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

CICESE@ 2023. Todos los derechos reservados

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



# Maestría en Ciencias en Oceanografía Física

# Transformación de masas de agua dentro de remolinos de mesoescala en el golfo de México: el caso del Poseidón

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

Presenta:

Viridiana Lizeth Domínguez Copado

Ensenada, Baja California, México 2023 Tesis defendida por Viridiana Lizeth Domínguez Copado

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Miguel José Costa de Almeida Tenreiro Director de tesis

Dr. Enric Pallàs Sanz

Dra. Paula Pérez Brunius

Dr. Oscar Sosa-Nishizaki

Dr. David Alberto Rivas Camargo



Dra. María Tereza Cavazos Pérez Coordinadora del Posgrado en Oceanografía Física

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

Copyright © 2023, Todos los Derechos Reservados, CICESE Prohibida su reproducción parcial o total sin la autorización por escrito del CICESE Resumen de la tesis que presenta **Viridiana Lizeth Domínguez Copado** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

#### Transformación de masas de agua dentro de remolinos de mesoescala en el golfo de México: el caso del Poseidón

Resumen aprobado por:

#### Dr. Miguel José Costa de Almeida Tenreiro Director de tesis

Se ha investigado la transformación de masas de agua dentro del remolino "Poseidón" utilizando datos de glider y datos de altimetría satelital. El principal interés fue encontrar el papel que juega la interacción del remolino con otros remolinos y con la topografía en la transformación de las masas contenidas en su interior. Del encuadramiento de los datos de glider realizado con datos de sensores remotos (satélites), se han detectado algunas inconsistencias relacionadas con la posición y forma del remolino obtenidos de la implementación de un modelo optimizado de detección de estructuras de mesoescala, sin embargo, ambas bases de datos presentan gran coherencia entre si y se debe seguir usando en conjunto. El Agua Subtropical Superficial del Atlántico Norte (NASUW, por sus siglas en inglés) es la principal propulsora del Agua Común del Golfo (GCW, por sus siglas en inglés). La mayor erosión del núcleo salino que caracteriza a la NASUW dentro del "Poseidón" ocurre en los meses de invierno a causa de la presencia de una capa de mezcla profunda y procesos dinámicos asociados a la interacción de remolinos con la costa oeste del Golfo de México y remolino de mesoescala presentes en la región. Esta transformación se debe a procesos dinámicos de división, compactación y estiramiento del remolino causados por las diferentes interacciones haciendo que las aguas del interior se mezclen con las aguas circundantes. La implementación de un modelo de evolución de los diagramas θ-S permitió cuantificar la transformación de las diferentes masas de agua en función de la profundidad, donde la NASUW se identifica como la principal precursora de la GCW a causa de la interacción del "Poseidón" con otros remolinos vecinos y con la topografía. Se han detectado varios remolinos intratermoclinos alrededor del "Poseidón" a diferentes profundidades. Estas estructuras pueden ser originadas por las interacciones discutidas en este trabajo y posiblemente jueguen un papel importante en la erosión de las masas de agua en el interior del remolino.

Palabras clave: Trasformación de masas de agua, remolinos de mesoescala, golfo de México, remolino Poseidón

Abstract of the thesis presented **by Viridiana Lizeth Domínguez Copado** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography.

#### Water mass transformation inside mesoscale eddies in the gulf of Mexico: the case of Poseidon

Abstract approved by:

