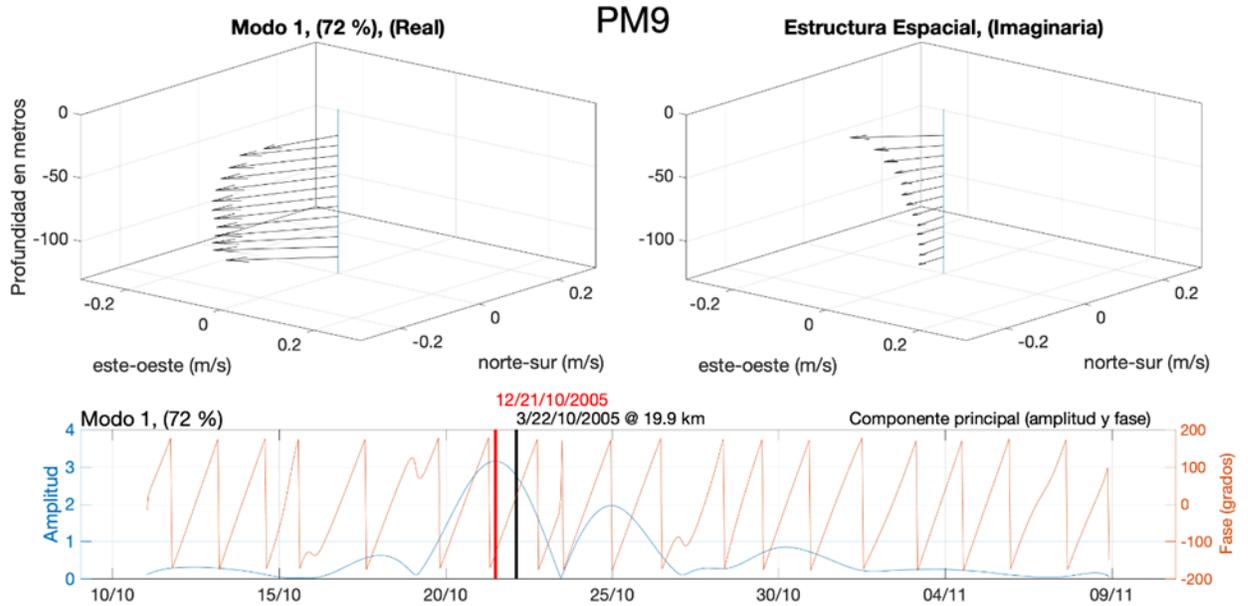
Como ya se mencionó en PM9 (Fig. 20 y 21) se representa bien la respuesta forzada, es una estación que tuvo una distancia mínima al ojo del huracán de 19.9 km, en la figura 20 podemos observar la evolución del patrón del modo 1 en cuatro fases de  $-180^\circ$  a  $90^\circ$ , se observó que se trata de una rotación ciclónica, en la figura 21 además del patrón y su evolución con la fase, también se pudo observar la evolución en el tiempo de esta y la amplitud. La amplitud nos muestra el momento en el que el patrón aumenta su intensidad debido a la aproximación del huracán Wilma el anclaje alcanzando su máximo el 21 de octubre a las 02 UTC, 15 horas antes de que suceda la distancia mínima, además se muestra un segundo máximo de menos intensidad que es consecutivo al primero. La fase en forma de picos consecutivos (sierra) nos indica que el patrón rota  $360^\circ$  aproximadamente en un día y medio de manera ciclónica. Por otro lado, en la evolución del modo 2 en cuatro fases en PM9 (figura 22) muestra una rotación anticiclónica como ya se

mencionó asociada a ondas casi inerciales, y la evolución en el tiempo de la amplitud y la fase (figura 23) muestra que este patrón corresponde a la respuesta libre ya que se da dos días después del paso de Wilma con la región. Más características sobre éstas respuestas se verán posteriormente.

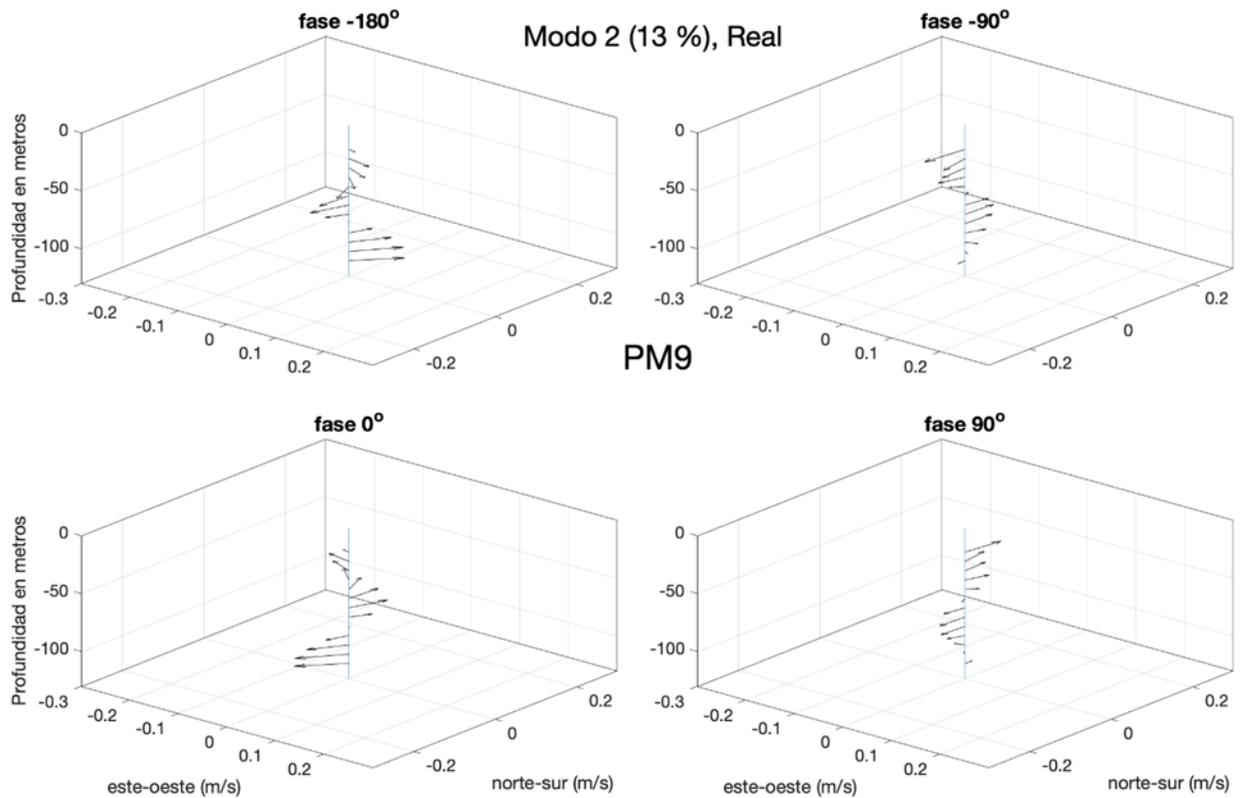
Por otro lado, en PME (Fig. 24 y 25), TUE, CH y CHE en el modo 2 se observó una respuesta que corresponde a una rotación anticiclónica que como se sabe está asociada a ondas casi-inerciales, la respuesta máxima se dio entre el 21 y 22 de octubre, siendo PME el primer anclaje en alcanzar su máximo, y CHE y CH los últimos, en estos anclajes a partir de este modo se explica entre el 10% y el 20% de la varianza, Además, se tienen mediciones de PMEi que corresponde a los datos del ADCP instalado a 1159 m de profundidad en el anclaje PME9, midiendo corrientes entre 1041 y 1147 m de profundidad, su respuesta máxima sucedió el 23 de octubre y se trató de una rotación ciclónica representada por el modo 2. La tabla 2 nos muestra un resumen de lo antes descrito y en el anexo B podemos encontrar el patrón del resto de los anclajes.



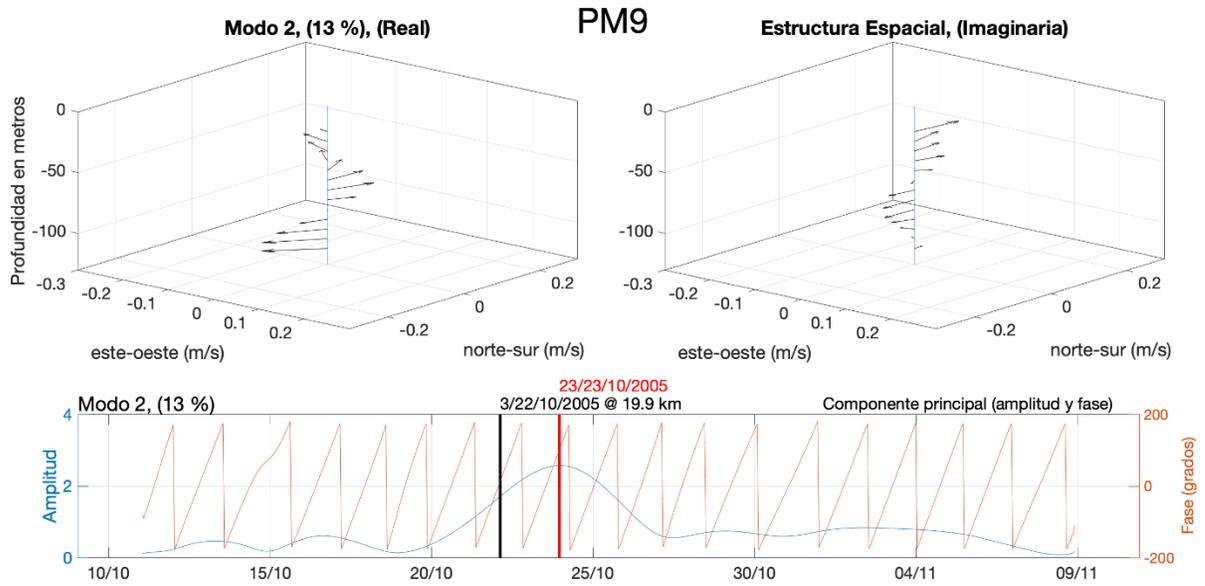
**Figura 20** Compuesto o promedio del modo 1 para PM9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a  $-180^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Este compuesto en PM nos muestra una rotación ciclónica.



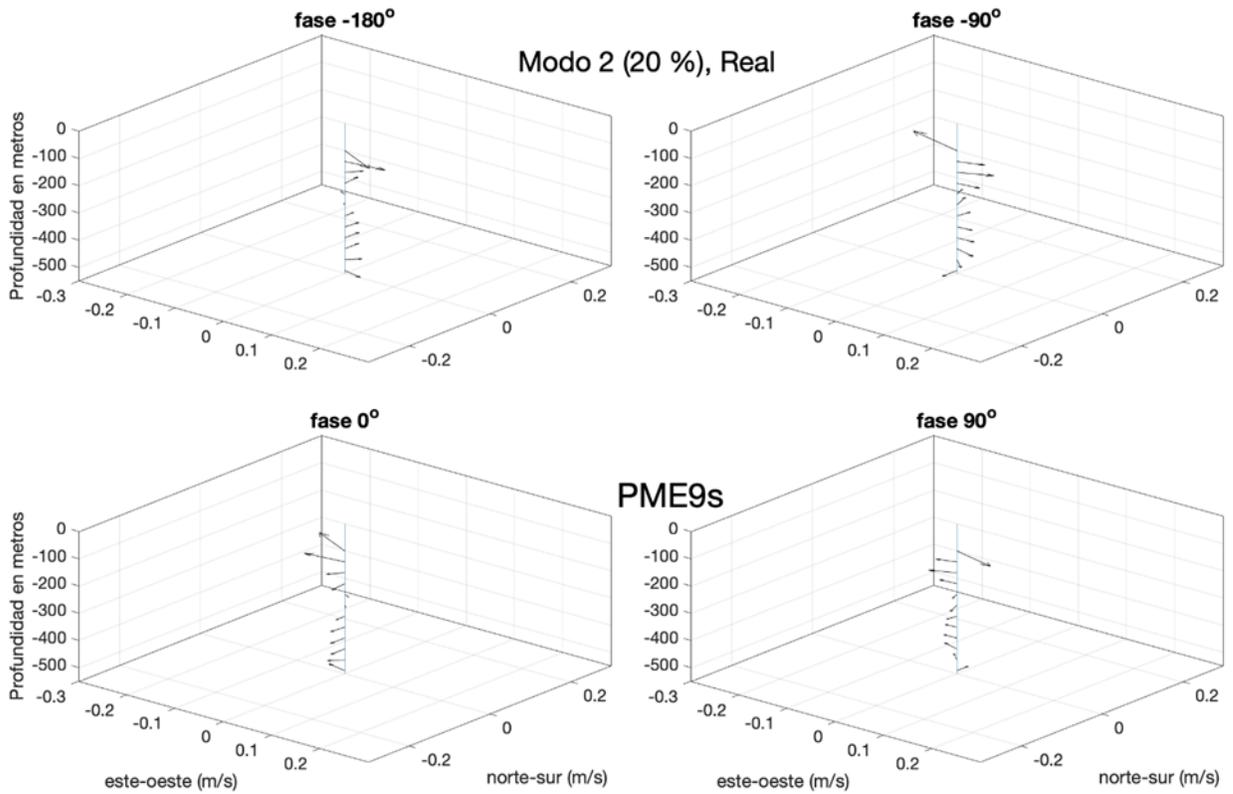
**Figura 22** Patrón del modo 1 de FEOCs para PM9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.



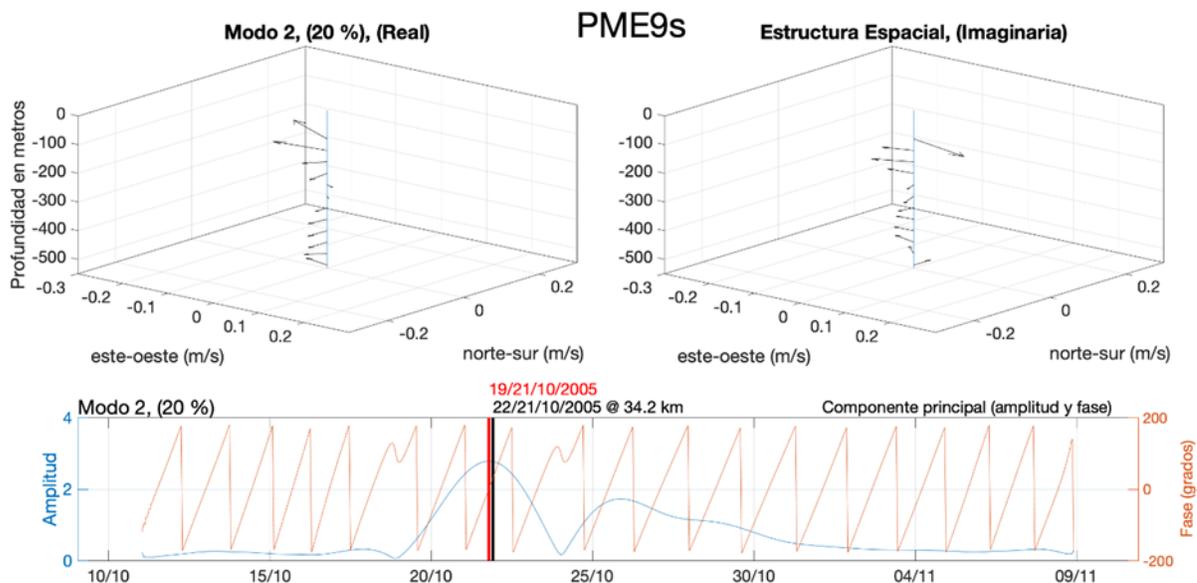
**Figura 21** Compuesto o promedio del modo2 para PM9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a  $-180^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Este compuesto en PM9 nos muestra una rotación anticiclónica



**Figura 23** Patrón del modo 2 de FEOCs para PM9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.



**Figura 24** Compuesto o promedio del modo 1 para PME que corresponden a valores específicos de la fase temporal a  $-180^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Este compuesto en PME nos muestra una rotación anticiclónica.

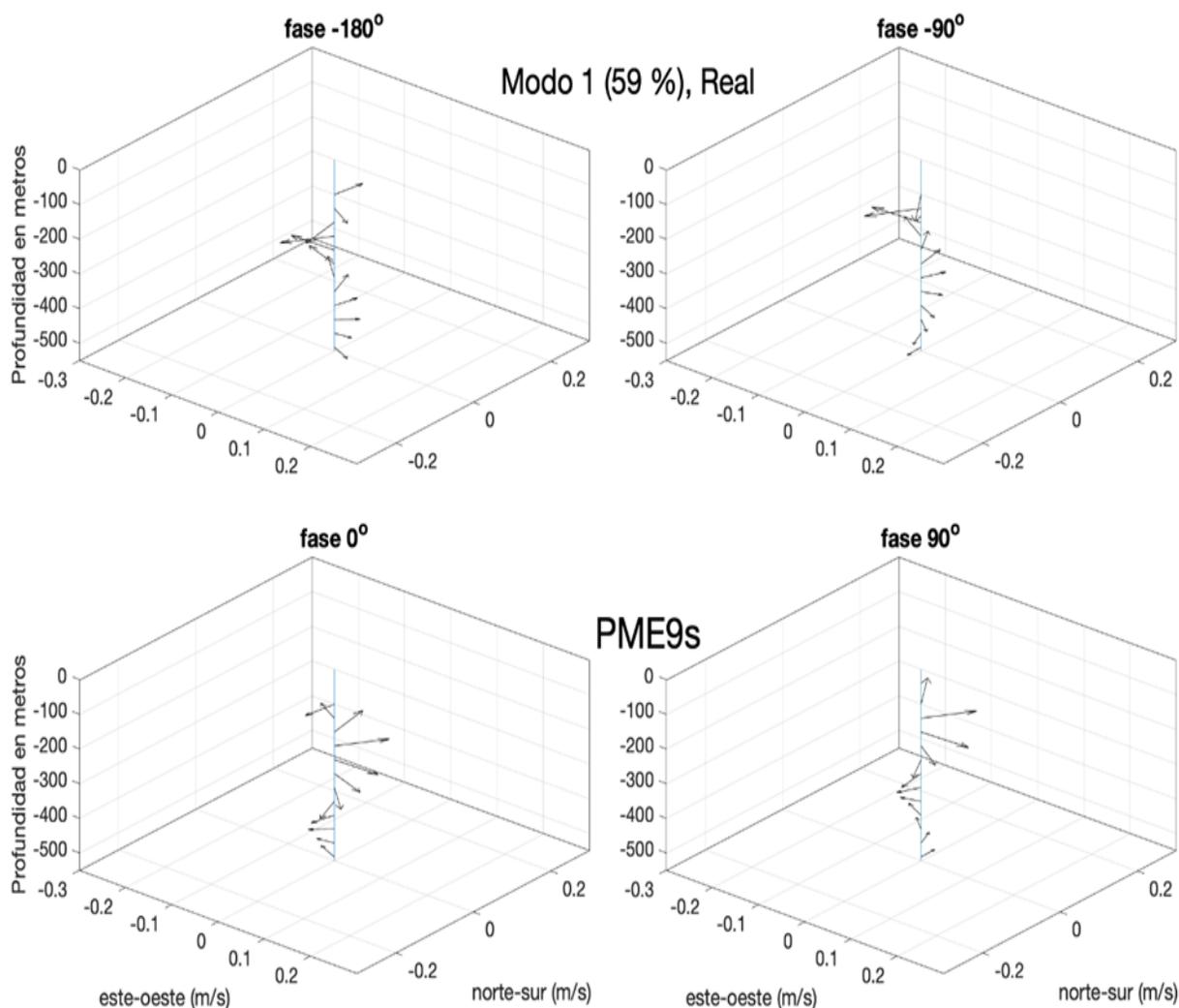


**Figura 25** Patrón del modo 2 de FEOCs para PME9s y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.

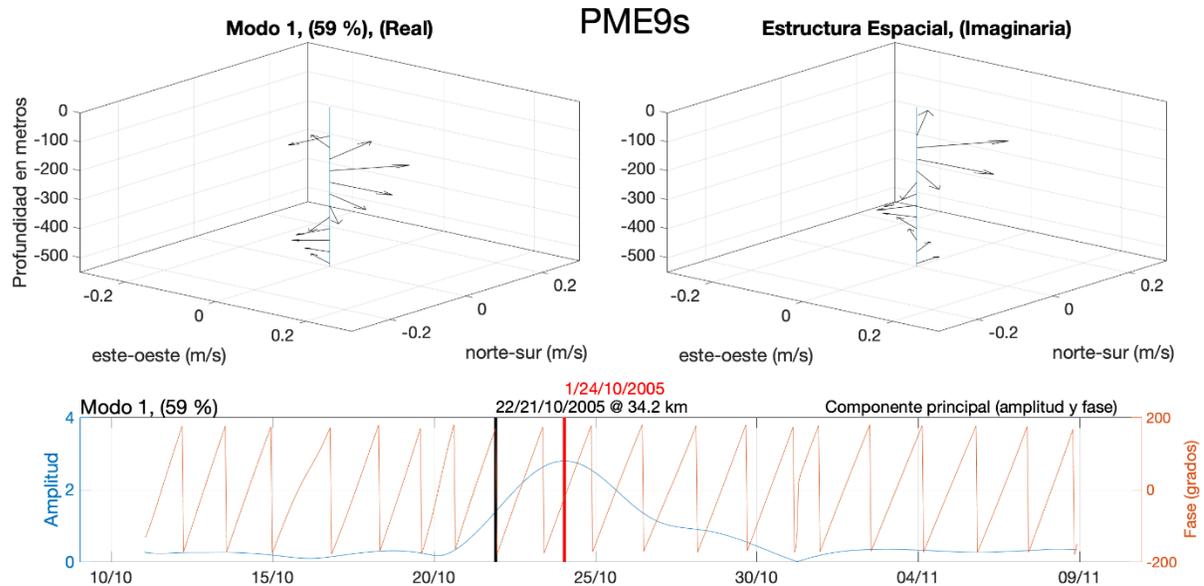
**Tabla 3** Descripción del modo que representa la respuesta forzada en los nueve anclajes, incluyendo la fecha en que se dio la respuesta máxima. Los anclajes marcados en gris quedaron a la derecha de la trayectoria. Donde PME9i corresponde a mediciones de un ADCP instalado a 1159 m de profundidad.

Respuesta Libre						
Anclaje	modo	Distancia mínima (km)	%	Rotación	Fecha en que se dio la distancia mínima	Máxima respuesta
PM9	2	19.9	13	Anticiclónico	03/22/10/2005	00/24/10/2005
TU9	1	52	64	Anticiclónico	18/21/10/2005	01/28/10/2005
PP9	1	95	75	Anticiclónico	18/21/10/2005	07/26/10/2005
CH9	1	177	38	Anticiclónico	06/21/10/2005	09/23/10/2005
BB9	1	226	54	Anticiclónico	04/21/10/2005	06/25/10/2005
	2	226	33	ciclónico	04/21/10/2005	18/27/10/2005
PME9	1	34.2	59	Anticiclónico	22/21/10/2005	01/24/10/2005
PME9i	1	34.2	64	Anticiclónico	22/21/10/2005	19/29/10/2005
CZE9	2	9.94	9	Anticiclónico	19/21/10/2005	17/24/10/2005
TUE9	1	35.9	36	Anticiclónico	15/21/10/2005	09/23/10/2005
CHE9	1	150	69	Anticiclónico	04/21/10/2005	09/27/10/2005

La respuesta libre se trata de una rotación anticiclónica asociada a ondas casi-inerciales y se observa en casi todos los anclajes, ocurre aproximadamente un día después del paso del huracán entre el 23 de octubre (en TUE) y el 28 de octubre (en TU). Esta respuesta es dada por el modo 1 en TU, PP, PMEs (Fig. 26 y 27), PMEi, CH, BB, TUE y CHE explicaron entre el 54 % y 75 % de la varianza del campo total, excepto en CH donde explica el 38 % de la varianza, y por el modo 2 en PM, CZE y BB, donde explicaron el 9% y 13% en los dos primeros anclajes y el 33% en BB (Tabla 3). Esto nos indicó que aquellos anclajes que explicaron una mayor varianza en la respuesta forzada, tienen una menor respuesta en la etapa libre como veremos más adelante.



**Figura 26** Compuesto o promedio del modo 1 para PMEs que corresponden a valores específicos de la fase temporal a  $-180^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Este compuesto en PM9 nos muestra una rotación anticiclónica.