#### Dr. Miguel José Costa de Almeida Tenreiro Thesis Director

The water masses transformation within the "Poseidon" eddy has been investigated using underwater glider data and satellite altimetry data. The main interest was to find the role played by the interaction of the eddy with other eddies and with the topography in the transformation of the water masses contained in its interior. From the framing of the submarine glider data carried out with data from remote sensors (satellites), some inconsistencies related to the position and shape of the eddy obtained from the implementation of an optimized model for the detection of mesoscale structures have been detected. In general, however, the data in both databases is very consistent with each other and should continue to be used together. Subtropical North Atlantic Surface Water (NASUW) is the primary driver of Gulf Common Water (GCW). The greatest erosion of the saline core that characterizes the NASUW within the "Poseidon" occurs in the winter months due to the presence of a deep mixed layer and dynamic processes associated with the interaction of the eddy with the west coast of the Gulf of Mexico and mesoscale eddies present in the region. This transformation is due to dynamic splitting, compression and stretching processes of the eddy caused by the different interactions and with this the waters inside the eddy mix with the surrounding waters. The implementation of an evolution model of the different  $\theta$ -S diagrams allowed to quantify the transformation of the different water masses as a function of depth. Where the NASUW is identified as the main precursor of the GCW due to the interaction of the "Poseidon" with other neighbouring eddies and with the topography. Several intrathermoclinic eddies have been detected around Poseidon at different depths. These structures may be caused by the interactions discussed in this work and possibly also play an important role in the erosion of the water masses within the eddy.

# Dedicatoria

Con todo mi corazón a mi madre Rocío, pues sin ella no lo habría logrado. Eres el mayor ejemplo de fortaleza y valentía, tu amor no tiene comparación.

A mi hermano Fernando con su presencia, respaldo y cariño me impulsa a ser mejor y aunque parezca estar lejos, siempre estaré para ti.

A mi abuelita Estela heroína y ejemplo de vida, que con la sabiduría de Dios me ha enseñado a ser quien soy.

# 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 CVU: 959648.

Al **Dr. Miguel Tenreiro**, por su disposición, apoyo, consejos, por no permitir que los ánimos decayeran ante la adversidad y toda la paciencia brindada. Gracias por dirigirme en la dirección correcta y por aceptarme como su estudiante.

A mis sinodales el **Dr. Enric Pallàs, Dr. David Rivas, Dra. Paula Brunius y Dr. Oscar Sosa**, por sus valiosos aportes, su interés mostrado en todo momento, su apoyo y paciencia.

A los investigadores del centro, por el amor que le tienen a la ciencia y las grandes enseñanzas que comparten y transmiten.

A la **Dra. Gaby Athié** y **Dr. Mark Marín**, por sus excelentes enseñanzas, las oportunidades académicas, su apoyo y motivación para realizar una meta más.

A mis padres **Fernando** y **Rocío**, por enseñarme el camino de la vida, gracias por sus consejos y su apoyo incondicional en mi vida. A mi **Ferchi**, por ser el mejor compañero de vida que mis padres me pudieron dar, además de saber que mis logros también son tuyos. Los amo inmensamente.

A mi familia, grandes y pequeños, a mis abuelos **Estela** y **Raúl**, por ser una parte fundamental en mi vida y llevarme en sus oraciones siempre. A mis tíos **Lupita**, **Miguel**, **Toño**, **Martín**, **Lidia**, **Raúl** y **Erika**, por estar presentes siempre y cuidarme. A mis hermanas postizas **Yami** y **Chia**, a mis niños hermosos **Carlos Raúl** y **Patricio**, a mis flacos **Arany**, **Amir**, **Lluvia** y **Yael** y a mis lindas muñecas **Mía** y **Neudy**, por estar conmigo y apoyarme en todo momento.

A **Orlando Quitano**, porque quienes nos aman jamás nos dejan. A pesar de lo adverso permaneciste a mi lado en esta etapa de vida aún con la distancia. Gracias por ser mi lugar seguro, por todo el cariño y apoyo. En especial, por estar para mí en todo momento y lugar. Te quiero muchísimo y hasta el fin te querré.

A **Gaby Ávila**, por ser una excelente amiga, tu apoyo incondicional, palabras de ánimos, estar al pendiente en la distancia y agradezco a Dios por permitirme encontrar una amistad tan pura y verdadera como la que me ofreces.

A mis amigos de toda la vida **Paulita, Don Rafa, Don Eusto, Naty, Joel, Filo** y **Lolita**, porque me vieron soñar en grande y hoy cumplir una meta más. Gracias por tan linda amistad.

A mi roomie **Mar,** por las risas, los buenos momento, la compañía, la amistad ofrecida y por no dejarme solita en esta aventura.

A mis amigos y compañeros que hice en CICESE, por compartir esta experiencia, las buenas aventuras, los viajes y su amistad inigualable.