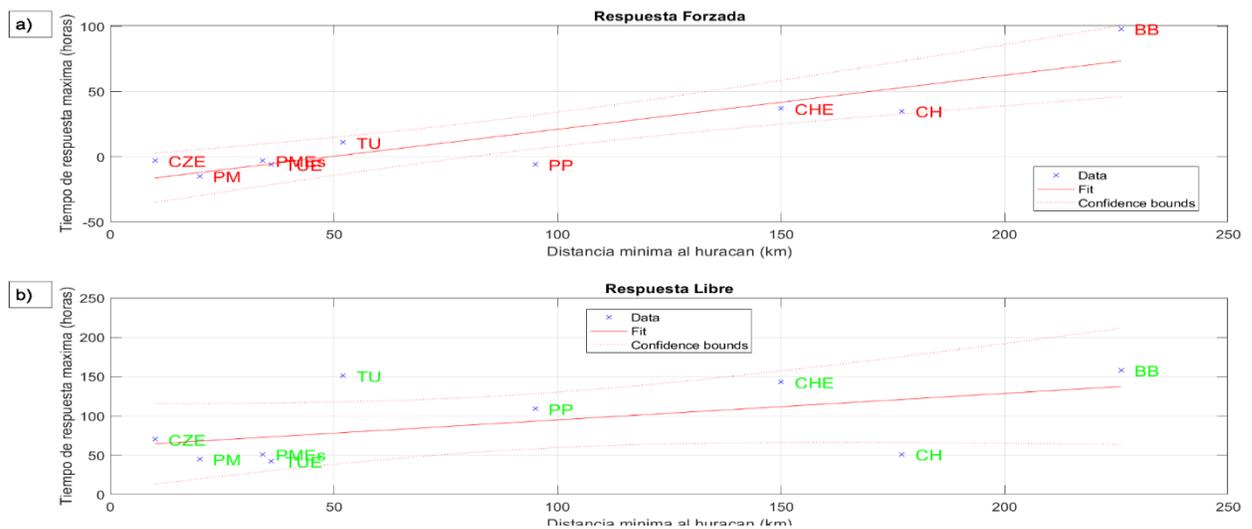


**Figura 27** Patrón del modo 1 de FEOCs para PMEs y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.

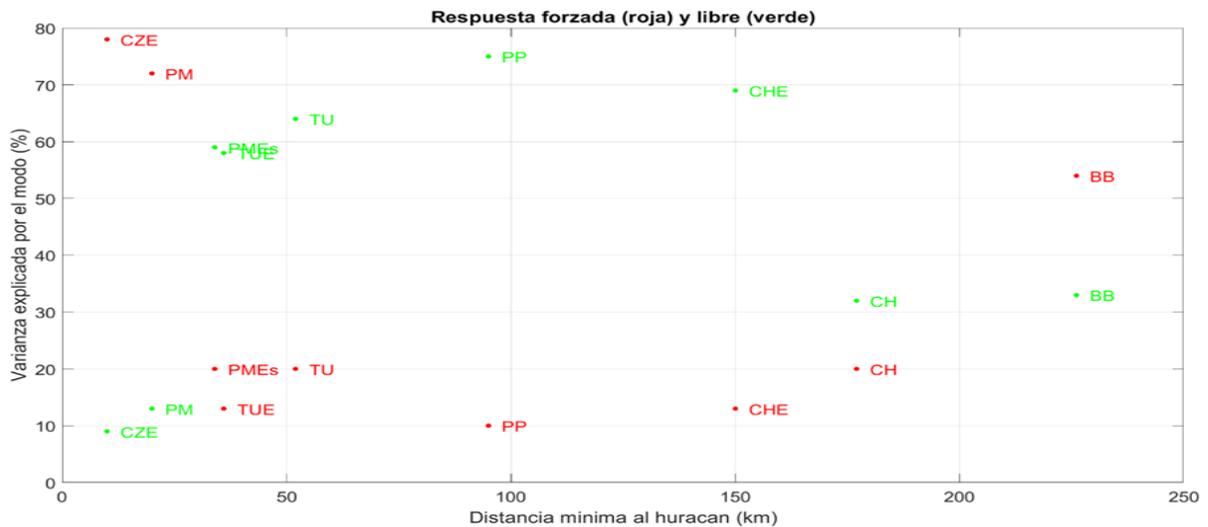
En la Figura 26 se muestran los compuestos de PMEs para 4 fases ( $-180^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ) que nos indican como evolucionó el modo, en este caso se observó una rotación anticiclónica, este comportamiento se observó en los compuestos de los demás anclajes, excepto en el modo 2 de BB. Además, en la Figura 27 se pudo observar la evolución en el tiempo de la amplitud (en m/s) y la fase (grados), lo que nos mostró que la amplitud de la corriente comenzó a aumentar poco antes de que se diera la distancia mínima el 21 de octubre y que la respuesta alcanzó su máxima amplitud el 24 de octubre a las 01 UTC disminuyendo la amplitud hasta el 30 de octubre. Por otro lado, la fase nos muestra que la rotación de la corriente se da en aproximadamente día y medio.

La Figura 28 nos muestra la relación entre la distancia del huracán y la máxima respuesta observada para la parte forzada (a) y libre (b). Para la respuesta forzada se puede observar que los anclajes que respondieron más rápido son aquellos que se encuentran a menor distancia del ojo del ciclón tropical, algunos incluso respondieron entre 15 y 3 horas antes de que se diera la distancia mínima, como son PM, PME, CZE, TUE y PP, la excepción a esta afirmación ocurrió en TU que respondió 11 horas después, en CH y CHE la respuesta se dio 30 y 35 horas después respectivamente, el ultimo anclaje en responder es BB (98 horas después) que es el anclaje que se encuentra más alejado del ojo del huracán, a 226 km. De esta manera se le hizo un ajuste lineal a la serie de datos de máxima respuesta contra la distancia mínima al

huracán. Casi todos los anclajes se ajustan bien a la recta lo cual nos indica lo anteriormente descrito: a menor distancia del huracán la respuesta forzada máxima se dará en el menor tiempo. Por otro lado, en la respuesta libre también se observó esta tendencia a que las estaciones más cercanas respondan antes que las más lejanas. Sin embargo, TU y CH no se ajustan a esta regla ya que TU a pesar de ser una estación que se encuentra a 52 km respondió 151 horas después, tan solo 7 horas antes que BB que es la estación más lejana. Por otro lado, CH a pesar de ser una estación cuya distancia mínima con el huracán fue de 177 km respondió 51 horas después igual que PME cuya distancia mínima fue de 34.2 km.



**Figura 28** Grafica de la distancia mínima al huracán contra el tiempo de respuesta máxima, con un ajuste lineal para a) la respuesta Forzada y b) la respuesta libre.



**Figura 29** Gráfica de la distancia mínima alcanzada contra la varianza explicada por cada modo en la respuesta forzada (rojo) y la respuesta libre (verde).

**Tabla 4** Periodos y frecuencias de los de los modos complejos en los anclajes tanto en la respuesta forzada como en la respuesta libre. Donde  $T_i$  es el periodo inercial,  $f_i$  es la frecuencia inercial,  $T$  es el periodo del modo,  $f_e$  es la frecuencia efectiva del modo y  $t_m$  el tiempo en que se dió la repuesta máxima.

Anclaje	$T_i$ (h)	$f_i$ ( $d^{-1}$ )	RESPUESTA FORZADA				RESPUESTA LIBRE				
			Modo (%)	$T$ onda (h)	$f_e$ ( $d^{-1}$ )	$t_m$ (d h)	Modo (%)	$T$ onda (h)	$f_e$ ( $d^{-1}$ )	$t_m$ (d h)	
PM9	33.64	0.7134	M1	35.90	0.6684	20 14	M2	35.15	0.6829	22 02	
			72%	35.49	0.6762	22 01	13%	35.55	0.6751	23 13	
								35.02	0.6738	25 01	
PME9	34.02	0.7054	M2	35.77	0.6709	20 08	M1	34.73	0.6911	22 16	
			20%	35.72	0.6719	21 19	59%	35.64	0.6734	24 04	
								37.72	0.6362	25 17	
CZE	34.42	0.6889	M2	37.00	0.6800	20 20	M2	36.82	0.6517	23 05	
			13%	34.64	0.6390	22 07	9%	33.97	0.7066	24 17	
								31.47	0.7625	26 01	
								29.66	0.8092	27 08	
								32.64	0.7354	28 15	
TU	34.84	0.6889	M2	42.17	0.5692	20 07	M1	35.45	0.6715	21 11	
			20%	40.27	0.5960	22 00	64%	35.48	0.6788	22 23	
				39.76	0.6036	23 16		36.19	0.6631	24 11	
				36.85	0.6513	25 06					
TUE	35.10	0.6837	M2	37.00	0.6485	20 03	M1	35.45	0.6771	21 11	
			13%	36.73	0.6534	21 16	58%	35.48	0.6764	22 23	
								36.19	0.6631	24 11	
PP	35.64	0.6733	M2	34.78	0.6901	19 15	M1	35.56	0.6749	25 14	
			10%	37.47	0.6406	21 03	75%	35.84	0.6696	27 02	
CH	37.36	0.6424	M2	36.84	0.6515	21 12	M1	35.96	0.6675	14 02	
			20%	36.97	0.6492	23 01	38%	35.17	0.6825	15 13	
				34.36	0.6985	24 12					
CHE	37.50	0.6400	M2	38.08	0.6303	21 10	M1	36.17	0.6634	26 03	
			13%	35.40	0.6779	22 23	69%	34.39	0.6979	27 14	
				31.16	0.7703	24 08		33.92	0.7074	29 00	
				33.13	0.7245	25 16		34.82	0.6892	30 10	
				39.45	0.6084	27 04		34.03	0.7053	31 21	
BB	38.32	0.6264					M1	33.77	0.7106	24 07	
							54%	31.97	0.7506	24 16	
								31.95	0.7511	27 00	
								34.03	0.7053	28 09	
								M2	41.29	0.5676	25 07
								33%	41.81	0.5740	27 01
						39.13	0.6133	28 18			

La Figura 29 nos muestra la relación entre la varianza explicada y la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje. Se muestra que los anclajes que explicaron mayor varianza en la respuesta forzada, explicaron menor varianza en la respuesta libre y viceversa. Indicando que los anclajes más cercanos al ojo del huracán como son PM, CZE y TUE tuvieron una fuerte respuesta forzada, mientras que los anclajes más alejados tuvieron una fuerte respuesta libre CH, CHE y BB, excepto PME que a pesar de encontrarse a 34.2 m de Wilma su respuesta más importante fue la libre.

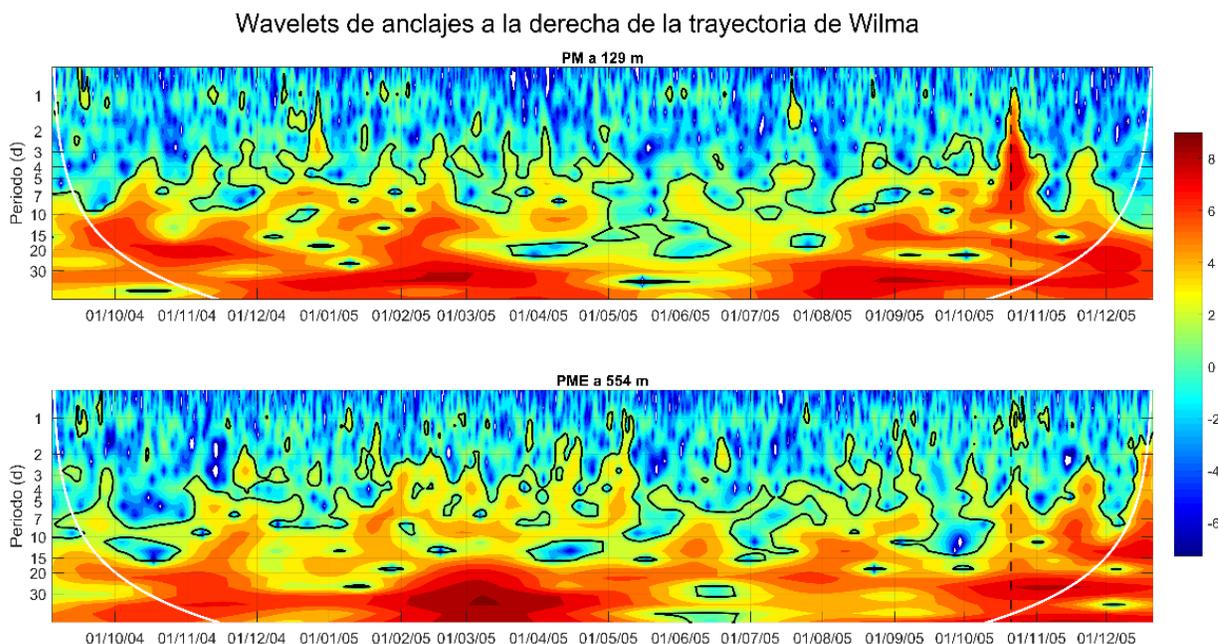
Utilizando la fase de las Componentes Principales de los modos 1 y 2 de los FEOCs verticales se obtuvieron los periodos de las ondas libres (T) y su frecuencia afectiva ( $f_e$ , que es la frecuencia efectiva que ocasiona la presencia de la vorticidad vertical creada por la corriente geostrófica) así como la hora promedio en que estas sucedieron. En la Tabla 4 se muestra el periodo inercial ( $T_i$ ) y la frecuencia inercial ( $f_i$ ) en cada uno de los anclajes, además, se muestran la T y la  $f_e$  para las respuestas forzada y libre. En los anclajes que quedan a la derecha de la trayectoria del huracán que son PM y PME la  $f_i$  es de 0.7134 d-1 y 0.7054 d-1 respectivamente, mientras que la  $f_e$  en la respuesta libre en PM ronda los 0.6751 d-1 y en PME los 0.6669 d-1 siendo estas menores a la  $f_i$  indicando vorticidad negativa (anticiclónica) en la región dejada tras el paso de Wilma. Por otro lado, en la respuesta forzada se tiene una T y  $f_e$  también menores a la  $T_i$  y  $f_i$ . Además, el último periodo de la respuesta forzada en PM se da el día 22 a las 01 UTC mientras que el primer periodo del modo libre se da el 22 de octubre a las 02 UTC lo que indica que en ese periodo la respuesta forzada y libre cohabitan. Por otro lado, en casi todos los anclajes la  $f_e < f_i$  y por lo tanto el  $T > T_i$  durante la respuesta forzada excepto en CHE donde la  $f_e > f_i$  y en BB donde no hay respuesta forzada. No está claro por qué la respuesta forzada, al presentar una rotación ciclónica, tenga una periodicidad casi-inercial ya que no es una onda inercial. El análisis nos arroja estos resultados, pero al momento no se tiene una explicación de por qué esto ocurre. Podría estar relacionado con que el huracán presentara una componente inercial en el forzamiento directamente, pero esto falta por investigarse.

En la respuesta libre en CZE Y CHE se observó que la  $f_e > f_i$  por lo tanto el huracán Wilma dejó vorticidad positiva (ciclónica) y se tiene una frecuencia supra-inercial siendo anclajes que se encuentran cerca de la costa en el lado exterior de la Isla de Cozumel y de Banco Chinchorro, respectivamente. Por otro lado, estaciones más costeras como TU, PP y CH, además de TUE tienen una  $f_e$  muy cercana a la  $f_i$  en cada uno de los anclajes, por ejemplo, en TU  $f_i$  es 0.689 d-1 y la  $f_e$  promedio es de 0.683 d-1. Además, se puede observar que hay otras interacciones entre la respuesta forzada y la libre en TUE y CHE. Un caso particular ocurre en BB donde ambos modos muestran una respuesta libre y que éstas respuestas cohabitan, además, que una es una respuesta supra-inercial y la otra una respuesta sub-inercial esto se puede deber

a que son modos verticales diferentes que pueden tener en las distintas capas vorticidades positivas o negativas.

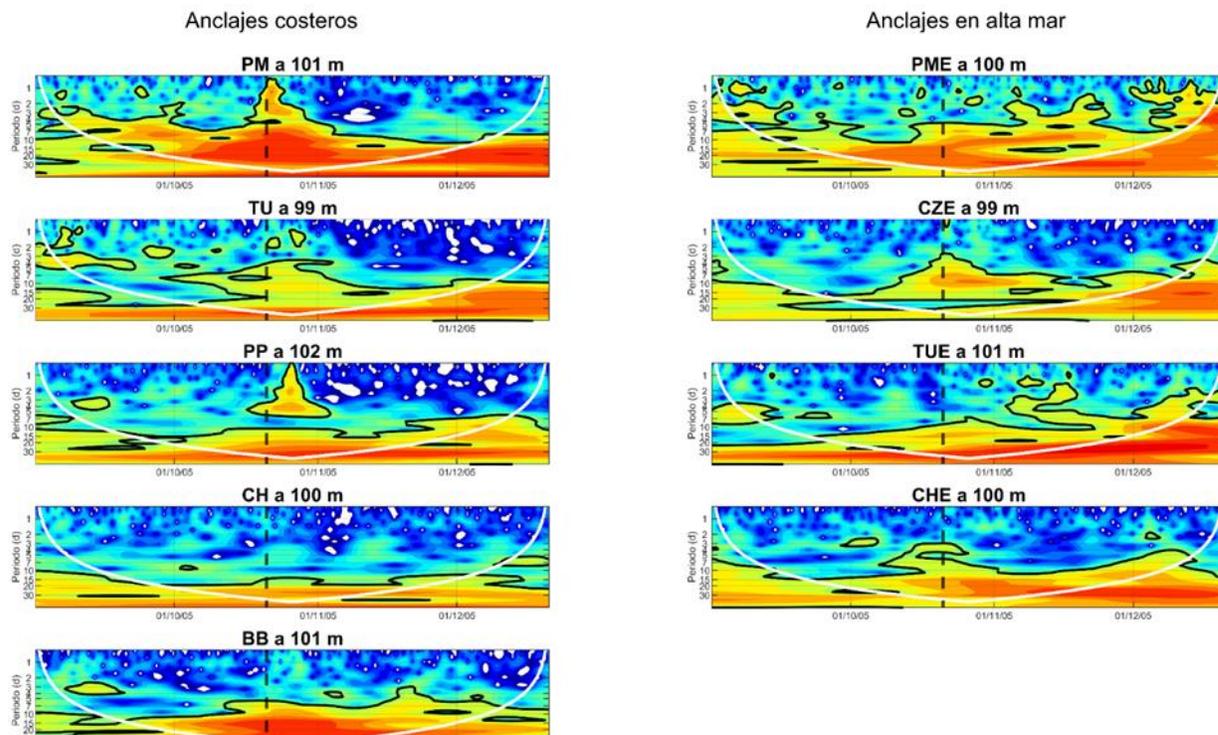
### 3.3 Análisis Wavelets

Se realizaron transformadas Wavelets de las series de tiempo de la temperatura a diferentes profundidades y la corriente a 100 m (debido a que todos los anclajes tienen mediciones alrededor de esa profundidad) para cada uno de los anclajes. En las Wavelets de temperatura en PM y PME mostrados en la Figura 30 se pudo observar que durante todo el periodo de medición (de septiembre de 2004 a diciembre de 2005) la señal de 1 a 2 días correspondiente a periodos casi- inerciales se mantuvo activa, siendo el anclaje de PME que se encuentra ubicado en alta mar el más activo, debido a que se observan más periodos con picos de potencia entre uno y dos días. Además, se observó que durante el paso de Wilma se generó la activación de periodos de 1 hasta 20 días en la estación de PM, y del periodo inercial y periodos de 7 a 20 días en PME.

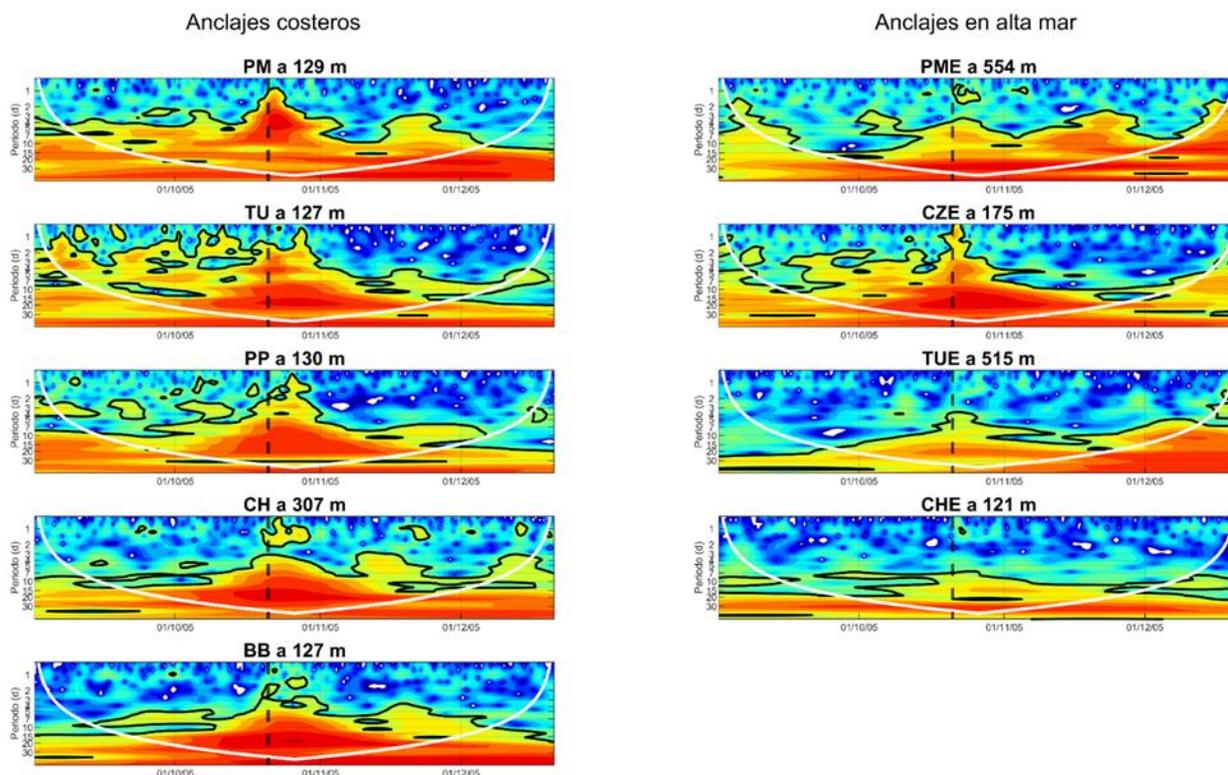


**Figura 30** Transformada Wavelet de la serie de tiempo de temperatura en PM a -129 m y PME a -554m para el periodo septiembre de 2004 a diciembre de 2005. La barra de colores es la potencia relativa, las líneas de contorno negro indican el 95% de significancia, las líneas blancas en los extremos indican el intervalo de confianza del 95% y la línea punteada negra vertical indica la fecha en la que paso el huracán Wilma sobre el Caribe mexicano.

Por otro lado, se separaron las series de tiempo de corriente a  $\sim 100$  m de los 9 anclajes, en aquellos cercanos a la costa (PM, TU, PP, CH y BB) y los que se encontraban alejados de la costa principal (PME, TUE en alta mar y CZE, CHE en el lado exterior de Isla Cozumel y de Banco Chinchorro, respectivamente) (Fig. 31). En los anclajes cercanos a la costa se observó que en PM, TU y PP se activaron varios periodos tras el paso del huracán Wilma, en PM periodos de entre 1 y 20 días, en TU de 1 a 2 días y de 4 a 15 días, y en PP de 1 a 7 días y de 15 a 20 días. Mientras que en CH y BB se observa una señal entre 15 y 20 días, que está presente de manera arbitraria durante todo el periodo medido, pero que se observó que aumento la energía tras el paso de Wilma. En los anclajes ubicados en Alta mar, en PME y TUE se observó una señal atenuada de entre 1 y 8 días, al igual que de la señal entre 15 y 20 días en TUE y CHE, lo que nos podría estar hablando de un tipo de onda atrapada a la costa cuyos máximos se encuentran dentro de la plataforma y llegan desde PM hasta PP. Se realizó la misma separación en anclajes costeros y de alta mar para las series de tiempo de temperatura a distintos niveles (Fig. 32), en cuyas transformadas wavelets se observó mayor potencia que en las wavelets de corriente a 100 m. Además, se observó que la excitación de periodos de 1 a 20 días se generalizo desde PM hasta BB, estas señales al igual que en las wavelets de corriente se ven atenuadas en los anclajes alejados de la costa por lo que se refuerza la teoría de la existencia de ondas atrapadas a la costa.



**Figura 31** Transformadas wavelets de la corriente a  $\sim 100$  m de profundidad para anclajes costeros (izquierda) y anclajes alejados de la costa (derecha) del periodo 01 septiembre de 2005 a 20 de diciembre de 2005. La línea punteada negra indica la fecha en que se dio la distancia mínima entre los anclajes y el ojo del huracán Wilma, las líneas negras indican el 95 % de significancia y las líneas blancas el intervalo de confianza del 95%.



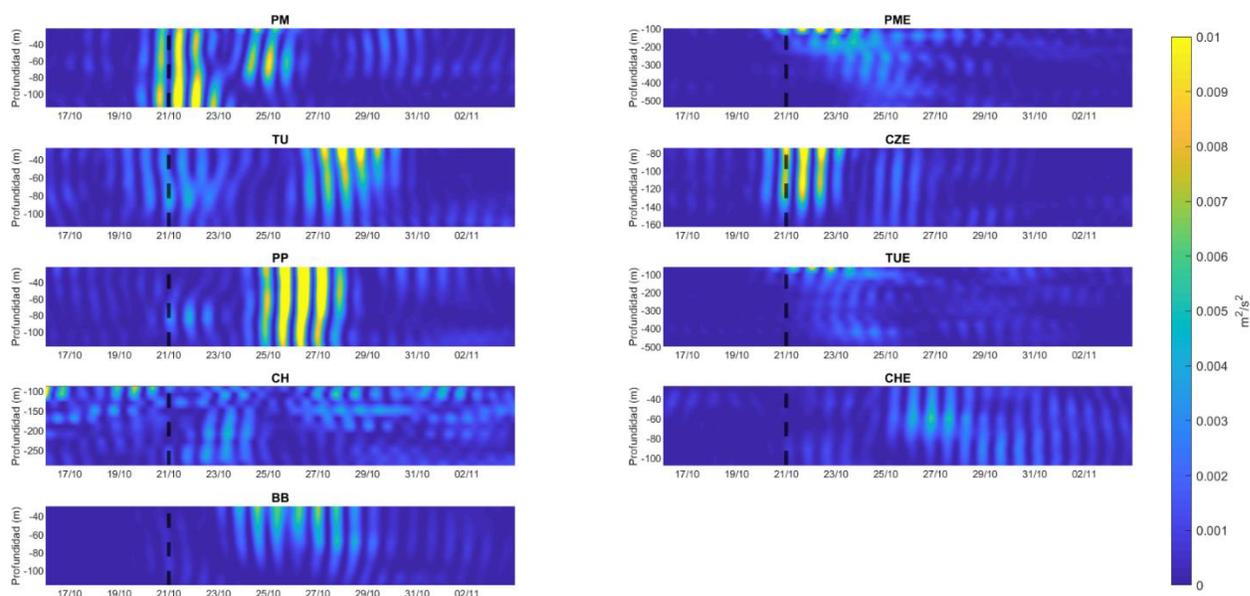
**Figura 32** Transformadas wavelets de la temperatura a diferente profundidad para anclajes costeros (izquierda) y anclajes en alta mar (derecha) del periodo 01 septiembre de 2005 a 20 de diciembre de 2005. La línea punteada negra indica la fecha en que se dio la distancia mínima entre los anclajes y el ojo del huracán Wilma, las líneas negras indican el intervalo de 95% de significancia y las líneas blancas el intervalo de confianza del 95%.

Por otro lado, se observó que los anclajes más cercanos a la trayectoria del huracán Wilma son aquellos cuyas wavelets tienen mayor energía, a excepción de CH y BB en la serie de tiempo de temperatura para el periodo de 15 a 20 días.

### 3.4 Energía cinética de ondas casi-inerciales

La evolución en el tiempo de la energía cinética casi-inercial ( $E_{ci}$ , a partir de ahora) fue calculada para todos los anclajes y se muestra en la Figura 33, donde a la izquierda se encuentran los anclajes cercanos a la costa y a la derecha los anclajes ubicados en el exterior. De los anclajes costeros PM, TU y PP son los más energéticos con valores de  $0.01 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ . En PM que es un anclaje que se encuentra a la derecha de la trayectoria del huracán a 19.9 km, este valor en la  $E_{ci}$  se da un día antes del 21 de octubre de 2005 como respuesta forzada y persiste de los -21 m hasta los -127 m del 20 al 22 de octubre, posteriormente se observa como esta  $E_{ci}$  es transportada hacia abajo, energía de la misma magnitud se activa entre los -60

m y -80 m el día 24 de octubre y también es transportada hacia abajo durante los siguientes tres días como parte de la respuesta libre. En TU un anclaje ubicado a la izquierda de la trayectoria a 52 km se observó que la energía de  $0.01 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  se activa el 27 de octubre desde los -27 m hasta los -80 m y es transportada hacia arriba durante los siguientes 5 días. Esta propagación de la  $E_i$  hacia la superficie está indicada por la propagación de la fase de las ondas hacia el fondo. Probablemente esto representa una reflexión en el fondo (que está a 540 m de profundidad) de ondas inerciales generada por la actividad del huracán alrededor del 21 de octubre. En PP ubicado 95 km al sur de la trayectoria se observó energía de esta magnitud a partir del 24 de octubre y hasta el 27 de octubre desde los -22 m hasta los -118 m atenuándose para el día 28 de octubre.



**Figura 33** Energía Cinética casi inercial ( $E_{ci}$ ) de los 9 anclajes a la derecha se encuentran los anclajes ubicados en el exterior y la izquierda los anclajes más cercanos a la costa, PM y PME son anclajes que se encuentran a la derecha de la trayectoria. La línea negra punteada indica la fecha en que se dio la distancia mínima entre el huracán y cada uno de los anclajes.

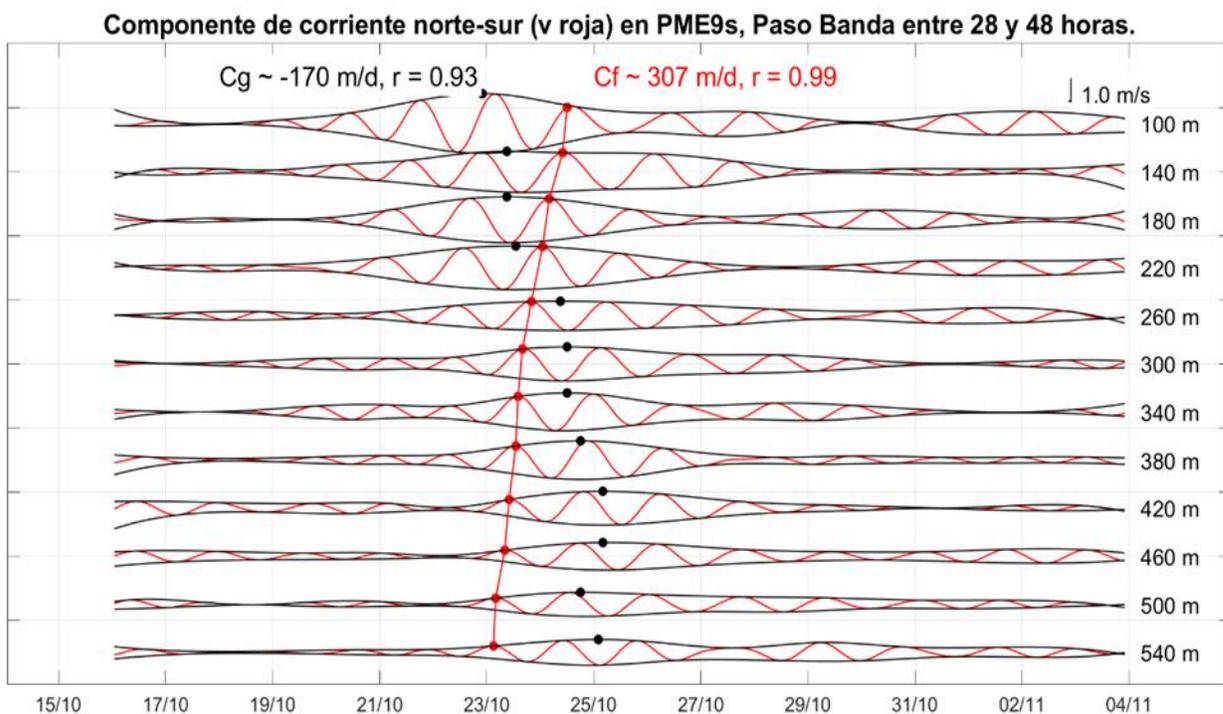
Los anclajes ubicados más al sur de la trayectoria de Wilma son CH a 117 km y BB a 226 m, experimentan valores de  $E_{ci}$  de menor magnitud. En CH que está ubicado sobre un estrecho canal se observó interferencia entre ondas que rebotan con las paredes, fondo y superficie del canal. Por otro lado, en BB que se encuentra fuera del canal, se observaron magnitudes de  $E_{ci} < 0.01 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  que se extienden desde los -29 m hasta aproximadamente los -100 m y es transportada hacia abajo desde el 23 de octubre hasta el 29 de octubre.

En los anclajes ubicados en alta mar, se observó que en PME que se encontraba a la derecha de la trayectoria a 34 km donde se obtuvieron mediciones desde los -90 m hasta los -540 m la  $E_{ci} = 0.01 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  se concentró en los -100 primeros metros desde el 21 de octubre hasta el 23 de octubre posterior a esta fecha y hasta el 27 de octubre la  $E_{ci}$  es  $< 0.01 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  y es transportada hacia abajo. En TUE sucede algo parecido sin embargo la  $E_{ci}$  se vio atenuada debido posiblemente a que es un anclaje que se encuentra a la izquierda de la trayectoria a 36 km de la trayectoria. Por otro lado, en CZE que también se encuentra a la izquierda de la trayectoria a 10 km, se observó  $E_{ci} = 0.01 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  del 21 al 22 de octubre de los -75 a los -120 m, después de esta fecha y a profundidad la energía es mucho menor. Por último, en CHE se observó  $E_{ci} < 0.01 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  del 26 al 31 de octubre que es transportada hacia abajo.

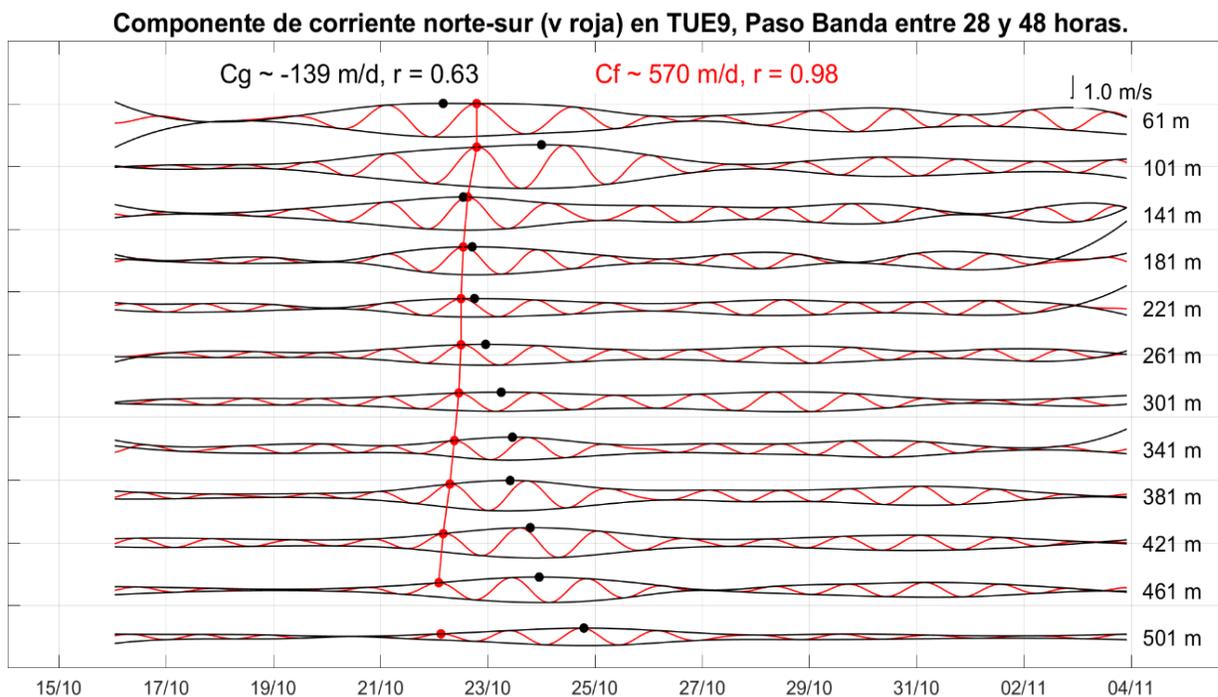
### 3.5 Propagación de ondas casi-inerciales

Para mostrar mejor la propagación vertical de las ondas casi-inercial se utilizó el análisis de envolventes hecho por Pallás et al., (2016a) para los anclajes PME, TUE y CHE (se utilizan estos anclajes ya que representan mejor la propagación en la vertical, debido a que los demás anclajes tienen poca extensión vertical y se encuentran dentro de la capa de mezcla. Este análisis nos permitió calcular la velocidad de grupo vertical ( $C_{gz}$ ) y la velocidad de fase vertical ( $C_{fz}$ ) siguiendo los puntos máximos de la envolvente que engloba el paquete inercial y en el caso de la velocidad de fase siguiendo las crestas que se generan al borde del paquete, una vez localizados estos puntos se les ajusta una línea utilizando el método de mínimos cuadrados siendo la pendiente de las rectas la  $C_{gz}$  y  $C_{fz}$ .

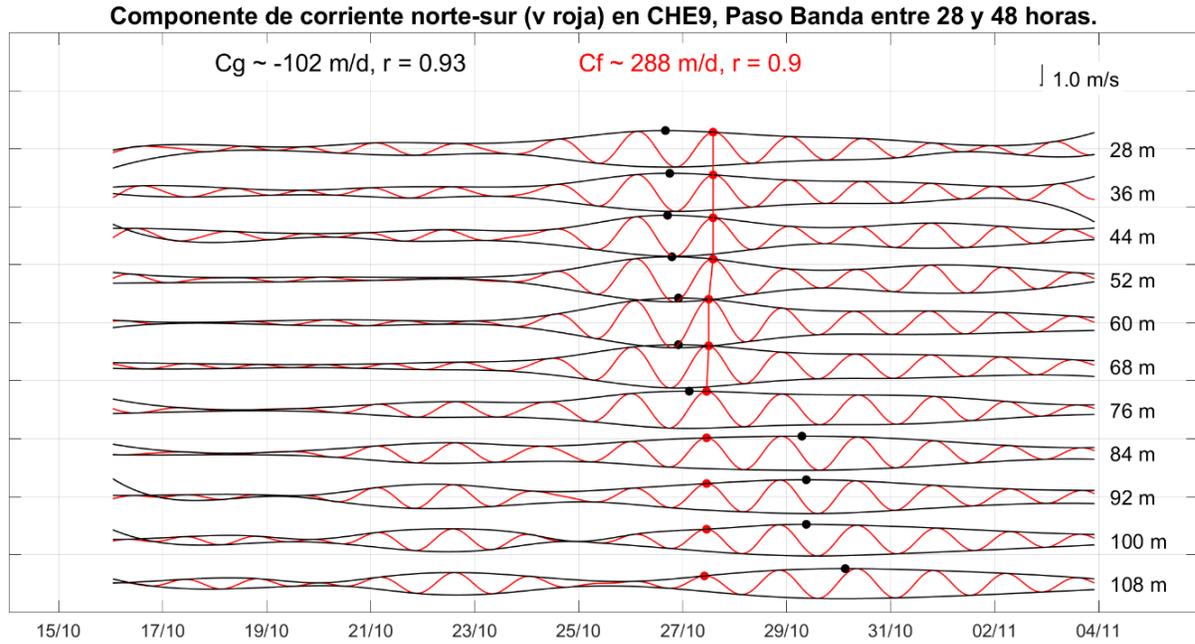
En los tres anclajes se observó una de las características más importantes de las ondas casi-inerciales y es que, si la  $C_{gz}$  se propaga hacia el fondo, la  $C_{fz}$  se propaga hacia la superficie y viceversa (Gill, 1982). En PME (Fig. 34) los valores de  $C_g$  y  $C_f$  son  $-170 \text{ m d}^{-1}$  y  $307 \text{ m d}^{-1}$  respectivamente, la propagación en este anclaje se da desde los -100 m hasta los -540 m a partir del 23 de octubre. En TUE (Fig. 35) los valores de  $C_{gz}$  y  $C_{fz}$  son  $-139 \text{ m d}^{-1}$  y  $570 \text{ m d}^{-1}$  respectivamente, propagándose desde los -61 m hasta los 461 m el a partir del 22 de octubre. En CHE (Fig.36) los valores de  $C_{gz}$  y  $C_{fz}$  son  $-102 \text{ m d}^{-1}$  y  $288 \text{ m d}^{-1}$  respectivamente, y sucedió el 27 de octubre de los -28 m a los -76 m. Los valores más pequeños de  $C_{gz}$  y  $C_{fz}$  se dan en CHE y el más grande de  $C_{gz}$  se da en PME, mientras que, el valor máximo de  $C_{fz}$  se da en TUE.



**Figura 34** Envolvente de la componente v de la corriente en PM9 filtrada por paso-banda de 24 a 48 horas en función de la profundidad de -100 m a -540 m. Donde r es el coeficiente de correlación.



**Figura 35** Envolvente de la componente v de la corriente en TUE9 filtrada por paso-banda de 24 a 48 horas en función de la profundidad de -61 m a -501 m. Donde r es el coeficiente de correlación.



**Figura 36** Envoltura de la componente  $v$  de la corriente en CHE9 filtrada por paso-banda de 24 a 48 horas en función de la profundidad de -28 m a -108 m. Donde  $r$  es el coeficiente de correlación.

Las estimaciones crudas que nos proporcionan estos cálculos en PME9s (Fig. 34), es decir,  $C_{gz} \sim -0.002$  m/s, dan pie para investigar algunas otras propiedades de las ondas que observamos. Para ello recurriremos a la teoría.

La relación de dispersión para ondas gravitatorias casi-inerciales sobre un flujo en balance (geostrófico) puede escribirse (Kunze,1985; Pallas-Sanz et al., 2006) como,

$$\omega \cong f_e + \frac{N^2 k_H^2}{2 f_i k_z^2} + \frac{1}{k_z} \left( \frac{\partial U_g}{\partial z} k_y - \frac{\partial V_g}{\partial z} k_x \right) \quad (9)$$

donde  $\omega$  es la frecuencia intrínseca,  $f_i$  es la frecuencia inercial debido a la latitud del sitio,  $f_e$  es la frecuencia efectiva que ocasiona la presencia de la vorticidad vertical creada por la corriente geostrófica  $(U_g, V_g)$  ambiente, i.e.,  $f_e \approx f + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_g}{\partial x} - \frac{\partial U_g}{\partial y} \right)$ .  $k_H = (k_x, k_y)$  es el número de onda horizontal,  $k_z$  el número de onda vertical y  $N$  la frecuencia de flotabilidad ( $N = \sqrt{-\alpha_o g \partial \rho / \partial z}$ ;  $\alpha_o = 1/\rho_o$ ,  $\rho_o$  la densidad media,  $\rho$  la densidad y  $g$  la aceleración de la gravedad).

A partir de la relación de dispersión podemos obtener las velocidades de grupo vertical y horizontal de las ondas gravitatorias casi-inerciales

$$C_{gz} \cong \frac{\partial \omega}{\partial k_z} = -\frac{N^2 k_H^2}{f_i k_z^3} - \frac{1}{k_z^2} \left( \frac{\partial U_g}{\partial z} k_y - \frac{\partial V_g}{\partial z} k_x \right) \quad (10)$$

y

$$C_{gH} = -\beta^{-1} C_{gz} \quad (11)$$

donde  $\beta = k_H/k_z$  es el ángulo de propagación con respecto a la vertical.

Suponiendo un número de onda horizontal isotrópico,  $k_x = k_y = \pi\sqrt{2}/\lambda_H$ ,  $\therefore k_H = \sqrt{2}k_x$  tenemos,

$$C_{gz} = -\frac{N^2 k_H^2}{f_i k_z^3} - \frac{k_H}{\sqrt{2} k_z^2} \left( \frac{\partial U_g}{\partial z} - \frac{\partial V_g}{\partial z} \right) \quad (12)$$

La Figura 27 muestra el modo libre en la estación PME9s. En el periodo justo antes del 25 de octubre, que coincide con la amplitud máxima del modo, obtenemos una  $f_e$  de  $0.6734 \text{ d}^{-1} = 4.9 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$  (tabla 4), que es ligeramente inferior a la frecuencia inercial ambiente, i.e.,  $\Delta f = -2.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ . La estructura vertical de este modo abarca más de 400 m de la columna de agua, por lo que debe estar muestreando razonablemente bien la vorticidad vertical. También, a partir de esta gráfica, se puede obtener una estimación de la longitud de onda vertical  $\lambda_z \sim 400 \text{ m}$ , con lo cual  $k_z \sim 1.57 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ .

Se consideran magnitudes razonables para los parámetros en (12), es decir,  $N = \sim 1.08 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  y  $f_i = 5.13 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Una estimación del término  $\left( \frac{\partial U_g}{\partial z} - \frac{\partial V_g}{\partial z} \right)$  se puede obtener directamente de los datos usando las componentes sub-inerciales de las corrientes observadas en este anclaje. Para ello, aplicamos un filtro subinercial de 7 días a las componentes de corriente en todos los niveles, aislamos 20 horas alrededor de 2005/10/24/4 (que es el día y hora en que se da el máximo para el modo libre), calculamos los gradientes verticales y promediamos en tiempo. Posteriormente, un promedio vertical de los primeros 500 metros nos da:  $\partial(|U_g|, |V_g|)/\partial z \cong (2.54, 9.38) \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . Resolviendo (12) para  $k_H$ , tenemos  $\lambda_H \cong 113 \text{ km}$  (las dos raíces de (12) dan magnitudes similares para  $k_H$ ). Por lo tanto,  $\beta = 3.5 \times 10^{-3}$ , y usando (11),  $C_{gH} = 056 \text{ m/s}$  (48 km/d).

## Capítulo 4. Discusión

---

La intención de este trabajo es describir la respuesta que se observó en el Caribe mexicano tras el paso del huracán Wilma, se encontraron distintas respuestas y características de cada una. Al analizar las series de tiempo de corriente se encontró que se produjo una inversión de esta hacia el sur en CH (Fig. 10), CHE (Fig. 42) y BB (Fig. 45) que se dio alrededor de 6 días después del paso del huracán Wilma y duró aproximadamente 38 días (~ del 01 de noviembre al 08 de diciembre de 2005), esta inversión se debió a un giro ciclónico que se estacionó en el sur del Caribe mexicano después del paso de Wilma. En la Figura 37 se observó la evolución de este giro ciclónico, el 01 de octubre se encontraba al oeste de Banco Chinchorro (región donde estaban ubicados los 3 anclajes), posterior al paso de Wilma se comenzó a desplazar en dirección este, para comenzar a estacionarse en la zona de Banco Chinchorro entre el 01 y el 05 de noviembre, duró todo el mes de noviembre y primeros días diciembre cuando comenzó a desintegrarse, para el 12 de diciembre el giro ciclónico estaba completamente desintegrado y la corriente apuntaba hacia el norte, como es el promedio en esta zona según el estudio de Cetina et al. (2006).

Por otro lado, al aplicar filtros pasa-banda de entre 24 y 48 horas (para aislar la banda inercial), se encontró que hay una mezcla de rotaciones ciclónicas y anticiclónicas en la mayoría de los anclajes antes, durante y después del paso del huracán Wilma, sin embargo, estas rotaciones se ven reforzadas tras su paso, por lo tanto, este análisis no permitió distinguir los tipos de respuesta tras el paso de Wilma por el Caribe. Por esto, se realizó un análisis de FEOCs que mostró que tras el paso del huracán Wilma sobre el Caribe mexicano se produjeron dos tipos de respuesta, la respuesta forzada y la libre tal como lo muestra Price et al. (1983). La respuesta forzada se generó inmediatamente tras el paso del huracán Wilma y se trató de un giro ciclónico que se observó en anclajes al norte y pegados a la costa como son PM (fig. 20 y 21), CZE (fig. 52 y 53), TU (fig. 54 y 55) y PP (fig. 58 y 59), esta respuesta duró un periodo inercial, posiblemente porque el huracán Wilma se estacionó por 72 horas en la Península de Yucatán debido a una presión alta atmosférica ubicada al norte del Caribe mexicano, además, esta respuesta tuvo un alcance de 95 km al sur de la trayectoria en PP, lo que se traduce en ~ 3 veces el radio de vientos máximos ( $R_{max}$ ) que fue de 32 km. La segunda respuesta es la libre y se dio aproximadamente dos días después del paso del huracán Wilma, dependiendo del anclaje que se analice, se trató de una rotación anticiclónica que tuvo una duración distinta según el anclaje. Una respuesta libre interesante se dio en BB donde no hubo respuesta forzada, pero si dos tipos de respuesta libre una que se dio el 25 octubre y se trató de una rotación

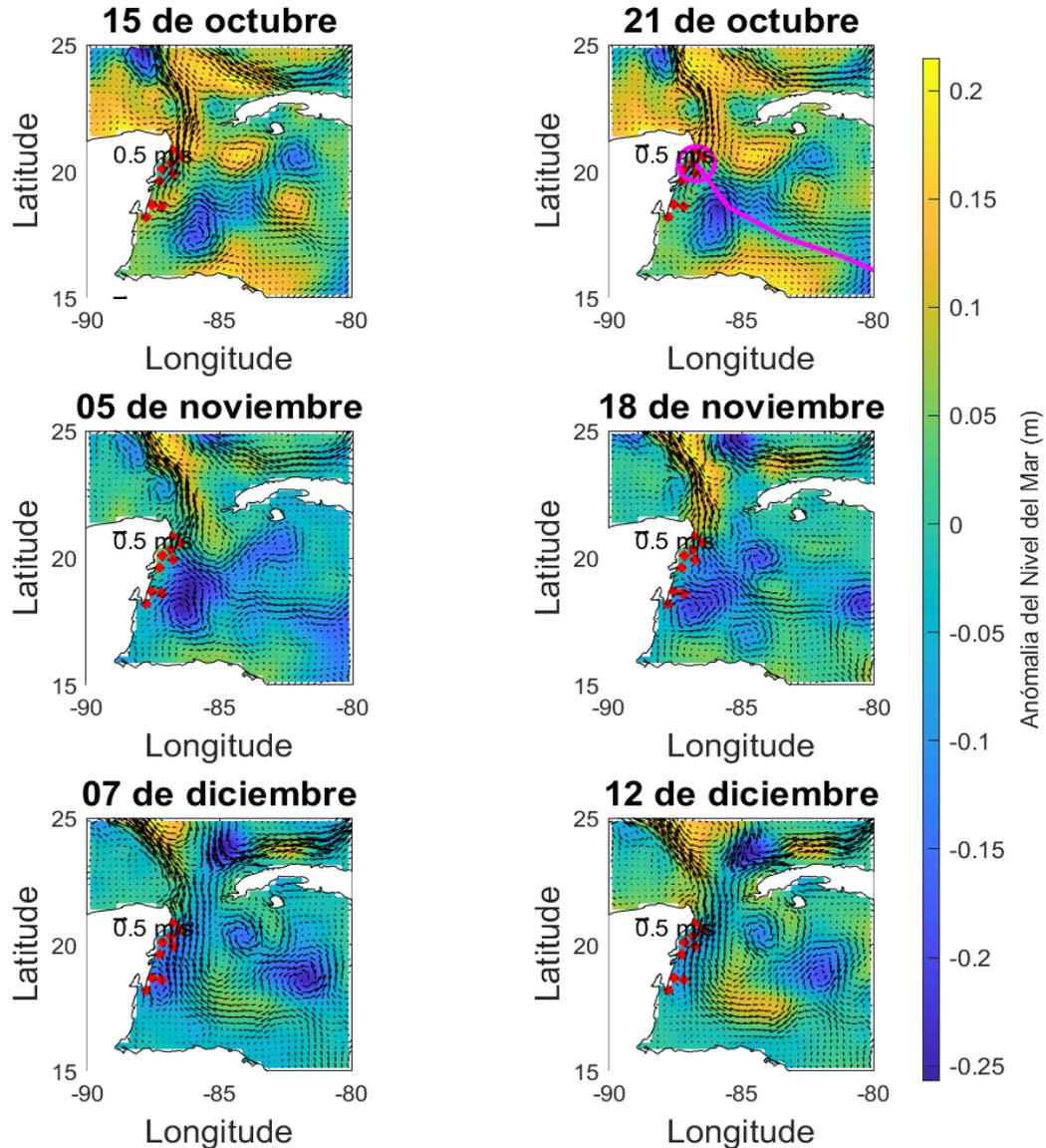
anticiclónica, y la otra se dio el 27 de octubre y es una rotación ciclónica, esto puede darse debido a la superposición de ondas y a la diferencia en el patrón de cada modo.