# Tabla de contenido

# Página

Resu	umen e	en español	ii
Resu	umen e	en inglés	iii
Ded	icatori	a	iv
Agra	decim	ientos	v
Lista	a de fig	uras	ix
Lista	a de tal	plas	. xiii
Capíti	ulo 1.	Introducción	1
capit			
1.1	Masa	as de agua atrapadas por los remolinos de la Corriente de Lazo	3
1.2	Rem	olino "Poseidón"	5
1.3	Justi	cicación e hipótesis	6
1.4	Obje	tivos	7
1.4	1.1	Objetivo general	7
1.4	1.2	Objetivos específicos	7
Capítı	ulo 2.	Datos y Metodología	8
2.1	Dato	S	8
2.2	Meto	odología	. 10
2.2	2.1	Detección y descripción del remolino "Poseidón"	. 10
2.2	2.2	Perfiles verticales	. 13
2.2	2.3	Cuantificación de masas de agua	. 13
Capítı	ulo 3.	Resultados	. 15
3.1	Desc	ripción de la evolución temporal del remolino "Poseidón"	. 15
3.2	Estru	ctura vertical del remolino "Poseidón"	. 18
3.3	Cuan	tificación del porcentaje de masas de agua dentro del "Poseidón"	. 43
3.4	Cuan "Pos	tificación del porcentaje de masas de agua en función con la densidad dentro eidón"	del . 57

Capítulo 4.	Discusión	62
Capítulo 5.	Conclusiones	67
Literatura cita	da	69

# Lista de figuras

Figura

- Mapas de anomalías del nivel del mar mensuales de la evolución temporal del RCL "Poseidón" señalado por el contorno negro desde su formación (enero 2016), desprendimiento de la CL (abril 2016), desplazamiento al oeste (agosto 2016), interacciones (enero y abril 2017) y su disipación en el oeste del GoM (octubre 2017).

- 6. a) Captura de pantalla del video de la Topografía Dinámica Absoluta (ADT) y corrientes geostróficas del GoM (Fuente: https://gliders.cicese.mx/) para el día 25 de mayo del 2016 y b) anomalía del nivel del mar (SLA) para el día 25 de mayo del 2016 del "Poseidón" para la obtención del contorno rojo señalado en ambas figuras dentro de un recuadro negro....... 12
- 7. Contornos diarios por mes correspondientes a la primera etapa de vida del RCL "Poseidón" en 2016. El primer contorno de cada mes está señalado con línea azul gruesa, mientras que en línea roja gruesa se señala el último contorno del mes. La línea negra representa la distancia que recorrieron los centroides de su posición inicial (puntos azules) a la final (puntos rojos) y en color gris se observan los centroides que corresponden al resto de los días de cada mes. La barra de color indica el día del mes de cada contorno.
- 8. Ídem a la Figura 7 pero para la última etapa de vida del RCL "Poseidón" en 2017...... 16
- Contornos diarios correspondientes al RCL "Poseidón" sobre un mapa de SLA (cm) para el 1 de enero del 2016 (panel superior) y 8 de octubre del 2017 (panel inferior), respectivamente. La barra de color tabula el tiempo de cada contorno.
- Transectos de gliders a través del "Poseidón". En cada panel se muestran los contornos y centroides señalados con una línea sólida y asteriscos, respectivamente, mientras que la trayectoria del glider se señalada con una línea de puntos. La barra de colores tabula el tiempo de cada contorno.