Para poder clasificar mejor las señales observadas se realizaron transformadas wavelets en todos los anclajes observando que durante el paso de Wilma se activaron señales con periodos desde 1 día hasta 20 días, esta respuesta no se observó con el paso de la tormenta tropical Stan el 03 de octubre, ni con el huracán categoría 4 Emily que paso rápidamente el 19 de julio (fig. 38). Una respuesta tan intensa como la de Wilma pudo deberse como ya se mencionó a la cantidad de días que permaneció estacionado en la región. Otra característica importante mostrada por el análisis de wavelets fue que la potencia se atenúa hacia altamar (tanto para las wavelets de corriente como para las de temperatura) lo cual es una característica importante de la Ondas Atrapadas a la Costa (OAC). Tal como describió Thomson (1879) (mejor conocido como Lord Kelvin) oscilaciones gravitacionales largas (en comparación con la profundidad) que viajan en la superficie de un océano homogéneo apoyándose contra la costa y decaen exponencialmente en alta mar.

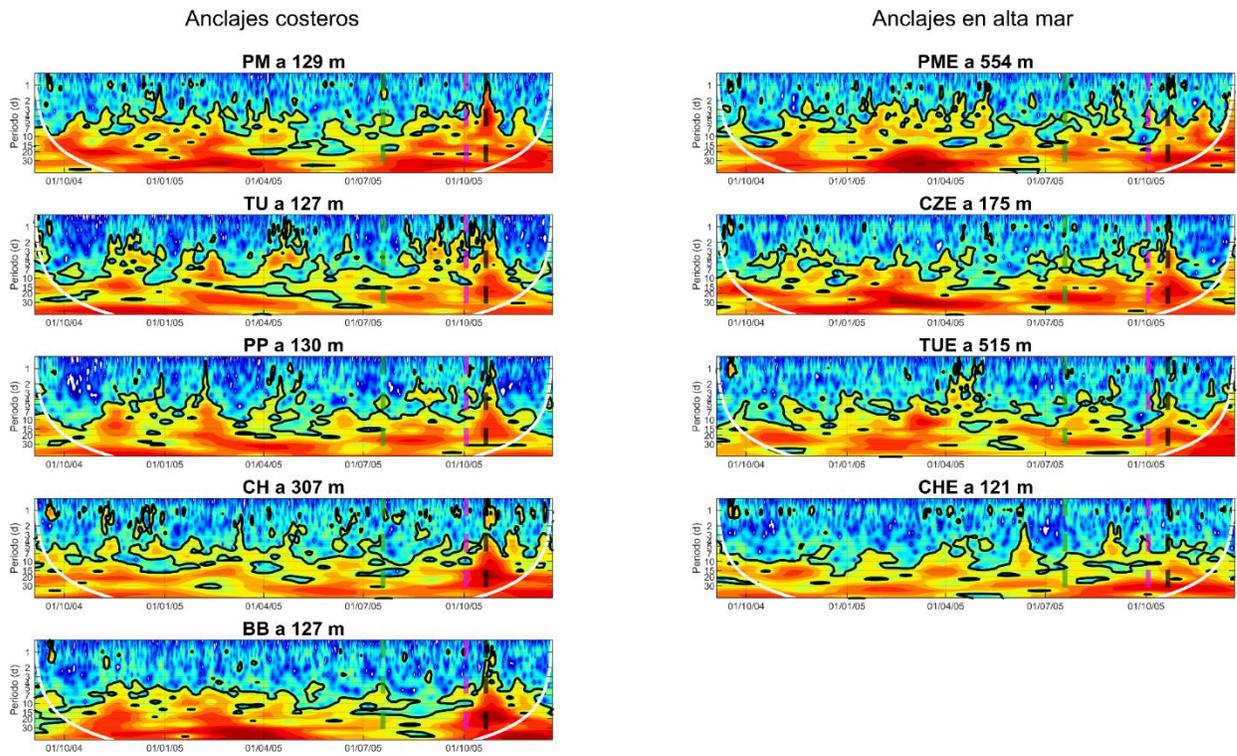
Las series de tiempo de temperatura filtradas con pasa-banda, uno para periodos casi inerciales de 24 a 48 horas (debido a que sabemos que en la región el periodo casi inercial está entre las 34 y 38 horas) y otro para periodos entre 3 y 8 días, muestran ondas casi inerciales que se vieron reforzadas tras el paso del huracán Wilma, y ondas con periodos de entre 3 y 8 días con una velocidad de fase de 4.13 m/s que aproximadamente coincide con la velocidad de fase teórica de 4.07 m/s para OAC (David Rivas, comunicación personal). Es bien sabido que este tipo de ondas se propaga pegada a la costa y viajan hacia el sur de esta (con la costa a la derecha en el hemisferio norte) tal como lo menciona Pearce (2011) en su tesis de maestría. En este caso se tienen desfases negativos entre las estaciones a lo largo de la costa por lo tanto podemos decir que estas ondas se están propagando hacia el sur, esto aunado a los resultados vistos en las wavelets de corriente (Fig. 31) y temperatura (Fig. 32) de anclajes costeros y anclajes ubicados en alta mar donde se observa la atenuación de la potencia hacia mar abierto.

Por otro lado, la  $EC_i$  (fig. 33) nos muestra una propagación de la energía de las ondas casi inerciales hacia el fondo en PM, PME, CZE, TUE, CHE y BB. Además, de un aumento de energía inmediato al paso del huracán Wilma que fue más intenso en anclajes costeros como son PM, TU, PP y CZE. Por otro lado, en CH debido a su ubicación dentro del canal de Chinchorro no fue posible observar propagación de energía casi inercial debido a la reflexión de las ondas en las paredes, superficie y el fondo donde las ondas rebotan causando interferencia. Las envolventes reforzaron la observación de propagación hacia el fondo en PME, TUE y CHE, además, de que permitió calcular la  $C_{gz}$  y  $C_{fz}$ , en este cálculo se pudo observar una característica

importante de las ondas casi-inerciales que fue la propagación hacia el fondo de la energía indicado por una  $C_{gz}$  negativa y hacia la superficie de la fase indicado por  $C_{fz}$  positiva. Además, a partir de los resultados de las envolventes, los FEOCs verticales (donde  $\lambda_v \approx 400$  m) y utilizando la ecuación de dispersión de las ondas casi-inerciales (Ec. 9) fue posible obtener la  $\lambda_H \approx 113$  m y  $C_{gH} = 0.56$  m/s en PMEs, solo se calcularon estos parámetros en este anclaje ya que, por su configuración vertical más clara, fue el único que permitió hacerlo.



**Figura 37** Nivel del mar absoluto (colores) y corriente geostrófica (vectores) para diferentes fechas entre el 15 octubre y 12 de diciembre, donde se muestra la evolución temporal de un remolino ciclónico ubicado al sur oeste de la Península de Yucatán, basados en la base de datos de AVISO. Los puntos rojos indican la ubicación de los 9 anclajes, la línea magenta la trayectoria del huracán y el círculo rosa, el radio de vientos máximos de 32 km del huracán Wilma.



**Figura 38** Transformadas wavelets de la temperatura a diferente profundidad para anclajes costeros (izquierda) y anclajes en alta mar (derecha) del periodo septiembre de 2005 a diciembre de 2005. Las líneas negras indican el intervalo de 5% de confianza y las líneas blancas el 95% de confianza. La línea punteada negra indica el 21 de octubre de 2005 fecha en la que Wilma tocó tierra en Cozumel como huracán categoría 4, la línea punteada magenta indica el 03 de octubre de 2005 fecha en la que Stan tocó tierra al sur de Cozumel como tormenta tropical y la línea punteada verde indica el 19 de julio de 2005 fecha en la que el huracán Emily tocó tierra en Playa de Carmen como huracán categoría 4.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

Mediante el uso de FEOCs verticales se lograron identificar dos tipos de respuesta tras el paso del huracán Wilma al norte del Caribe mexicano. La primera fue la respuesta forzada que sucedió inmediatamente al paso del huracán y duró un periodo inercial, se trató de una rotación ciclónica en los anclajes costeros ubicados al norte del Caribe mexicano. La segunda respuesta fue la libre que se dio aproximadamente dos días después del paso del huracán y se trató de una rotación anticiclónica asociado a ondas. El tiempo de respuesta de los anclajes está directamente relacionado con la distancia mínima que tuvieron con el huracán, respondiendo primero los anclajes al norte del Caribe mexicano y por último los anclajes al sur en ambas respuestas.

El análisis de series filtradas con pasa banda de entre 28 y 48 horas muestra una rotación anticiclónica correspondiente a ondas casi-inerciales, que tienen como características una propagación de la  $C_{gz}$  hacia el fondo y de la  $C_f$  hacia la superficie desde los -100 m hasta los -500 m en PME y TUE y de los -28 m a los 118 m en CHE, las ondas viajan a una  $C_{gz}$  de entre  $-102 \text{ m d}^{-1}$  en CHE hasta  $170 \text{ m d}^{-1}$  en PME y a una  $C_{fz}$  de  $288 \text{ m d}^{-1}$  en CHE hasta  $570 \text{ m d}^{-1}$ . Por otro lado, las ondas muestran una magnitud de  $E_c \approx 0.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  siendo los anclajes costeros ubicados al norte del Caribe mexicano los más energéticos (PM, TU, PP y CZE), en CH ocurre una excepción debido a su ubicación dentro del canal de Chinchorro las ondas rebotan en las paredes y fondo no permitiendo ver adecuadamente la señal.

Fue posible calcular algunas características de la onda casi inercial en PMEs una estación donde se midió la columna de agua desde los 100 hasta los 540 m de profundidad. Encontrando que la onda tiene en la vertical una  $C_{gz} \approx 0.17 \text{ km/d}$  y una  $\lambda_z \approx 400 \text{ km}$ , mientras que en la horizontal tiene una  $C_{gH} \approx 48 \text{ km/d}$  y una  $\lambda_H \approx 113 \text{ km}$ , lo que nos indica que es más rápida en su desplazamiento horizontal que el vertical, donde es mucho más lenta.

Además, el análisis de series de tiempo de temperatura muestra la formación de ondas con un periodo entre 3 y 8 días que también se muestra en el análisis de Wavelets en los anclajes pegados a la costa y que se ve atenuada en los anclajes de alta mar. El análisis de series de tiempo mostró un desfase negativo entre las estaciones a lo largo de la costa, lo cual indica una propagación hacia el sur (con la costa a la derecha) de la señal que empieza desde PM y termina en BB, esta onda tiene una  $C_f$  de  $4.13 \text{ m s}^{-1}$  que coincide con la  $C_f$  teórico de  $4.07 \text{ m s}^{-1}$ , todos estos indicios confirman la formación de una Onda Atrapada a la Costa por el forzamiento directo de Wilma.

Por otro lado, se dio una inversión hacia el sur de la corriente por un corto periodo de tiempo cuya magnitud no fue observada en un periodo de medición de 2002 a 2018 en el anclaje de PM ubicado sobre la corriente de Yucatán. Otra inversión importante de la corriente se dio al sur del Caribe Mexicano en CH, CHE y BB donde la corriente se invirtió hacia el sur seis días después del paso del huracán por  $\sim 38$  días, esto se debió a un remolino ciclónico que se estacionó del 05 de noviembre al 10 de diciembre sobre la región de Banco Chinchorro.

## Literatura citada

---

- Cetina, P., Candela, J., Sheinbaum, J., Ochoa, J., y Badan, A., 2006. Circulation along the Mexican Caribbean coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(8), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2005JC003056>
- Emery, W., R. Thomson., 1997. *Data Analysis methods in physical oceanography*. Elsevier, Second edition, Amsterdam, 638pp.
- Kunze, E., 1985. Near-inertial wave propagation in geostrophic shear. *J. Phys. Oceanography*. 15, 544–565.
- Kuo H. -H., y Ichiye T., (1977). A numerical study of the response of a barotropic ocean to a moving hurricane. *Universidad A&M de Texas*. 29, 561 – 571. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v29i6.11390>
- Lu, M. Z., y Huang, X. R., (2010). The Three-Dimensional Steady Circulation in a Homogenous Ocean Induced by a Stationary Hurricane. *Journal of Physical Oceanography*. 40, 1441 – 1457. [DOI: 10.1175/2010JPO4293.1](https://doi.org/10.1175/2010JPO4293.1)
- Oey, L. Y., Ezer, T., Wang, D. P., Fan, S. J., y Yin, X. Q., 2006. Loop Current warming by hurricane Wilma. *Geophysical Research Letters*, 33(8), 10–13. <https://doi.org/10.1029/2006GL025873>
- Ochoa, J., J. Sheinbaum, A. Badan, J. Candela y W.D. Wilson. 2001. Geostrophy via potential vorticity inversion in the Yucatan Channel. *J. Mar. Res.* 59: 725-747p.
- Pallàs-Sanz, E., Candela, J., Sheinbaum, J., & Ochoa, J., 2016a. Mooring observations of the near-inertial wave wake of Hurricane Ida (2009). *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 76, 325–344. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2016.05.003>
- Pallàs-Sanz, E., Candela, J., Sheinbaum, J., Ochoa, J., y Jouanno, J., 2016b. Trapping of the near – wave wakes of two consecutive hurricanes in the Loop Current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 175(4449), 238. <https://doi.org/10.1038/175238c0>
- Pasch, R. J., Blake, E. S., Cobb, H. D., y Roberts, D. P., 2006. Tropical Cyclone Report: Hurricane Wilma. *National Hurricane Center-USA*, 1(October 2005), 27. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Pearce, M. S., (2011). Coastal Trapped Waves Generated by hurricane Andrew on the Texas – Louisiana shelf. Tesis de maestría de la Universidad A&M de Texas. 64
- Price, J. F., Sanford, T. B., & Forristall, G. Z., 1994. Forced stage response to a moving hurricane. In *Journal of Physical Oceanography*, 24(2), pp. 233–260. [https://doi.org/10.1175/15200485\(1994\)024<0233:FSRTAM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200485(1994)024<0233:FSRTAM>2.0.CO;2)

- Price, J. F., 1980. Upper ocean response to a hurricane. *Journal of Physical Oceanography* 11(2), 153–175. <https://doi.org/10.1575/1912/10271>
- Rivas, D., (2017). Wind-driven coastal-trapped waves off southern Tamaulipas and northern Veracruz, western Gulf of Mexico, during winter 2012-2013. Elsevier: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. (185) 1-10.
- Sanford, T. B., Black, P. G., Haustein, J. R., Feeney, J. W., Forristal, G. Z., y Price, J. F., (1987) Ocean Response to a Hurricane. Part I: Observations. *Journal of Physical Oceanography*, 17: 2065-2083
- Sanford, T. B., Price, J. F., y Girton, J. B., 2010. Upper-ocean response to hurricane Frances (2004) observed by profiling EM-APEX floats. *Journal of Physical Oceanography*, 41(6), 1041–1056. <https://doi.org/10.1175/2010JPO4313.1>
- Sheinbaum, J., J. Candela, A. Badan y J. Ochoa. 2002. “Flow structure and transport in Yucatan Channel”. *Geophys. Res. Lett.*, 29(3): 1040, doi:10.1029/2001GL013990, 2002.
- Thomson, S. W. (1879), On gravitational oscillations of rotating water, *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 10, 92–100.

## Anexo A

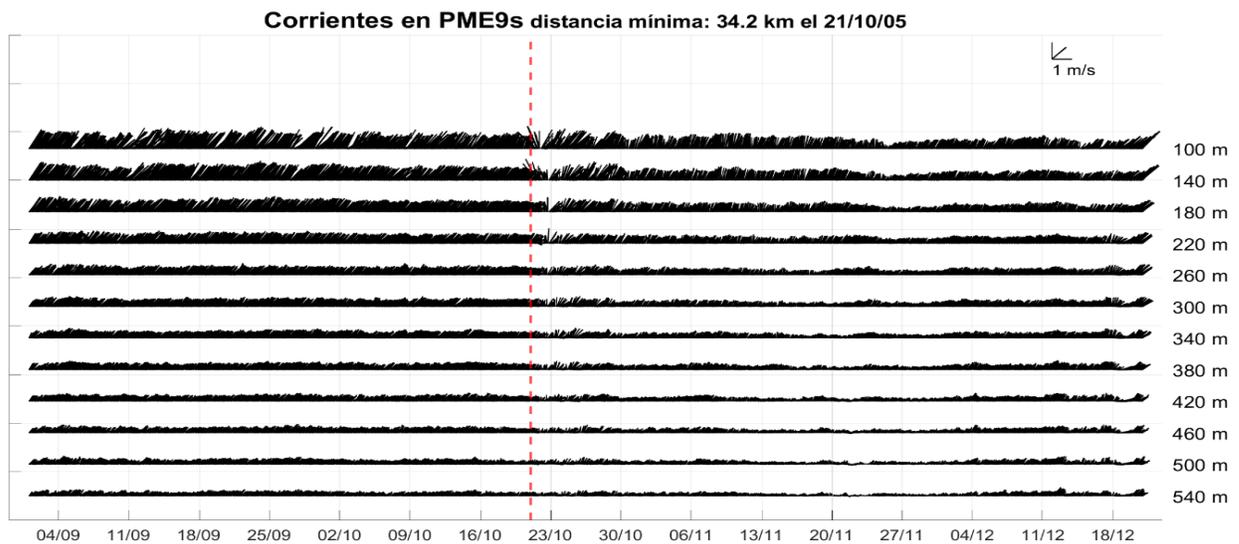
---

En PME que es un anclaje que queda a la derecha de la trayectoria del huracán, la corriente en este anclaje se midió de los 100 m a los 540 m de profundidad y también en una capa más profunda entre los 1091 m a los 1147 m de profundidad. En la parte somera (100 m – 180 m de profundidad) la corriente iba en dirección norte antes del paso de Wilma, pocas horas después de que sucediera la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje la corriente cambio su dirección al noroeste e inmediatamente después al noreste, este efecto duró pocas horas. En el resto de la columna de agua no se observó algún cambio significativo tras el paso de Wilma. En el fondo el comportamiento de la corriente es un tanto aleatorio, sin embargo, tras el paso de Wilma se observa un aumento en la magnitud de la corriente y que esta se fija en dirección sur por al menos tres días. Por otro lado, cinco días después del evento se observa que la corriente que va en dirección norte aumenta su magnitud y se invierte rápidamente hacia el sur, esta respuesta dura aproximadamente dos semanas.

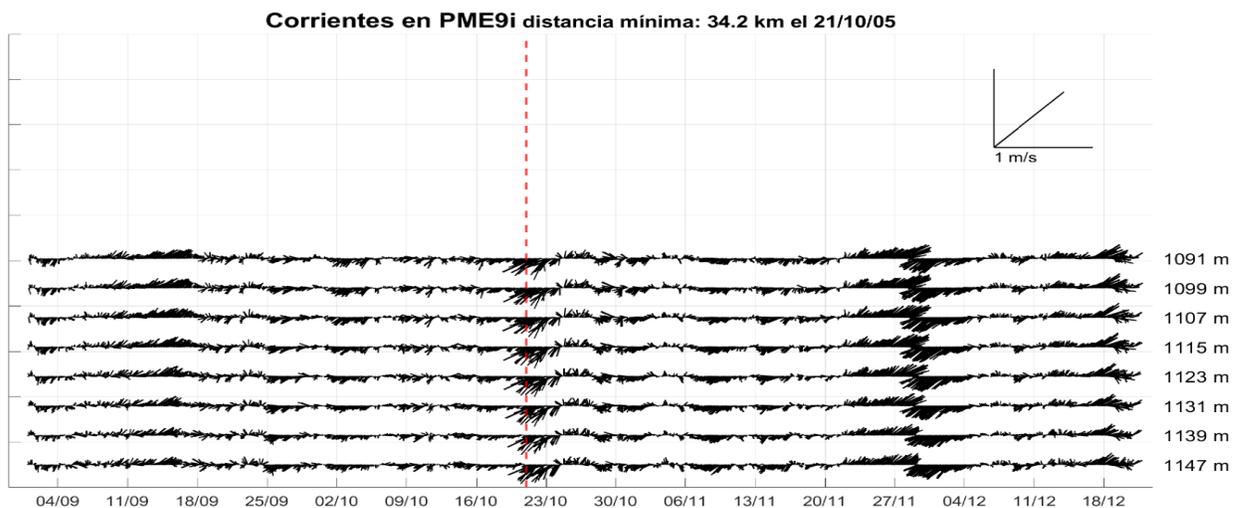
Otro anclaje que midió la corriente en alta mar fue el ubicado en TUE, sin embargo, este anclaje quedo a la izquierda de la trayectoria de Wilma al igual que CHE. En TUE la corriente se invirtió hacia el sur por al menos dos días de los 61 m a los 181 m de profundidad, en el resto de la columna se tuvo una disminución de la magnitud de la corriente. En CHE la corriente también se invirtió hacia el sur de los 28 m a los 108 m de profundidad y también duró entre uno y dos días; pero esta inversión ocurrió un día antes de que se diera la distancia mínima; la corriente recuperó su dirección hacia el norte por cinco días después de los cuales tuvo dos periodos de inversión hacia el sur el primero duró dos semana y media, y el segundo tres semanas.

Los anclajes cercanos a la costa son TU, PP, BB y se describirá su respuesta a continuación, además, es importante mencionar que estos tres anclajes quedaron a la izquierda de la trayectoria del huracán Wilma. En TU se tuvo una inversión de la corriente hacia el sur de los 27 m a los 99 m de profundidad que duró tres días, esta inversión fue más intensa en los primeros 59 m de profundidad, después la corriente recupera su dirección hacia el norte por una semana, disminuyendo la magnitud de la corriente por alrededor de cinco semanas y media. El comportamiento de la corriente en el fondo es aleatorio entre el norte y el sur, tras ocurrir la distancia mínima se observa un ligero aumento de la corriente que duró aproximadamente cinco días.

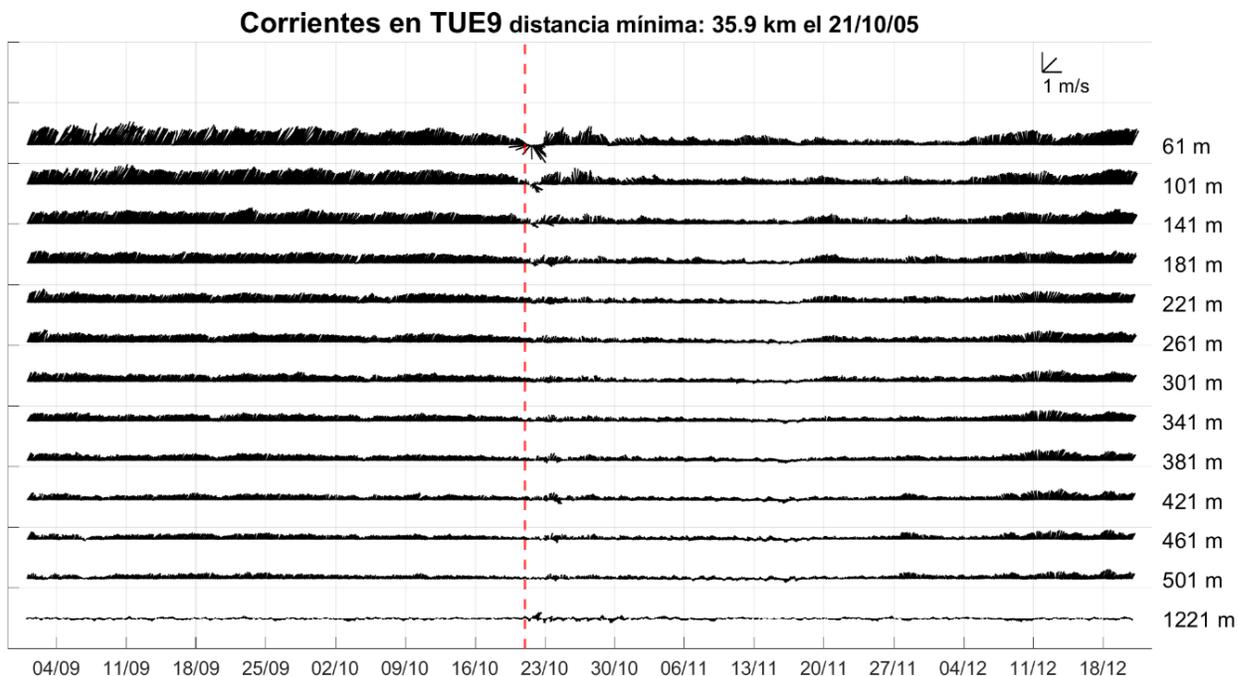
En PP se observó una inversión hacia el sur y una disminución de  $\sim 0.2$  m/s de la corriente de los 22 m a los 86 m de profundidad, y además también se observó una semana después de este evento una disminución de  $\sim 0.3$  m/s de la magnitud de la corriente que duró aproximadamente cinco semanas. Por último, en BB se observó que el día en que ocurrió la distancia mínima la corriente se invirtió hacia el sur por algunas horas de 29 m a los 61 m de profundidad, y recuperó su dirección hacia el norte además de aumentar su magnitud  $\sim 0.3$  m/s por una semana, para posteriormente invertirse nuevamente hacia el sur y disminuir la magnitud de la corriente por aproximadamente cinco semanas, igual que ocurrió en CH y CHE.



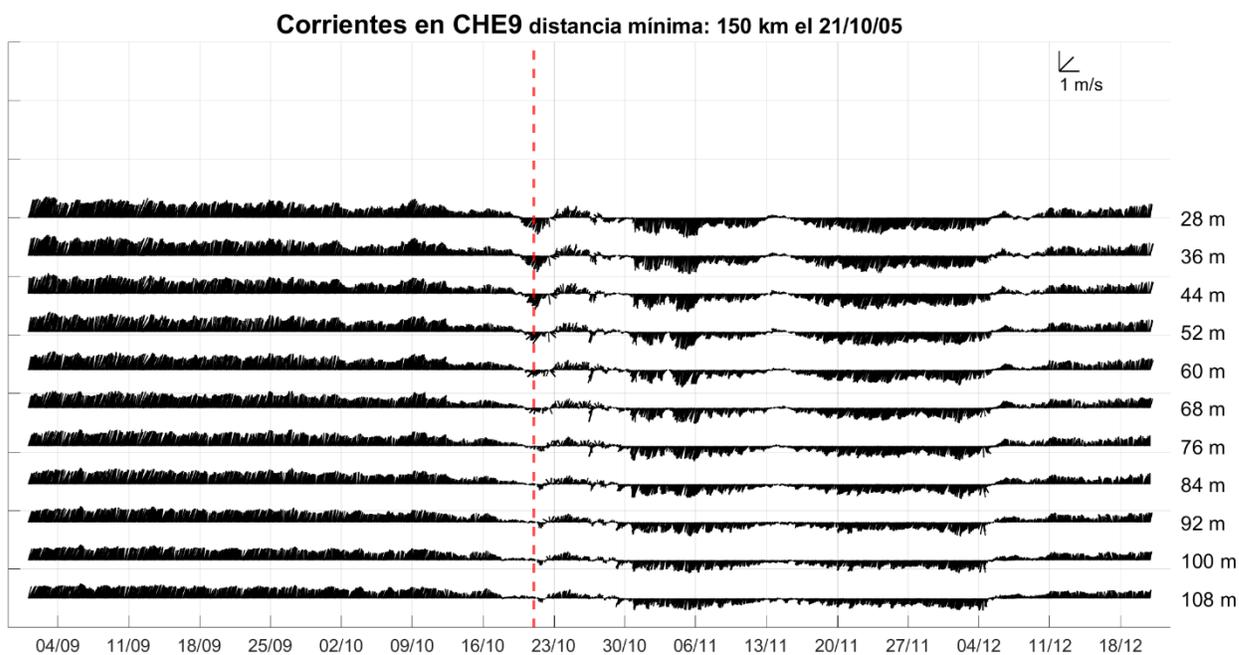
**Figura 39** Series de tiempo de la corriente (m/s) en la parte superior de la columna de agua (-100 m a -540 m) en el anclaje PME9s. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 22 de octubre de 2005.



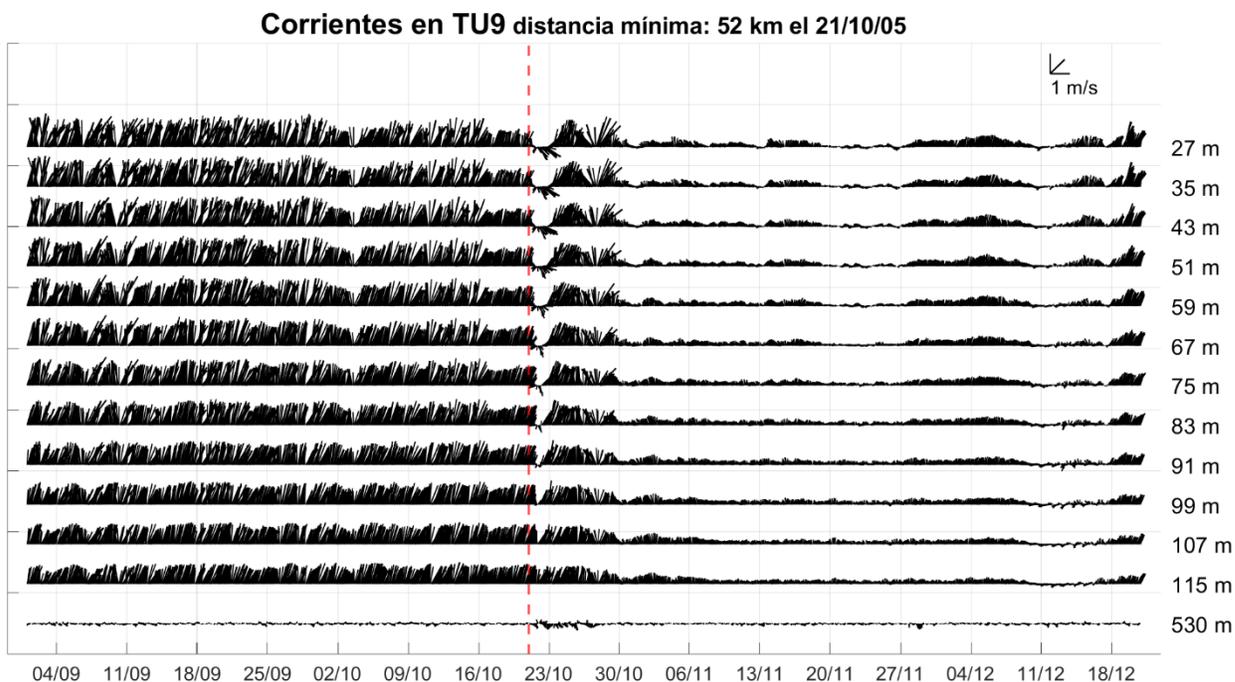
**Figura 40** Series de tiempo de la corriente (m/s) profunda (-1091 m a -1147 m) en PME para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.



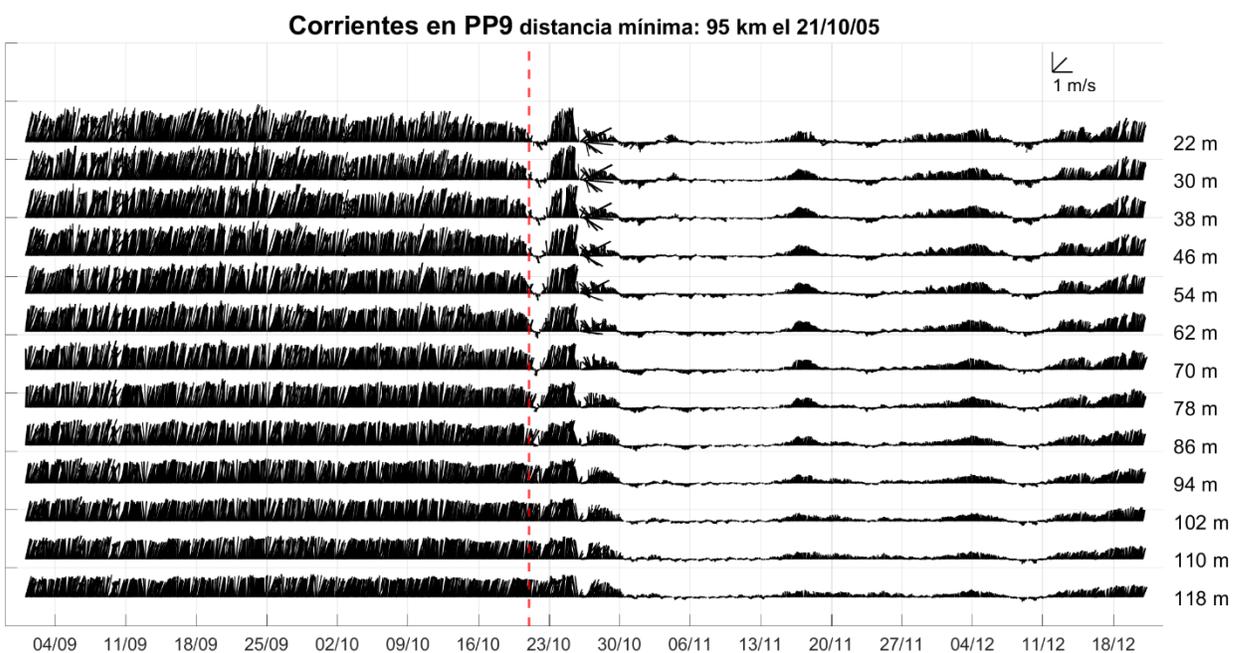
**Figura 41** Series de tiempo de la corriente (m/s) en la parte superior de la columna de agua (-61 m a -501 m) y profunda (-1221 m) en TUE para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.



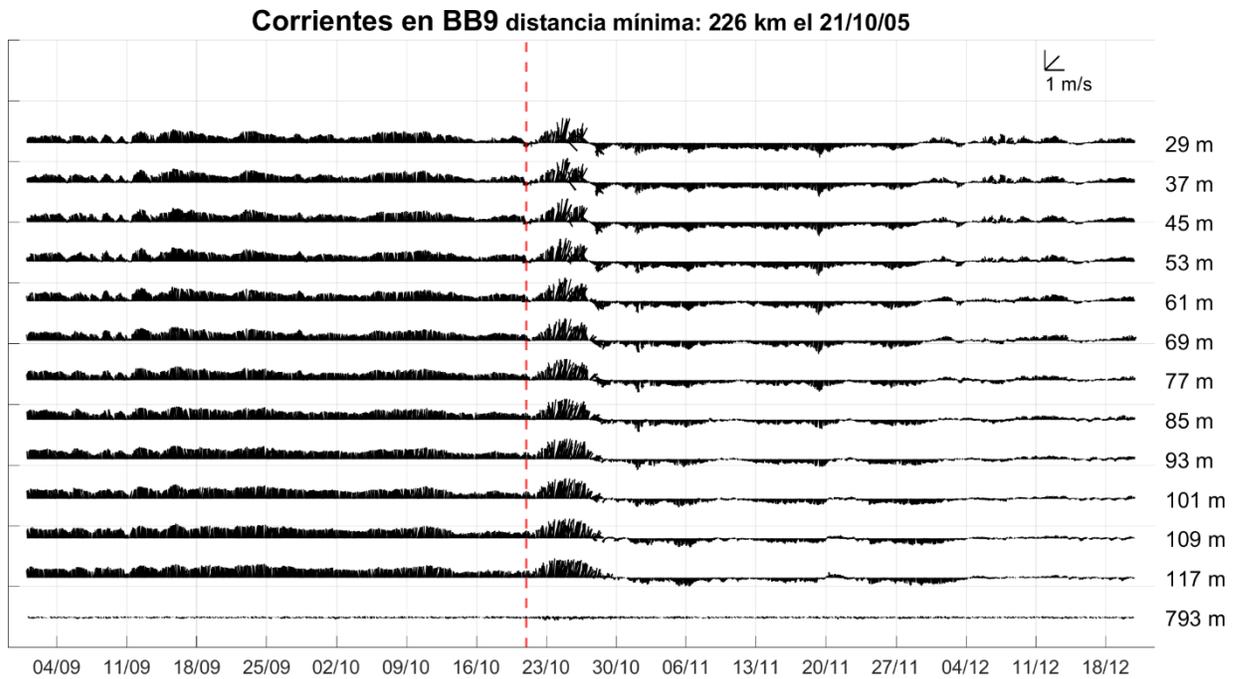
**Figura 42** Series de tiempo de la corriente (m/s) (-28 m a -108 m) en CHE para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.



**Figura 43** Series de tiempo de la corriente (m/s) (-27 m a -115 m y a -530 m) en TU para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.



**Figura 44** Series de tiempo de la corriente (m/s) (-22 m a -118 m) en PP para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.

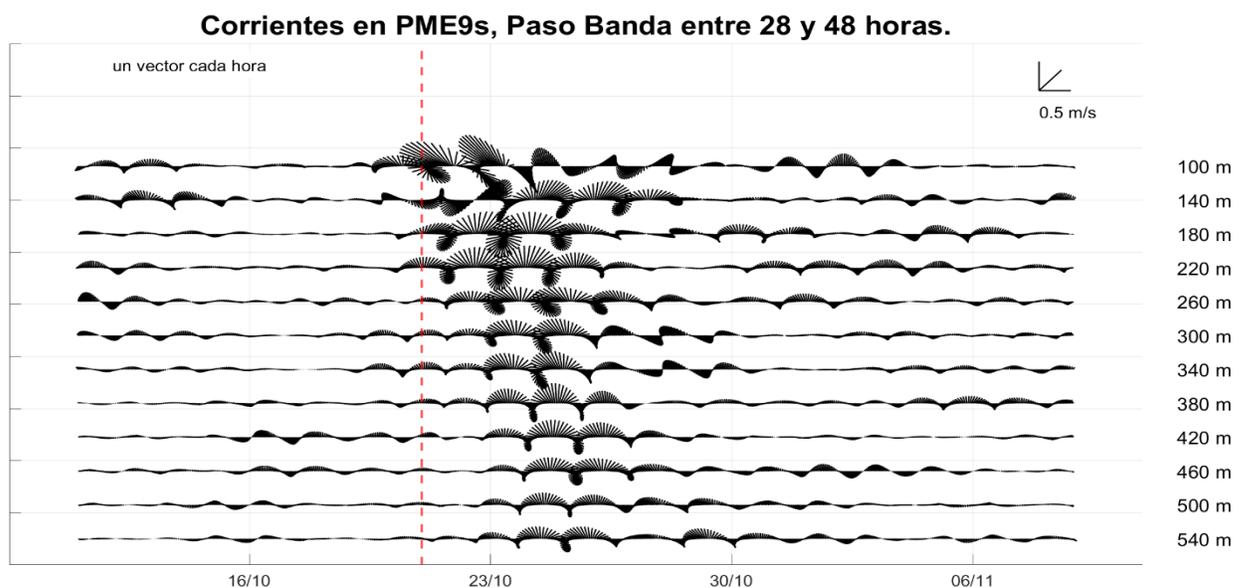


**Figura 45** Series de tiempo de la corriente (m/s) (-29 m a -117 m y a -793 m) en BB para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.

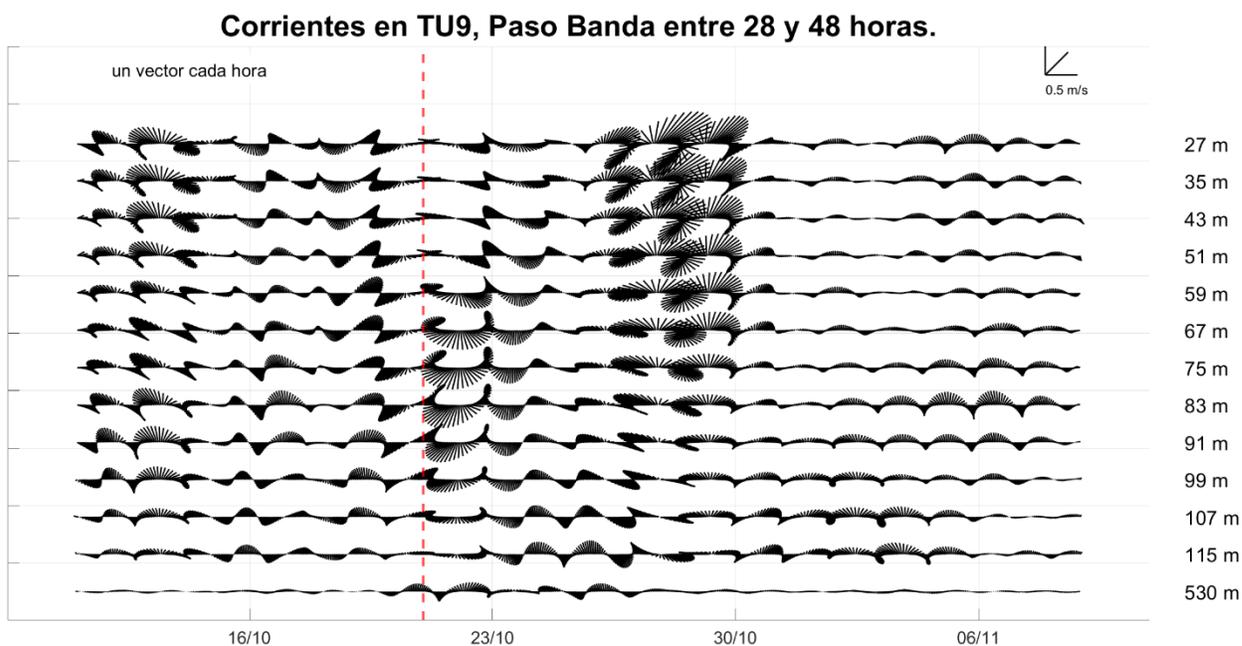
Por otro lado, al aplicar un filtro pasa-banda que aísla las señales entre 24 y 48 horas encontramos respuestas distintas en los anclajes. En los anclajes en alta mar se observó lo siguiente, en PME se observó una intensificación de la rotación anticiclónica el día 21 de octubre cuando se dio la distancia mínima, esta intensificación parece desplazarse hacia el fondo durante los siguientes 2 días. En TUE también se observa esta intensificación tras darse la distancia mínima, hay desfase hacia el fondo de alrededor de un día, este efecto duró alrededor de cuatro días. Por otro lado, en CHE se observó una pequeña intensificación de las ondas casi-inerciales de los 76 a los 108 m tras darse la distancia mínima, posterior a ello cuatro días después del paso de Wilma se observó una intensificación de las ondas casi-inerciales y una mezcla entre rotaciones ciclónicas y anticiclónicas que duró una semana y media, posterior a esto las ondas disminuyeron su magnitud, pero siguieron existiendo el resto del periodo de medición.

En los anclajes más cercanos a la costa que son TU, PP y BB se observó que la intensificación de la onda casi-inercial se dio entre cinco y siete días, después del momento de la distancia mínima al ojo de Wilma, y duró alrededor de cinco días, posterior a esto se continuaron observando ondas casi-inerciales de menor intensidad en los tres anclajes. Por otro lado, en TU y PP se observó rotación ciclónica tras el paso de

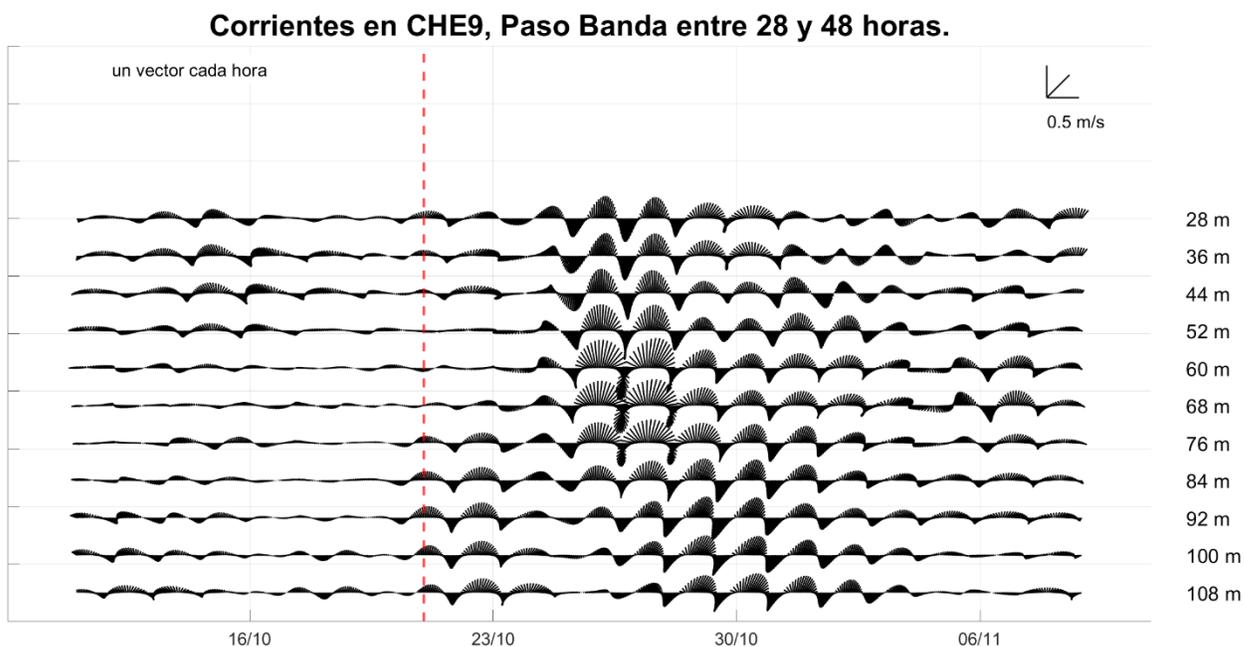
Wilma. Mientras que, en BB se observó una mezcla de rotaciones ciclónicas y anticiclónicas, acompañados de una ligera intensificación de la magnitud.



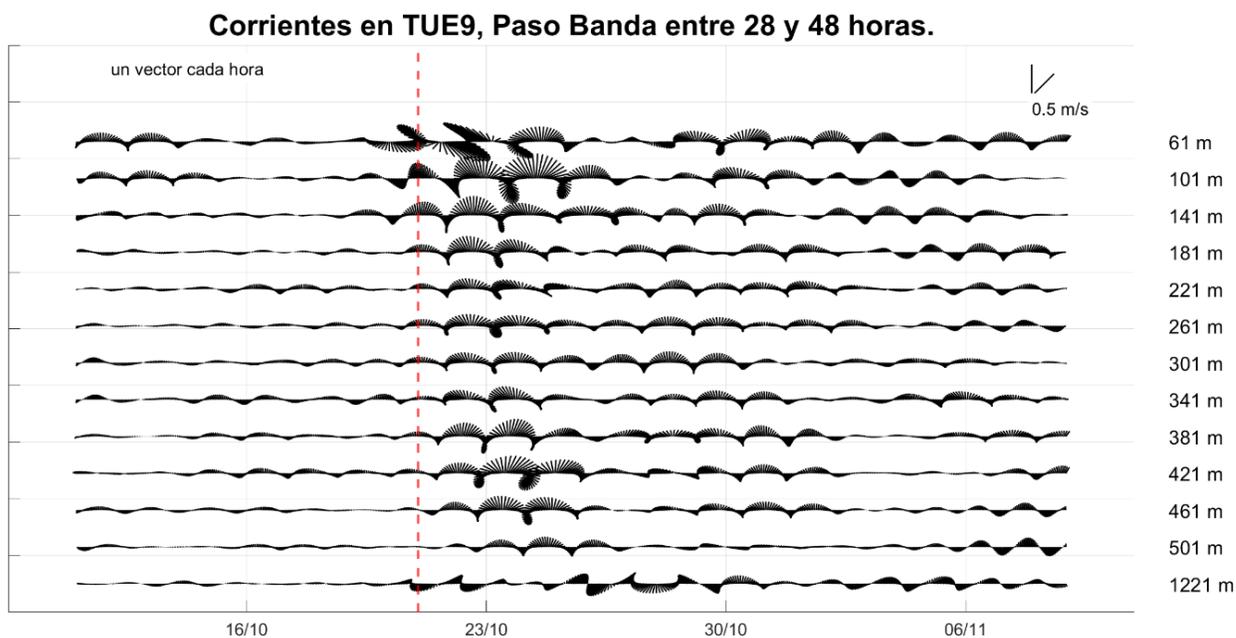
**Figura 46** Series de tiempo filtradas con un filtro pasa-banda entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) medida por el ADCP (-100 m a -540 m) en PME para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.



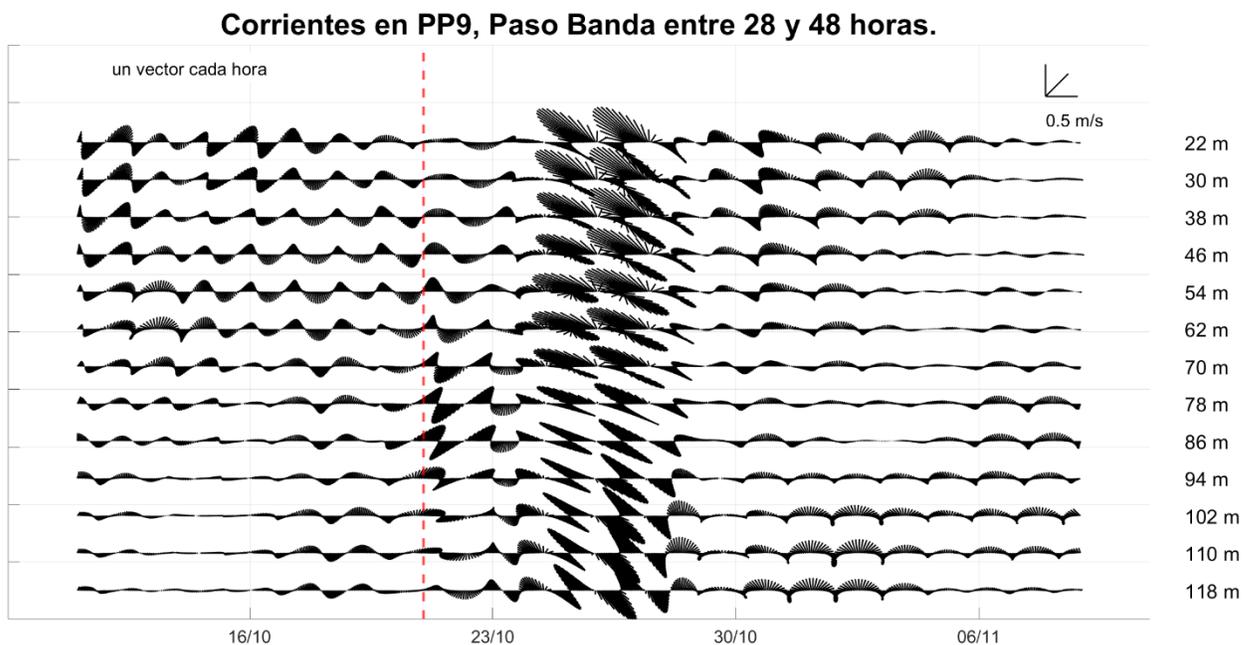
**Figura 47** Series de tiempo filtradas con un filtro pasa-banda entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) medida por el ADCP (-61 m a -1221 m) en TU para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.