#### Página

11.	Serie temporal de la distancia entre la localización del glider y el centroide del remolino "Poseidón" para a) transecto 1 y b) transecto 2. La periferia inicial, el centro y periferia final son señaladas por las líneas rojas
12.	Ídem a la Figura 11 pero para a) transecto 3, b) transecto 4, c) transecto 5,d) transecto 6, e) transecto 7 y f) transecto 8
13.	Detección del centro del remolino "Poseidón" para los transectos 4. La línea azul representa la serie de tiempo de la distancia entre la trayectoria del glider al centroide y la distancia mínima es señalado con la línea vertical azul. Las línea negra representa la serie temporal de la distancia entre la ubicación del glider al centro altimétrico y el centro se señala con la línea negra vertical, mientras que la línea roja representa la serie de tiempo de la profundidad promedio diaria de la isoterma de 20°C la línea roja vertical el instante de mayor profundización de la misma (centro <i>in situ</i> )
14.	Ídem a la Figura 13 pero para el transecto 1 23
15.	Ídem a la Figura 13 pero para los transectos a) 2, b) 3, c) 4, d) 5,e) 7 y f) 8 24
16.	Sección vertical de densidad (kg/m <sup>3</sup> ) y velocidades geostróficas (m/s) a través del remolino "Poseidón" para a) transecto 1 y b) transecto 2. Los círculos discontinuos señalan la ubicación de los remolinos intratermoclinos (ITEs)
17.	Ídem a la Figura 15 pero para los transectos a) 3, b) 4 y c) 5 27
18.	Ídem a la Figura 15 pero para los transectos a) 5, b) 6 y c) 7 28
19.	Sección vertical de salinidad en función de la profundidad y el tiempo por transectos de gliders a través del "Poseidón"
20.	Ídem a la Figura 19 pero para la sección vertical de temperatura potencia 30
21.	Perfiles verticales promedios de salinidad, temperatura y diagrama $\theta$ -S para cada transecto total. Cada transecto está señalado por colores, mientras los puntos negros del diagrama $\theta$ -S representan los núcleos de la NASUW y GCW
22.	Ídem a la Figura 21 pero para los perfiles verticales promediados únicamente en el centro del "Poseidón"
23.	Ídem a la Figura 21 pero para los perfiles verticales promedios a) periferias iniciales y b) periferias finales
24.	Perfiles verticales de salinidad por transecto (1, 2 y 3). Las líneas de color azul representan la periferia inicial, las líneas color naranja la periferia final y las líneas verdes representan los perfiles del centro del "Poseidón"
25.	Ídem a la Figura 24 pero para los a) transectos 4, 5 y 6 y b) transecto 7
26.	Ídem a la Figura 24 pero para los perfiles verticales de temperatura potencial 40

- 28. Método de cuantificación del porcentaje de las aguas típicas a los núcleos de masas de agua (CSWr, GCW, NASUW y TACW) de la superficie a 400 m de profundidad para el transecto 1. El primer panel representa el diagrama  $\theta$ -S utilizado en el análisis donde los colores representan la profundidad de los datos observados; los puntos de colores indican los diferentes núcleos de las diferentes masas de agua tipo (ver leyenda panel central). En el panel central se muestra el resultado de la dispersión del diagrama  $\theta$ -S en función del porcentaje de presencia de las diferentes masas de agua tipo. El último panel presenta el resultado del porcentaje promedio (binning) cada 5 m de profundidad de la dispersión del a dispersión del a dispersión del 35 m de profundidad de la dispersión del 36 m de 26 m de 36 m d
- 29. Ídem a la Figura 28 pero para a) transecto 2, b) transecto 3 y c) transecto 4. ...... 47
- 31. Método de cuantificación del porcentaje de las aguas típicas a los núcleos de masas de agua (CSWr, GCW, NASUW y TACW) de la superficie a 400 m de profundidad para los transectos a) 1, b) 4 y c)7. También se muestran los mapas de SLA para el día de la posición del glider en el centro de cada transecto (asterisco negro), el contorno del remolino (línea roja) y el centro del remolino (punto rojo) por transectos d) 1, e) 4 y f) 7.
- 32. Ídem a la Figura 31 pero para el flanco oeste del remolino "Poseidón". ...... 54
- 33. Ídem a la Figura 33 pero para el flaco este del "Poseidón". ..... 57
- Cuantificación de la dispersión de las aguas típicas al núcleo de diferentes masas de agua (de 0 a 400 m) para el centro del remolino "Poseidón" por transectos 3, 4 y 5 para a) flanco oeste y b) flanco este.

- 38. Sección vertical de salinidad para el transecto 4. ..... 64

 a) Método de detección con datos de altimetría satelital y b) Método de detección con datos de gliders. El contorno del centro del remolino "Poseidón" está señalado con el perímetro rojo al igual que su centro y el punto negro representa la posición del glider.