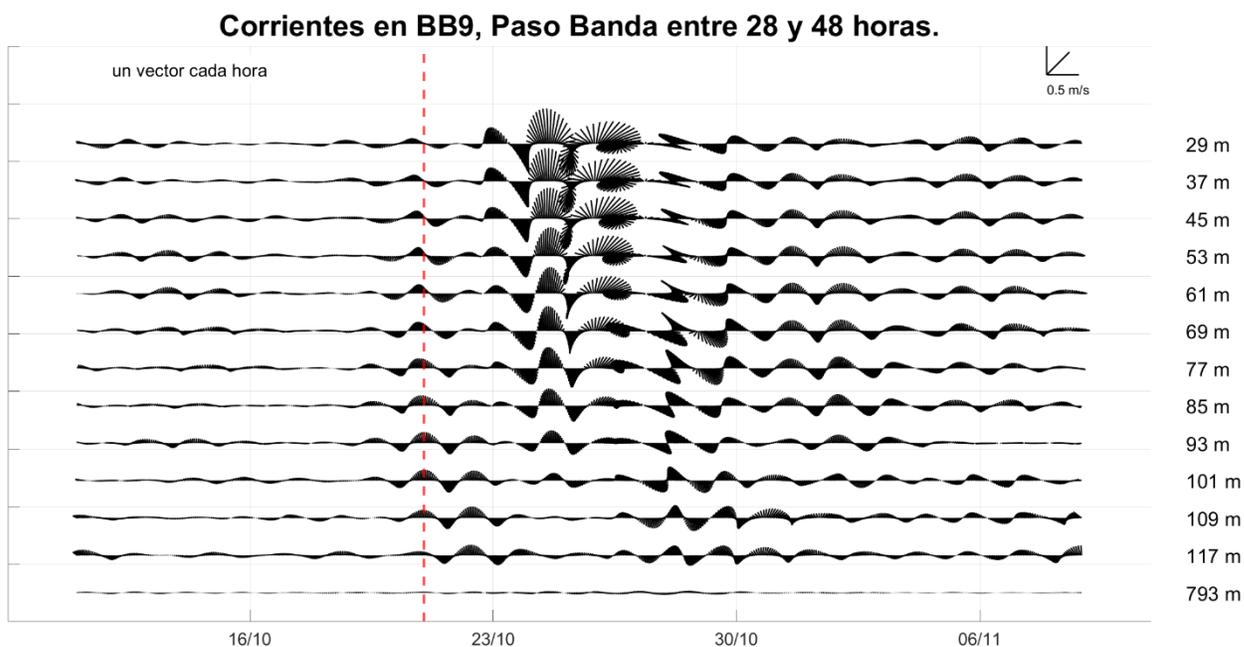
**Figura 48** Series de tiempo filtradas con un filtro pasa-banda entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) medida por el ADCP (-28 m a -108 m) en CHE para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.



**Figura 49** Series de tiempo filtradas con un pasa-banda entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) medida por el ADCP (-61 m a -501 m, y a -1221 m) para TUE9 para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.



**Figura 50** Series de tiempo filtradas con un filtro pasa-banda entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) medida por el ADCP (-22 m a -118 m) en PP para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.

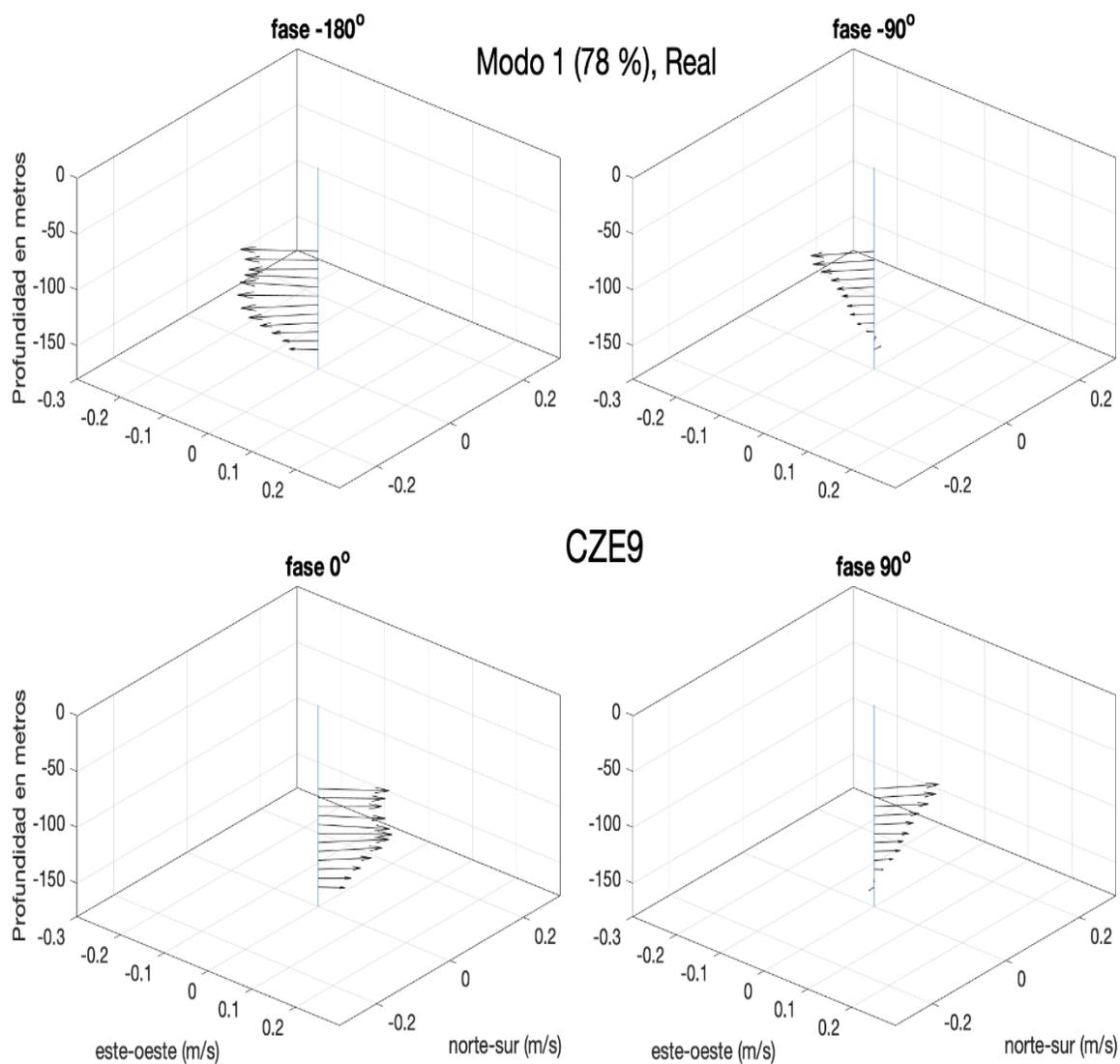


**Figura 51** Series de tiempo filtradas con un filtro pasa-banda entre 28 hrs y 48 hrs de la corriente (m/s) medida por el ADCP (-29 m a -117 m, y a -793 m) en BB para el periodo 01 de septiembre a 24 de diciembre de 2005. La línea roja indica el día en que se dio la distancia mínima entre el ojo del huracán y el anclaje en este caso el 21 de octubre de 2005.

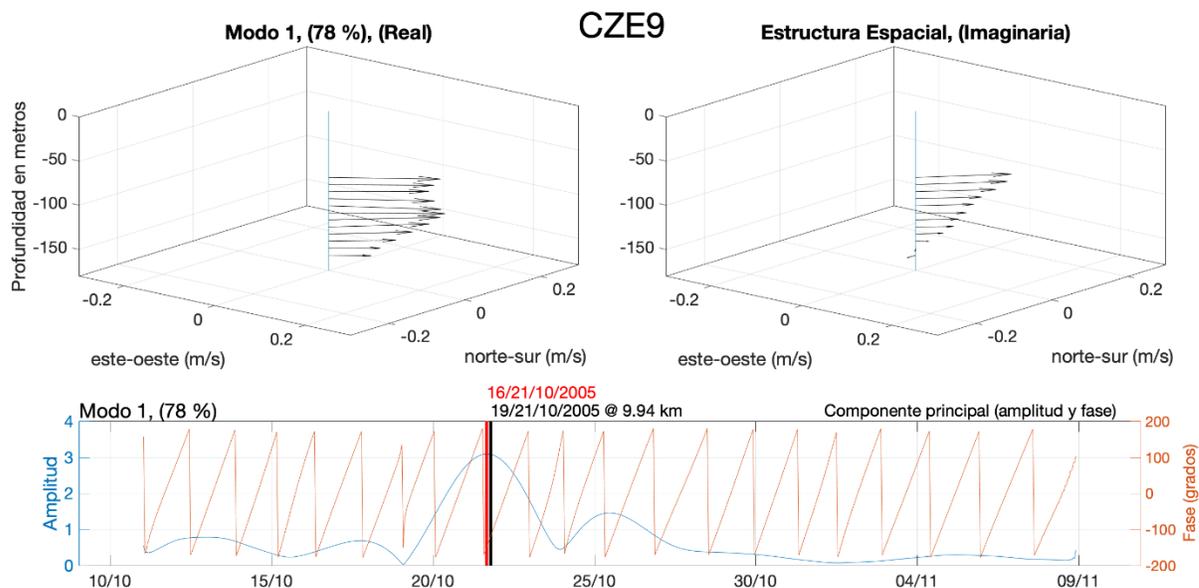
## Anexo B

A continuación, se muestran las figuras de los compuestos de cada modo, así como, el patrón del modo y su evolución en el tiempo a partir de las Componentes Principales de la amplitud y la fase, para la respuesta forzada y libre.

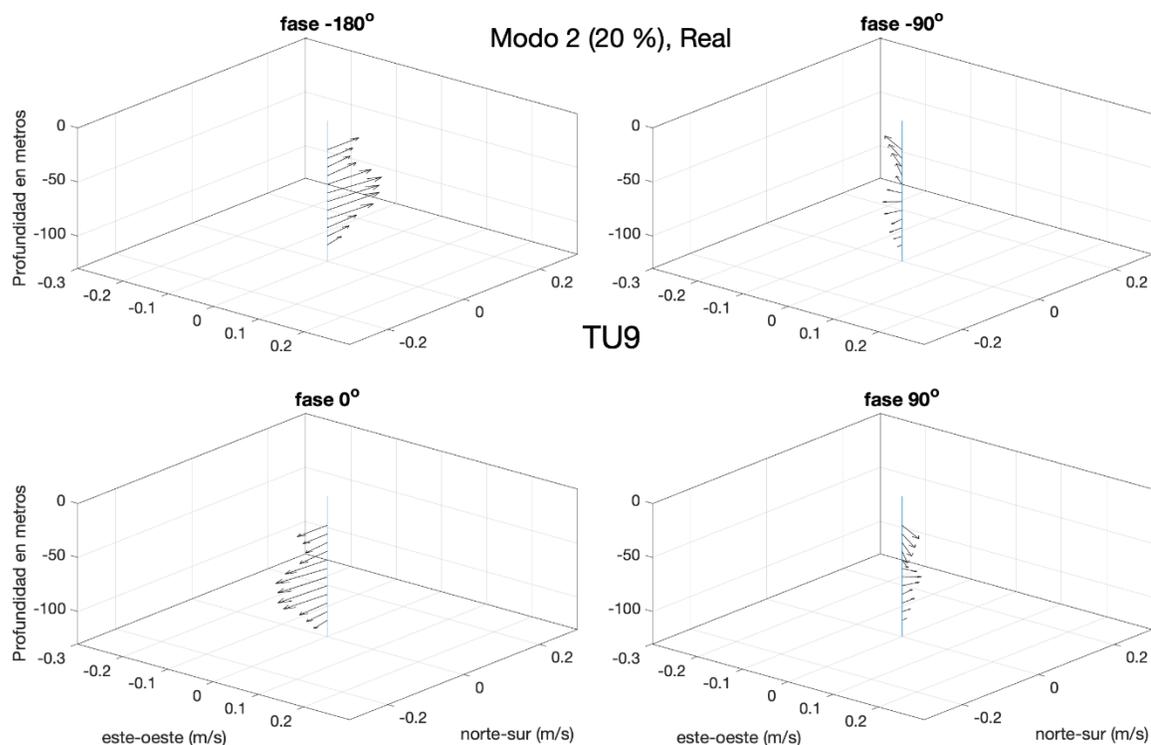
### - Respuesta forzada



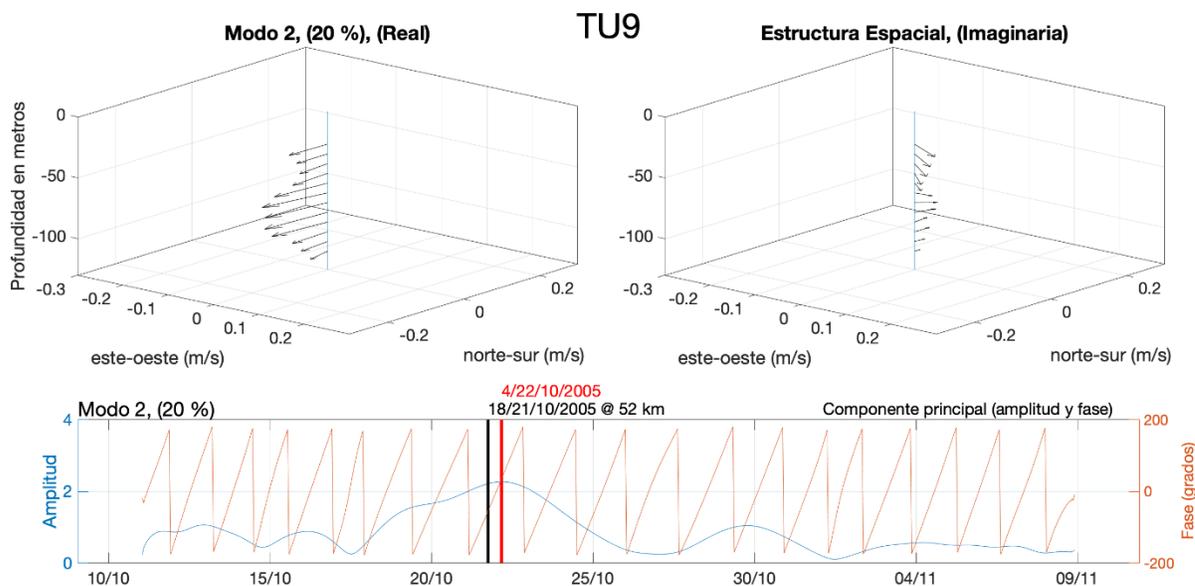
**Figura 52** Compuesto o promedio del modo 1 para la respuesta forzada en CZE9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a -180°, -90°, 0° y 90°. Este compuesto en CZE9 nos muestra una rotación ciclónica.



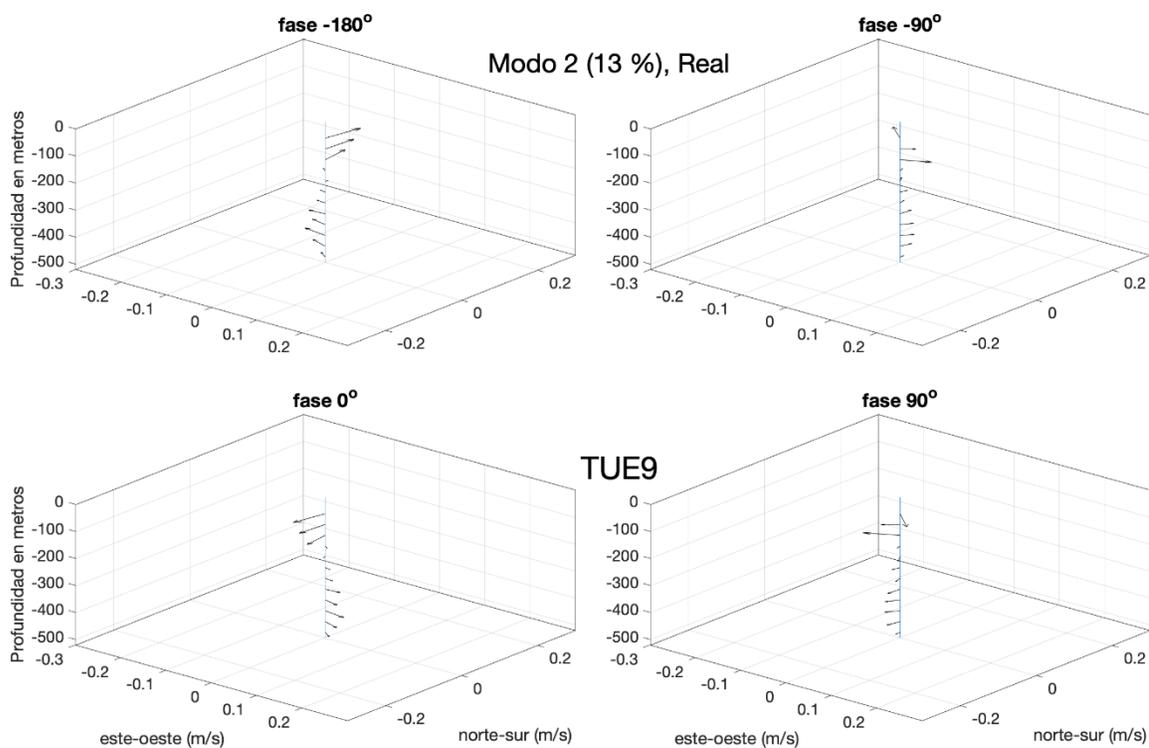
**Figura 53** Patrón del modo 1 de FEOCs para CZE9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.



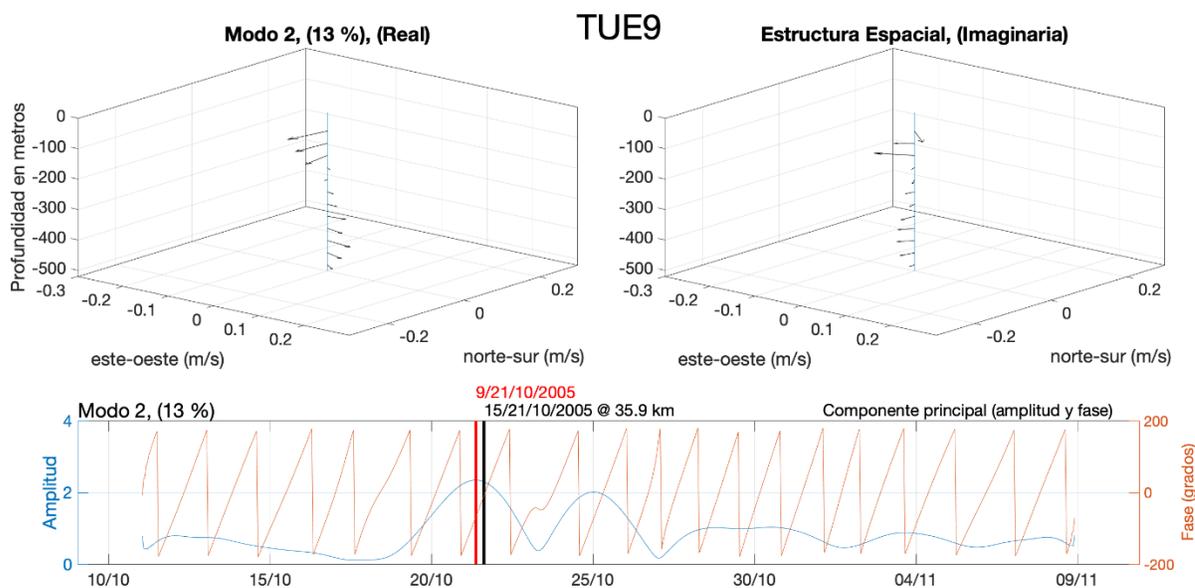
**Figura 54** Compuesto o promedio del modo 2 para la respuesta forzada en TU9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a 180°, -90°, 0° y 90°. Este compuesto en TU9 nos muestra una rotación ciclónica.



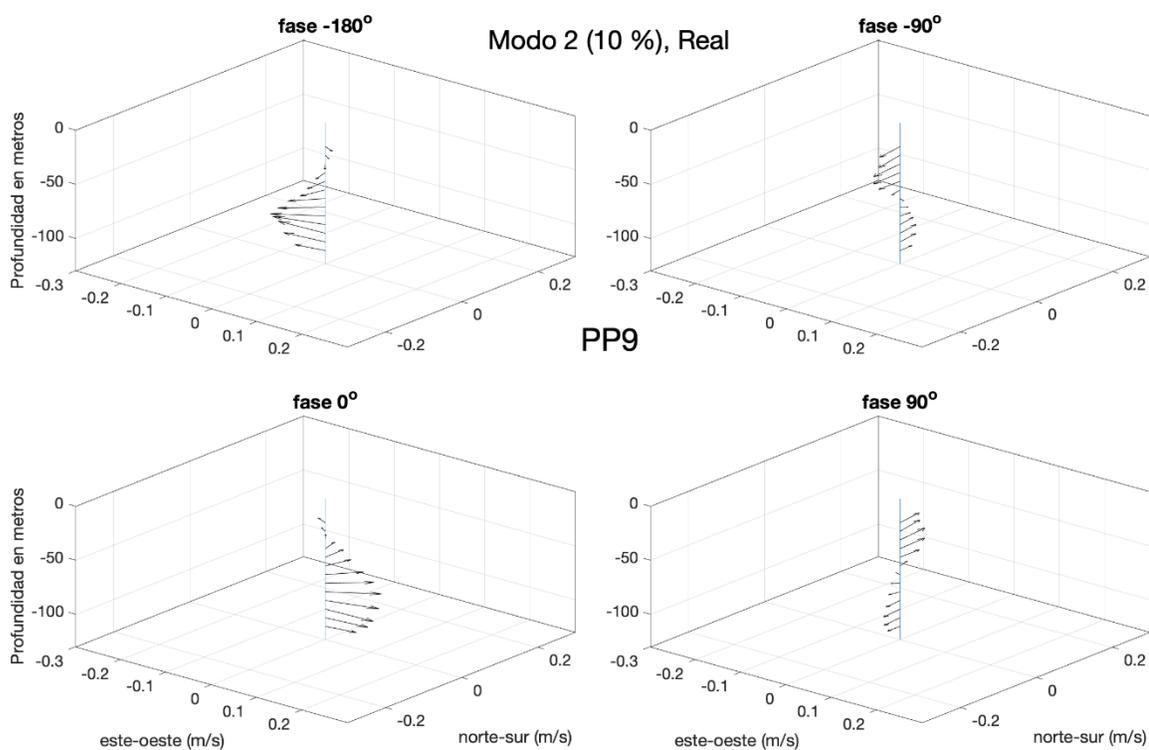
**Figura 55** Patrón del modo 1 de FEOCs para TU9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.



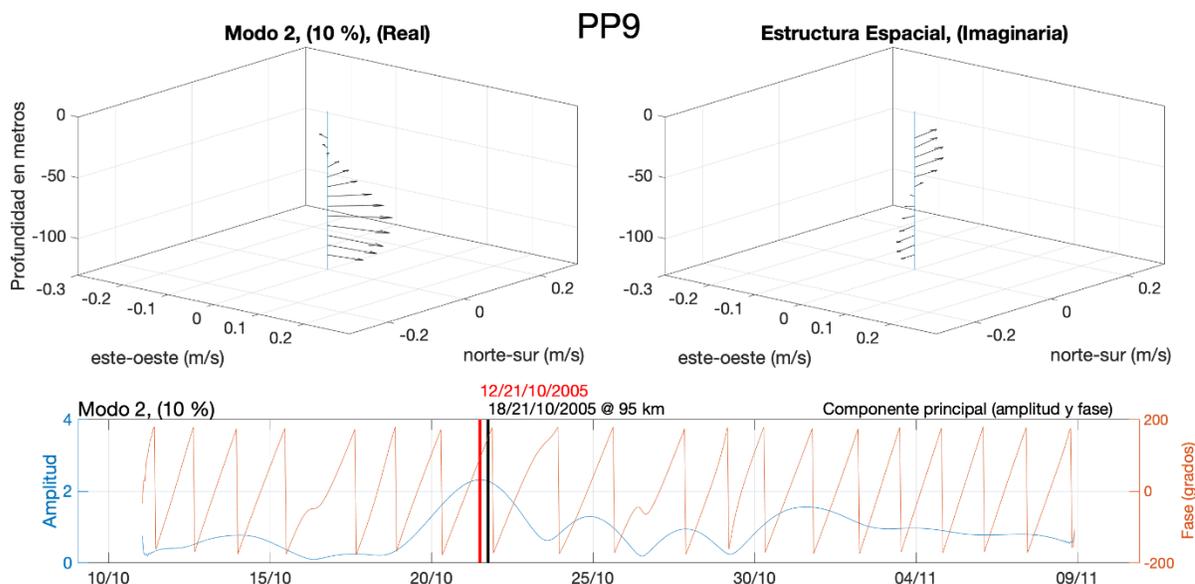
**Figura 56** Compuesto o promedio del modo 2 para la respuesta forzada en TUE9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a  $180^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Este compuesto en TUE9 nos muestra una rotación anticiclónica.



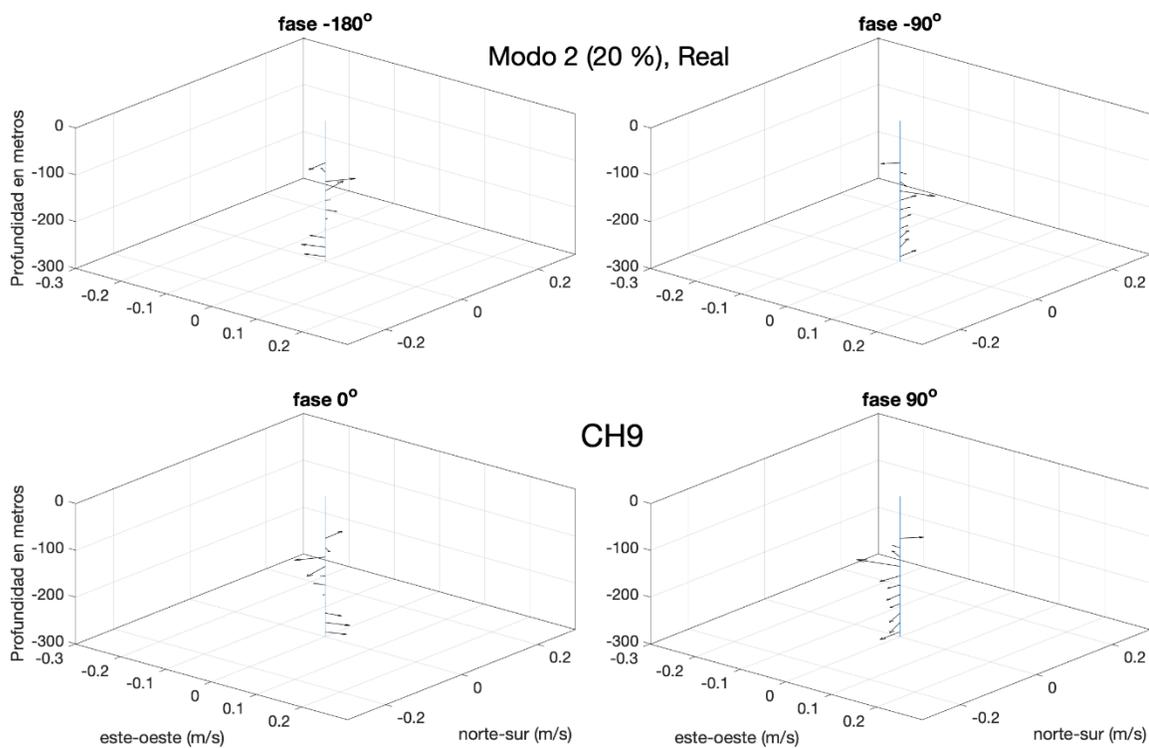
**Figura 57** Patrón del modo 1 de FEOCs para TUE9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.



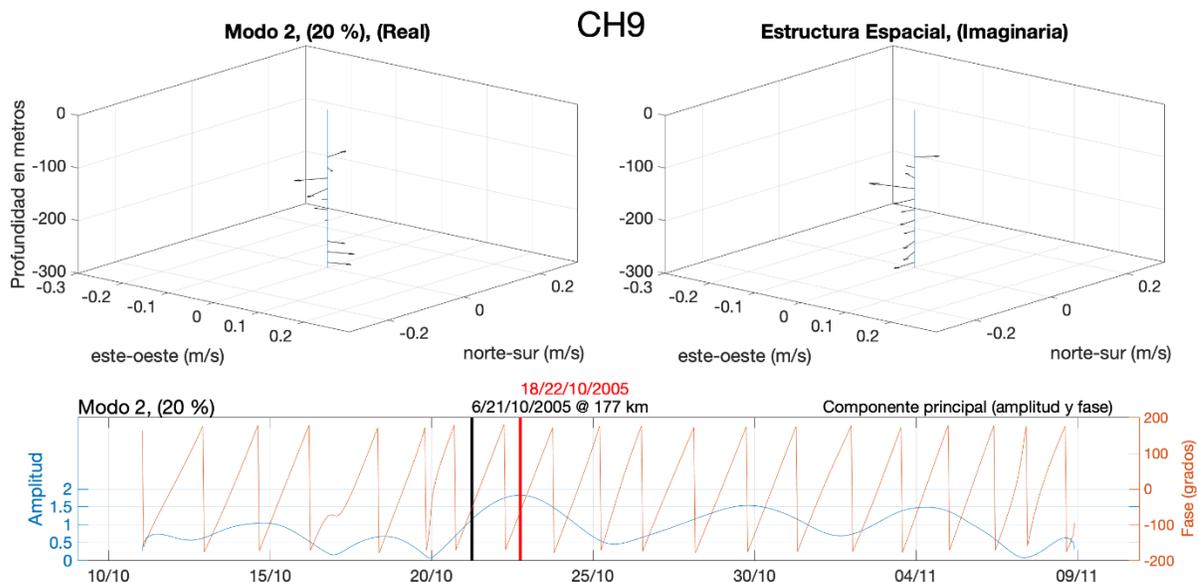
**Figura 58** Compuesto o promedio del modo 2 para la respuesta forzada en PP9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a 180°, -90°, 0° y 90°. Este compuesto en PP9 nos muestra una rotación ciclónica.



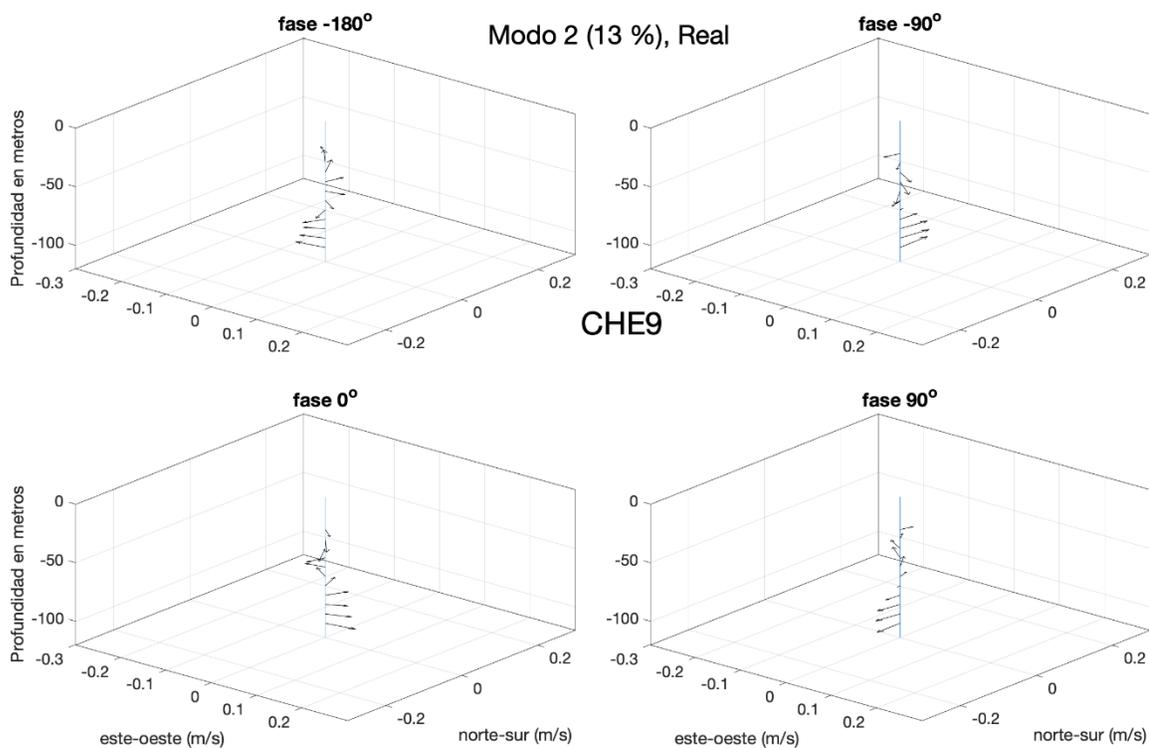
**Figura 59** Patrón del modo 1 de FEOCs para PP9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.



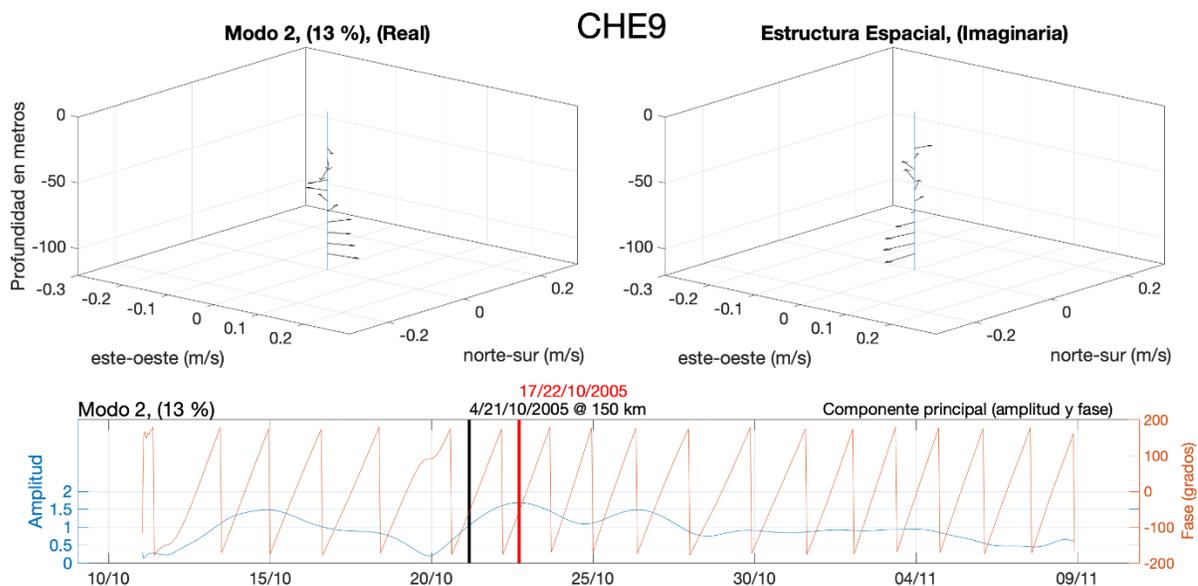
**Figura 60** Compuesto o promedio del modo 2 para la respuesta forzada en CH9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a 180°, -90°, 0° y 90°. Este compuesto en CH9 nos muestra una rotación anticiclónica.



**Figura 61** Patrón del modo 1 de FEOCs para CH9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.

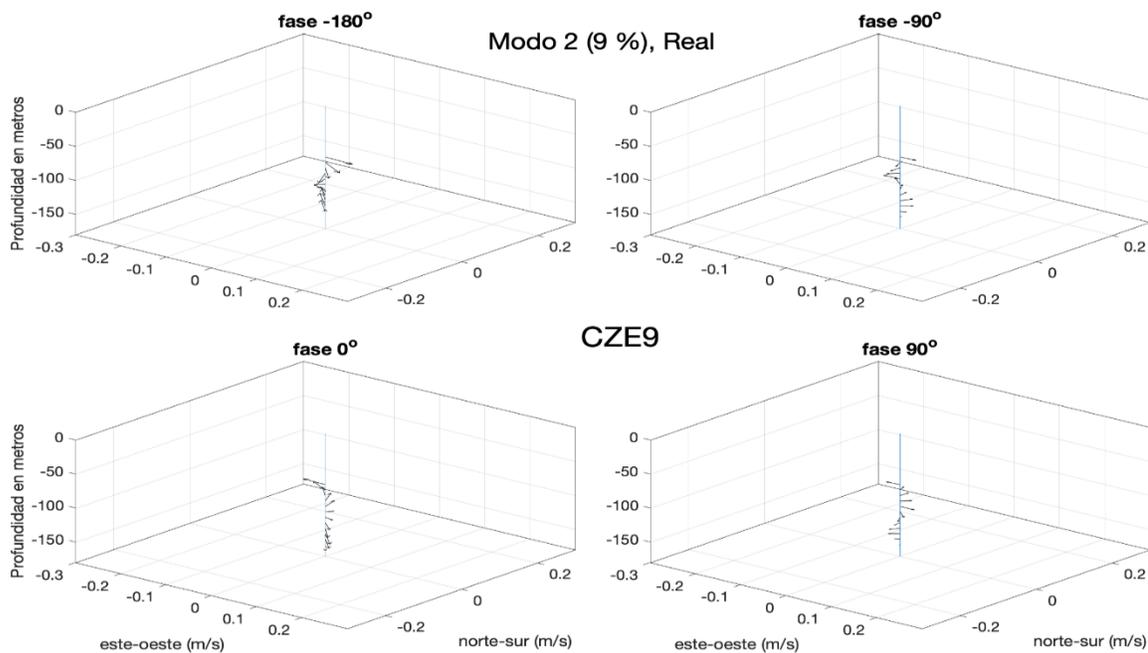


**Figura 62** Compuesto o promedio del modo 2 para la respuesta forzada en CHE9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a  $180^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Este compuesto en CHE9 nos muestra una rotación anticiclónica.

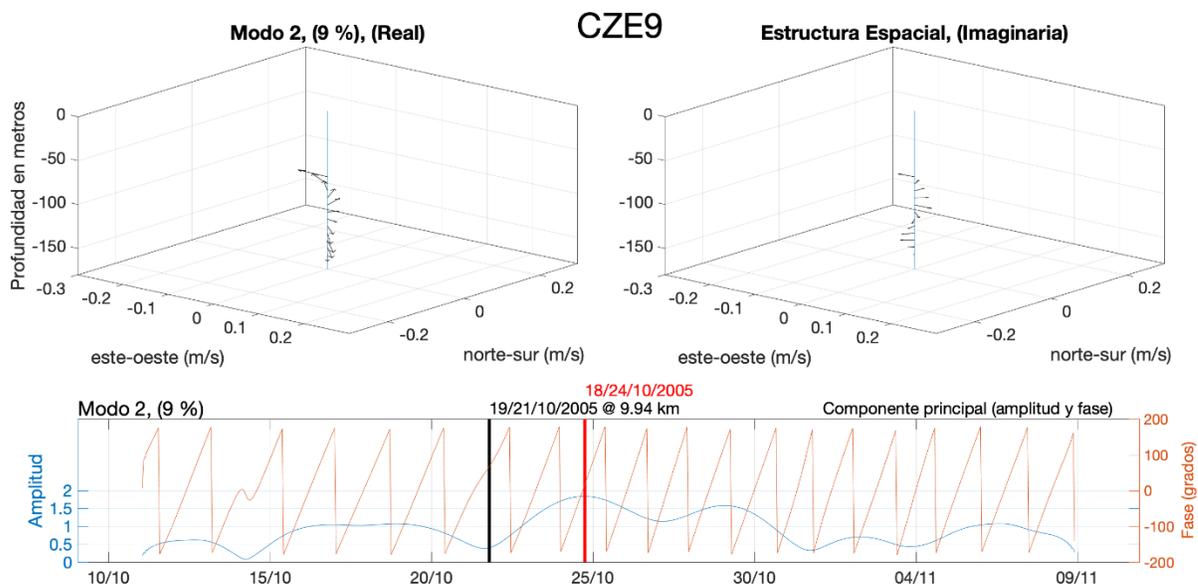


**Figura 63** Patrón del modo 1 de FEOCs para CHE9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.

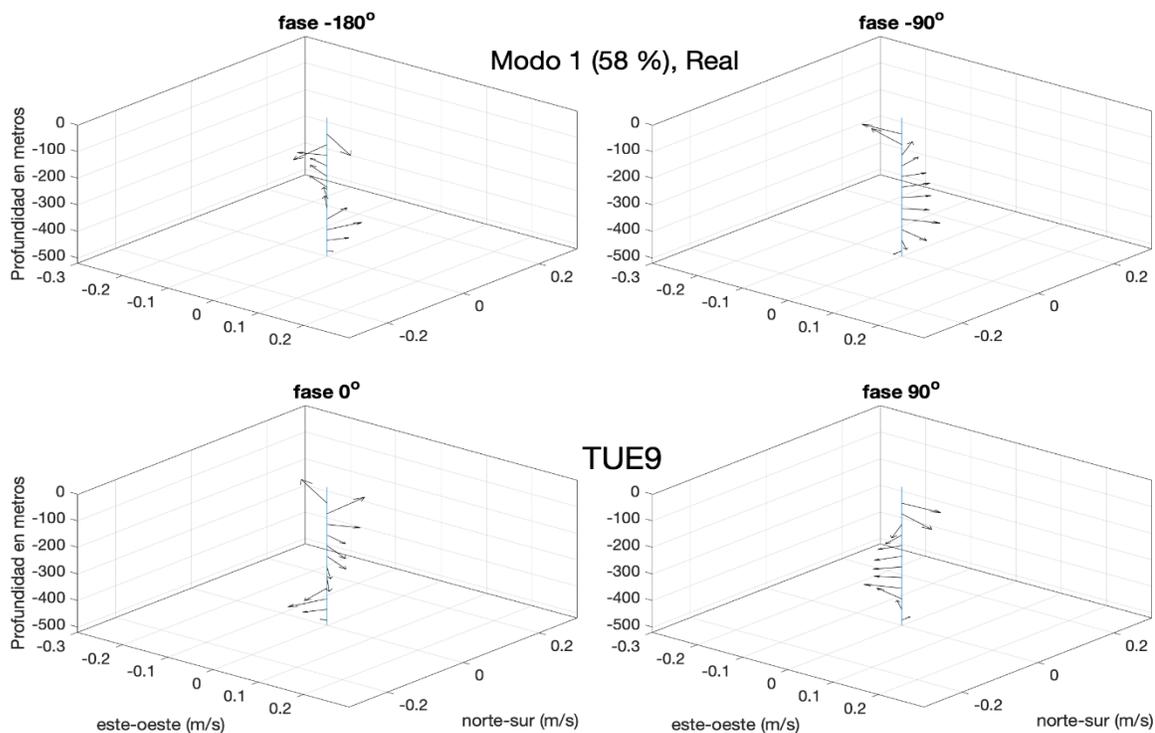
#### - Respuesta libre



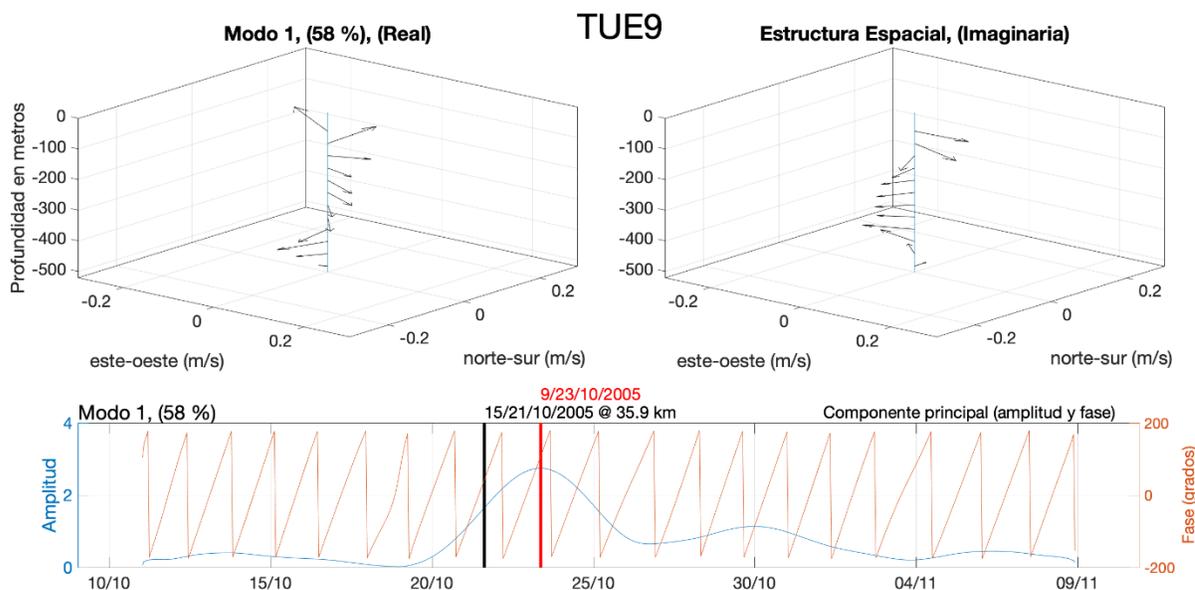
**Figura 64** Compuesto o promedio del modo 2 para la respuesta forzada en CZE9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a  $180^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Este compuesto en CZE9 nos muestra una rotación anticiclónica.



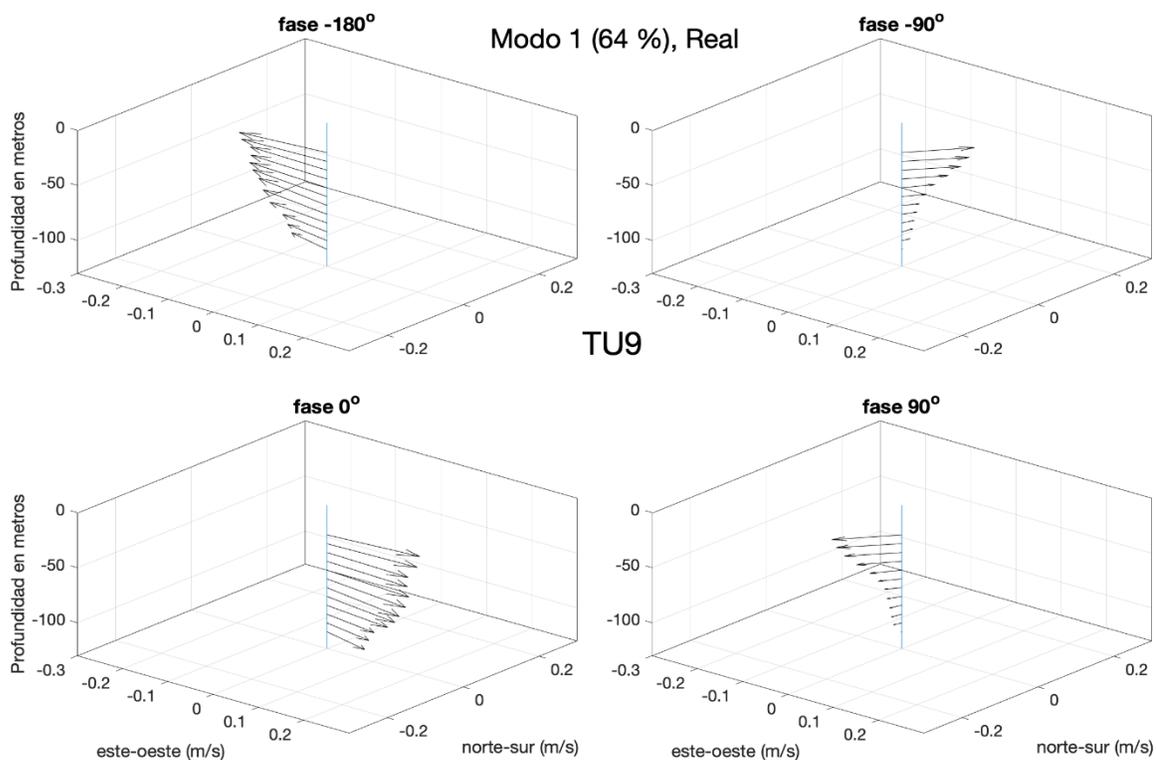
**Figura 65** Patrón del modo 2 de FEOCs para CZE9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.



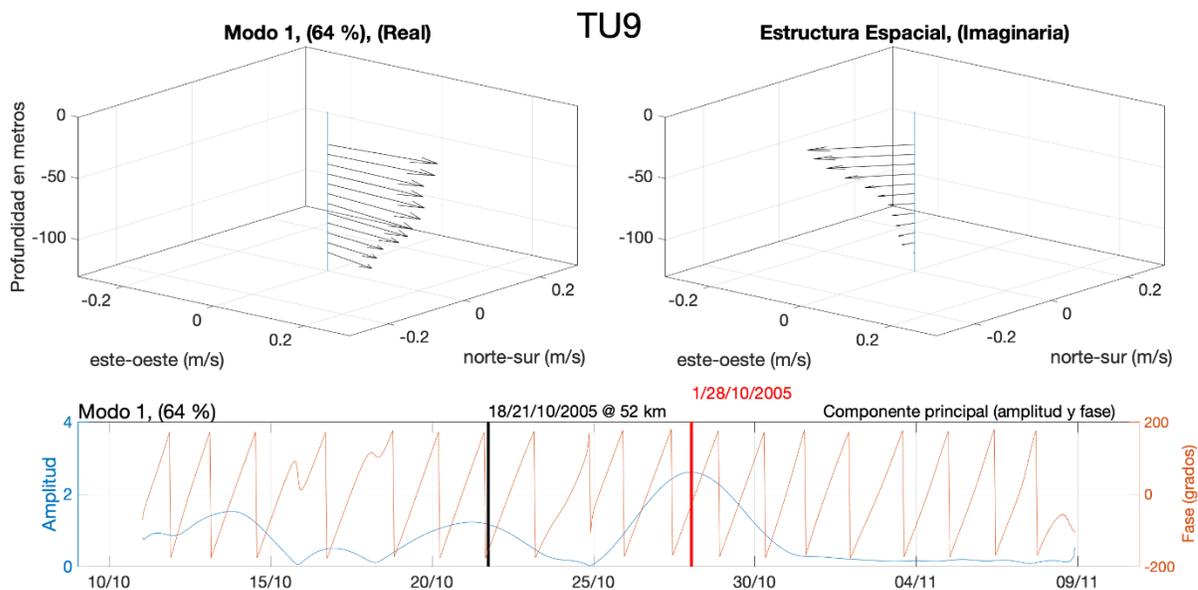
**Figura 66** Compuesto o promedio del modo 1 para la respuesta de relajación en TUE9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a 180°, -90°, 0° y 90°. Este compuesto en TUE9 nos muestra una rotación anticiclónica.



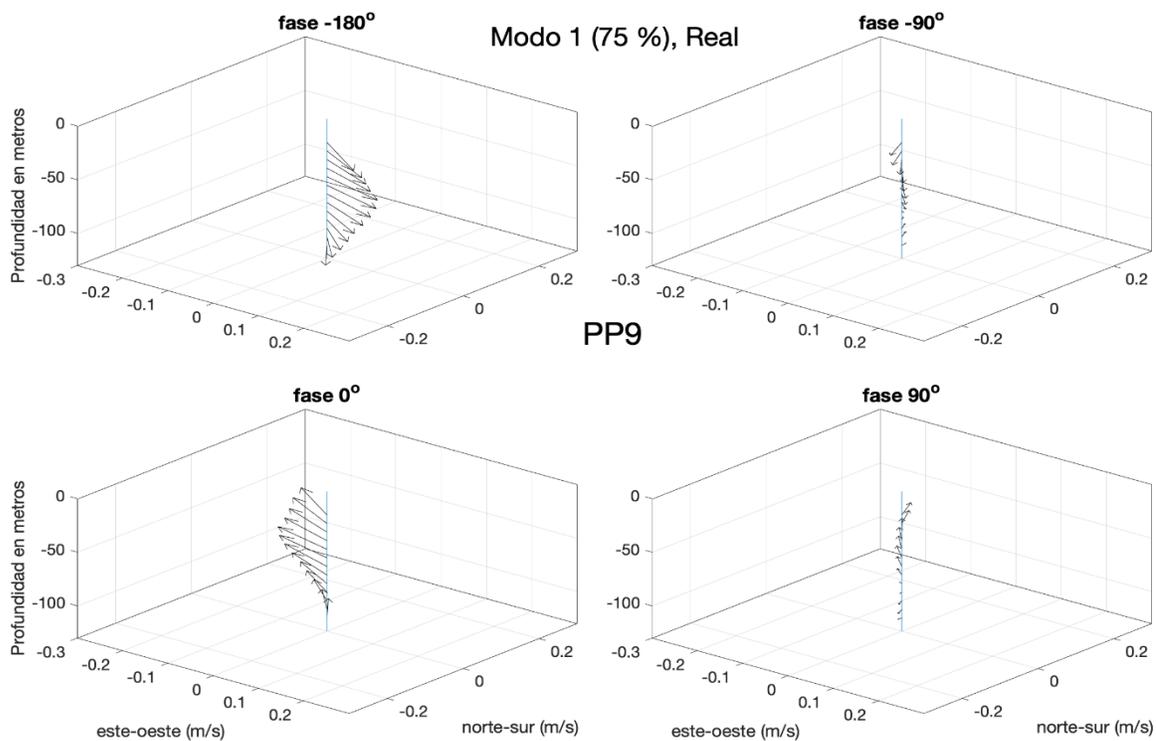
**Figura 67** Patrón del modo 1 de FEOCs para TUE9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.



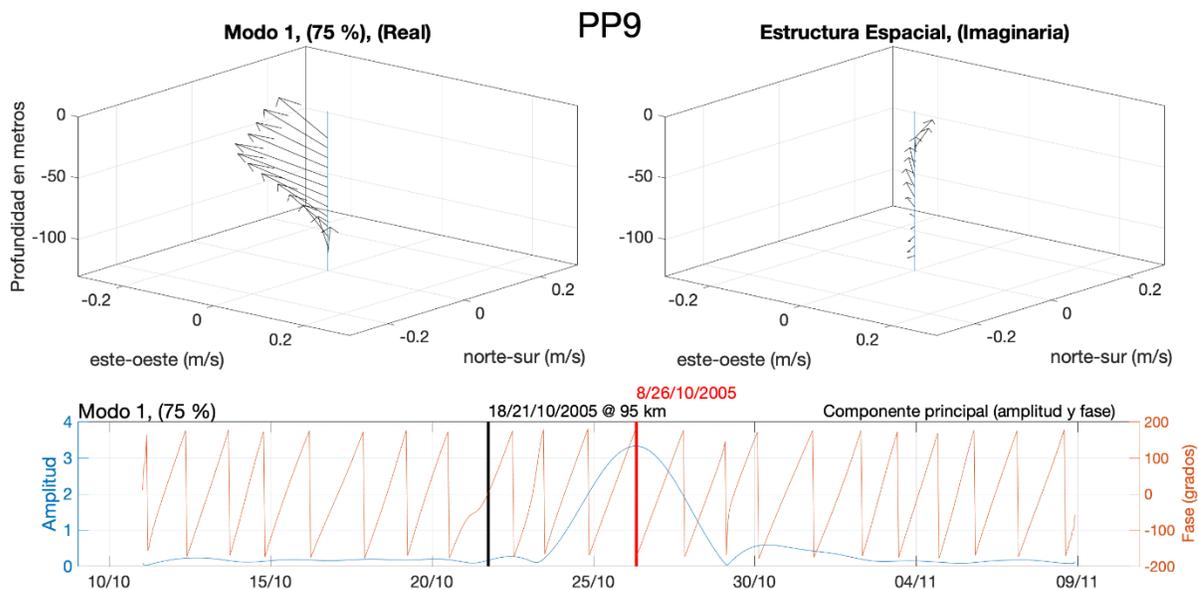
**Figura 68** Compuesto o promedio del modo 1 para la respuesta de relajación en TU9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a 180°, -90°, 0° y 90°. Este compuesto en TU9 nos muestra una rotación anticiclónica.



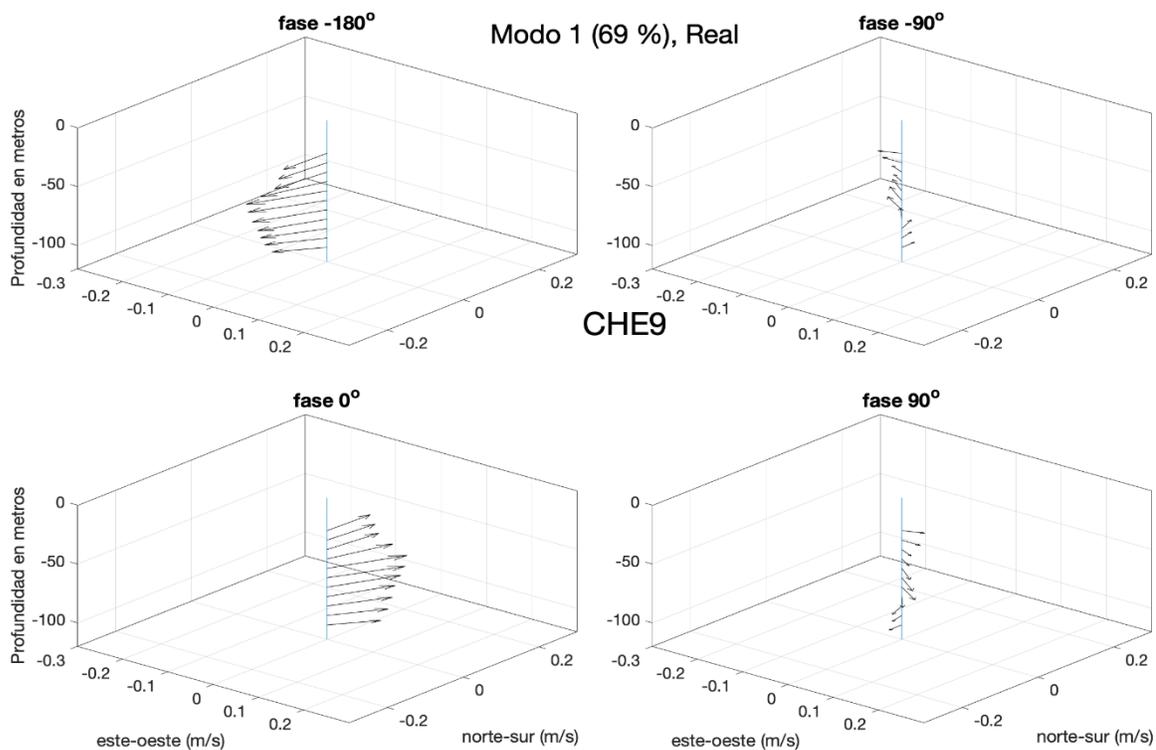
**Figura 69** Patrón del modo 1 de FEOCs para TU9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.



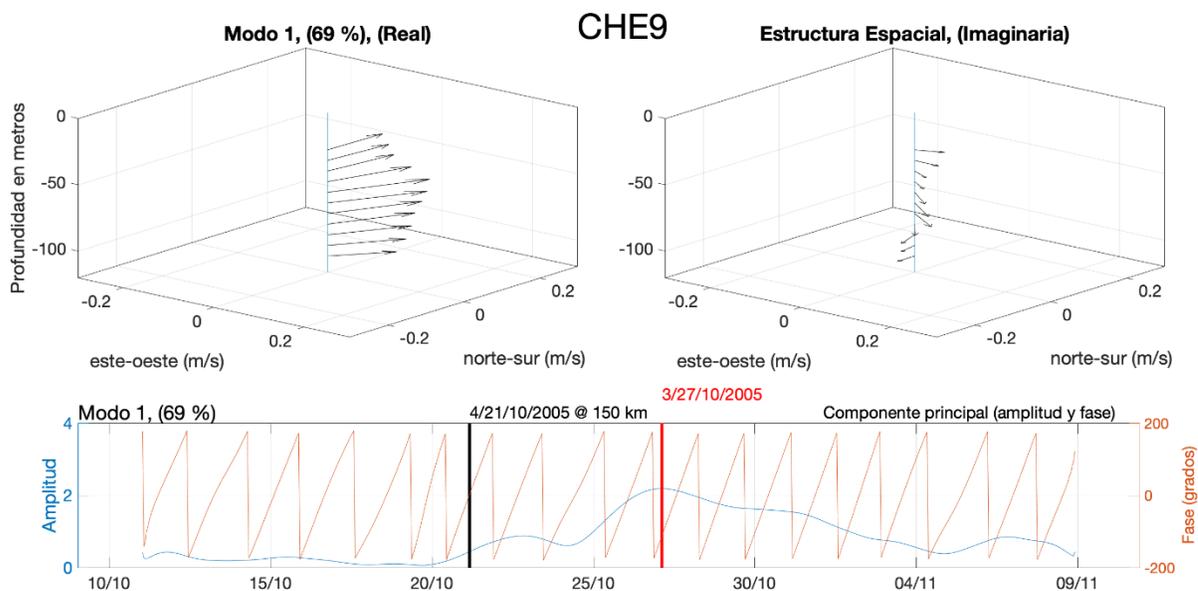
**Figura 70** Compuesto o promedio del modo 1 para la respuesta de relajación en PP9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a 180°, -90°, 0° y 90°. Este compuesto en PP9 nos muestra una rotación anticiclónica.



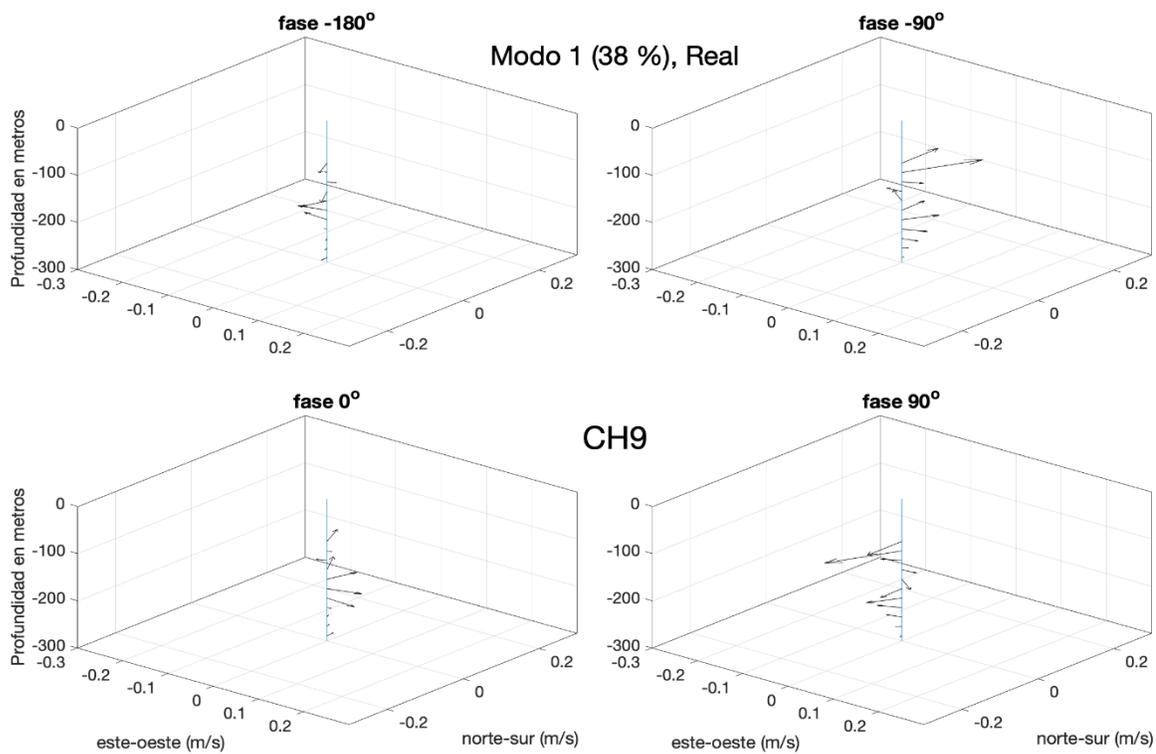
**Figura 71** Patrón del modo 1 de FEOCs para PP9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.



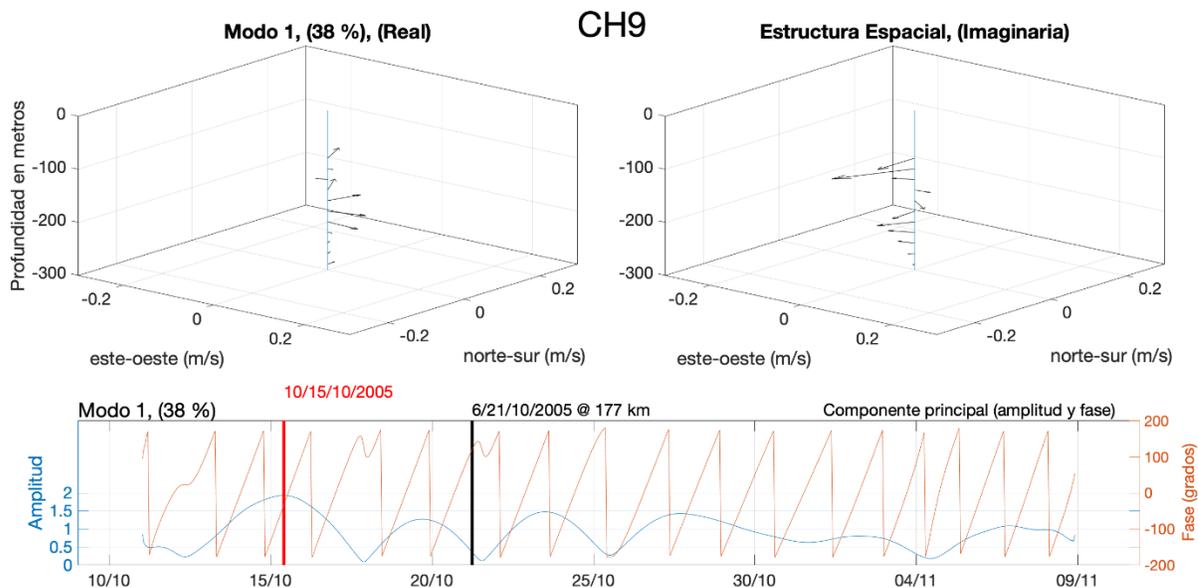
**Figura 72** Compuesto o promedio del modo 1 para la respuesta de relajación en CHE9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a  $180^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Este compuesto en CHE9 nos muestra una rotación anticiclónica.



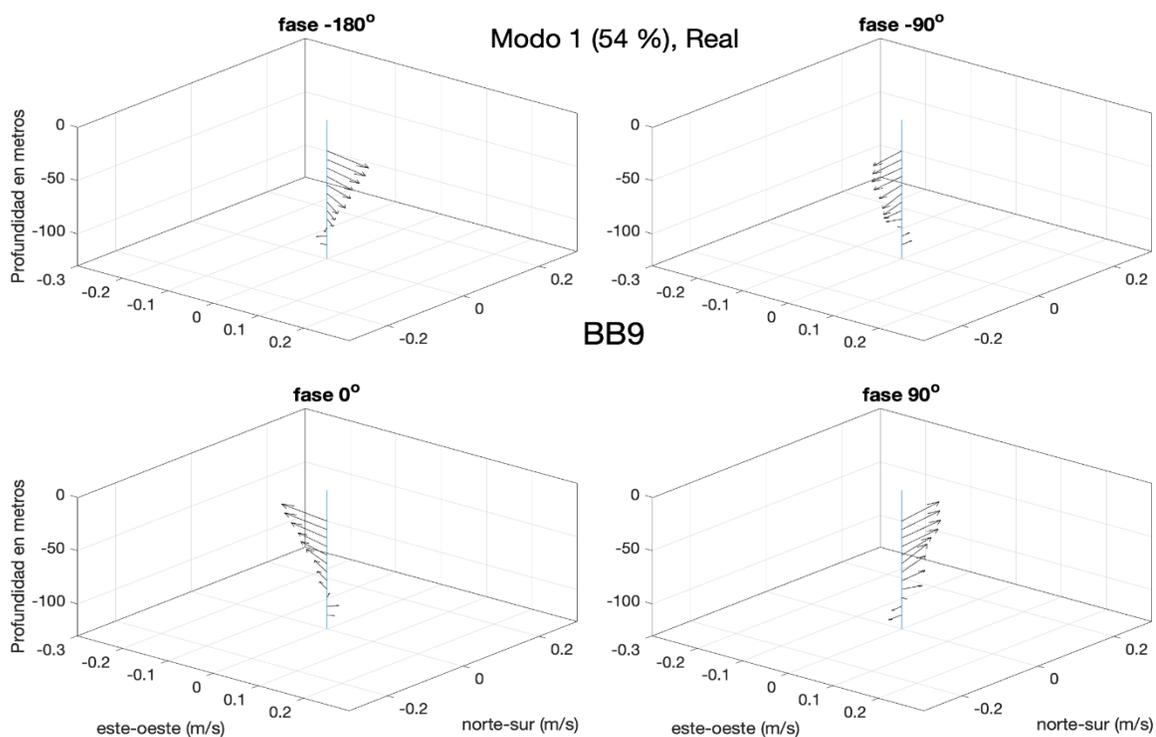
**Figura 73** Patrón del modo 1 de FEOCs para CHE9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.



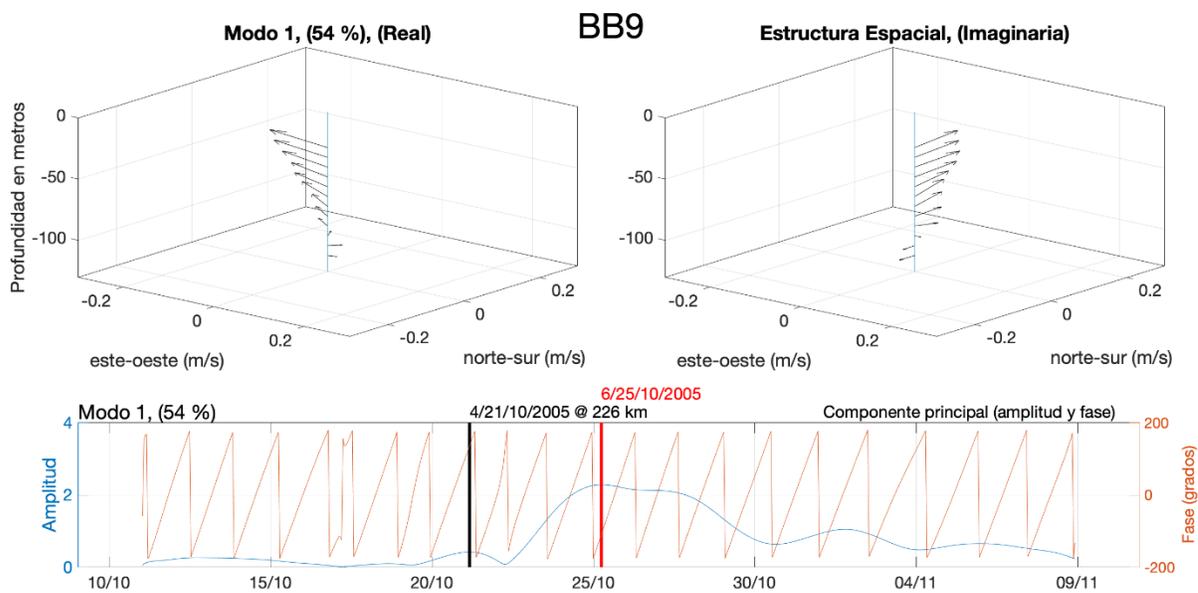
**Figura 74** Compuesto o promedio del modo 1 para la respuesta de relajación en CH9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a 180°, -90°, 0° y 90°. Este compuesto en CH9 nos muestra una rotación anticiclónica.



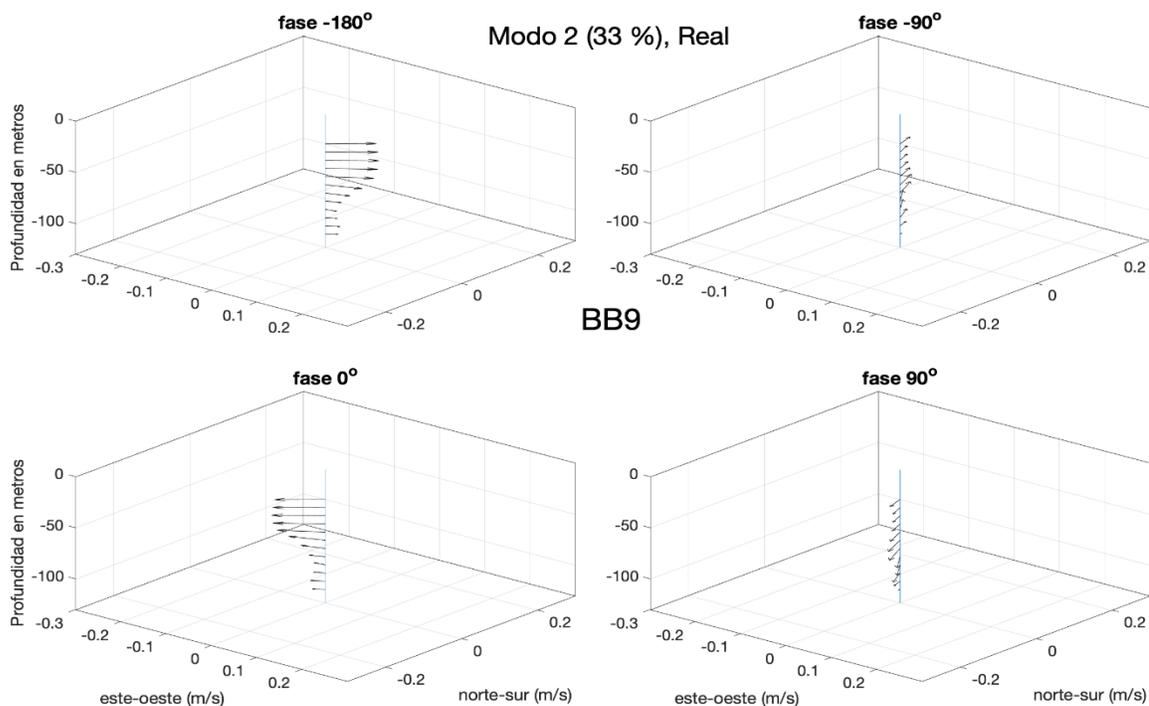
**Figura 75** Patrón del modo 1 de FEOCs para CH9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.



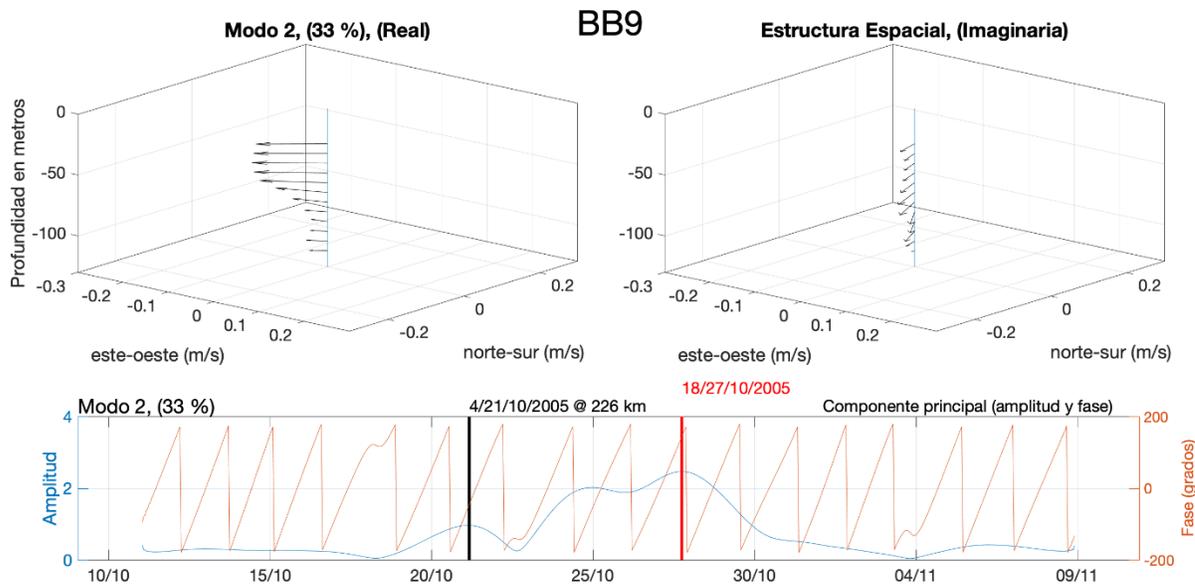
**Figura 76** Compuesto o promedio del modo 1 para la respuesta de relajación en BB9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a 180°, -90°, 0° y 90°. Este compuesto en BB9 nos muestra una rotación anticiclónica.



**Figura 77** Patrón del modo 1 de FEOCs para BB9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.



**Figura 78** Compuesto o promedio del modo 2 para la respuesta de relajación en BB9 que corresponden a valores específicos de la fase temporal a  $180^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Este compuesto en BB9 nos muestra una rotación anticiclónica.



**Figura 79** Patrón del modo 2 de FEOCs para BB9 y su Componente Principal (evolución temporal del modo) representado por la fase en grados (rojo) y la amplitud en m/s (azul). La línea negra indica el día en que se dio la distancia mínima entre el anclaje y el ojo del huracán, y la línea roja indica el día en que se dio el máximo de amplitud del modo.