# Lista de tablas

#### 

# Capítulo 1. Introducción

El Golfo de México (GoM) es un mar marginal situado en la zona subtropical entre las latitudes de 18°N y 30°N y las longitudes de 82°W y 98°W, con una profundidad superior a 3500 m que colinda con los litorales de México, Estados Unidos y Cuba; y se comunica con el Mar Caribe y el Océano Atlántico por el Canal de Yucatán y el Estrecho de Florida, respectivamente. La circulación del GoM está afectada por estructuras coherentes casi-circulares conocidas como remolinos de mesoescala, principalmente por los remolinos anticiclónicos que se desprenden de la Corriente de Lazo (*CL Eddy* en Fig. 1), formando parte importante en las dinámica y termodinámica del golfo, ya que juegan un papel fundamental en el transporte de propiedades físicas y biogeoquímicas desde su zona de formación hasta regiones lejanas del oeste, contribuyendo en la mezcla lenta de diferentes masas de agua.



**Figura 1.** Mapa del GoM, Mar Caribe y Atlántico Occidental. Se esquematizan la Corrientes de Yucatán, la Corriente de Lazo (CL), el remolino anticiclónico que esta corriente desprende y la Corriente del Golfo. Los contornos grises indican la batimetría del lugar en metros (tomada de Oey *et al.,* 2005).

Los remolinos de la Corriente de Lazo (RCL) son grandes masas de agua cálidas y salinas, pero menos densas que las circundantes, rotan en sentido horario (anticiclónico). Estos remolinos son generados por el estrangulamiento del meandro que forma la CL y se desprenden aperiódicamente en intervalos aproximados de 6 a 11 meses (Sturges *et al.,* 2000; Lebel, 2005). Además poseen un tiempo de vida que va desde semanas hasta alrededor de un año, su flujo está asociado con anomalías positivas del nivel del mar, es decir, un lente de agua cálida con una elevación de la superficie del océano, a la que le corresponde un hundimiento de la termoclina debido a que capturan agua de la zona donde fueron formados, trasladándolos hacia otras regiones. Las dimensiones de los RCL llegan a ser de 100 km hasta 400 km de diámetro (Elliot, 1982) y se extienden hasta 1000 m de profundidad con una velocidad azimutal que pude llegar a 2 m s<sup>-1</sup> (Vidal *et al.*, 1994; Oey *et al.*, 2005; Meunier *et al.*, 2018a).

Tras desprenderse de la Corriente de Lazo, se propagan con una velocidad de 2 a 5 km día<sup>-1</sup> a través de tres trayectorias preferenciales (trayectoria norte, central y sur), siendo la trayectoria central que está acotada aproximadamente entre las latitudes 24°N y 25°N la más frecuente (62%) entre los RCL (Vukovich, 2007). Este movimiento zonal de los RCL es bien conocido y se debe al efecto que causa la variación latitudinal del parámetro de Coriolis (efecto beta) y el desplazamiento meridional de las partículas que los rodean al momento de su translación, las cuales van adquiriendo vorticidad relativa e inducen a que los remolinos se propaguen hacia el oeste (Cushman-Roisin *et al.,* 1990) y se disipen eventualmente entre otros mecanismos por interacción remolino-remolino o remolino-plataforma continental, reduciendo aproximadamente un 30% al momento que alcanza el talud continental al oeste del GoM (Vukovich, 2007). Esta disipación es importante, porque en ese proceso ocurre una redistribución de momento, vorticidad y otras propiedades termodinámicas en el océano, de la que resultan corrientes y un reacomodo de masas que afectan a la región en donde ocurre el proceso.

Otro componente importante de la circulación oceánica es la transformación de masas de agua, que se puede definir como el cambio que sufre una parcela de fluido en sus propiedades conservativas (temperatura [T] y salinidad [S]; Groeskamp *et al.*, 2016). Tales cambios pueden ser impulsados por flujos en las capas límites, como el calentamiento de la capa superficial, flujos de agua dulce provenientes de los ríos o por la mezcla ya sea horizontal o vertical, por ejemplo, el que resulta de la interacción de los remolinos de mesoescala con la topografía y con otros remolinos.

Diversos autores han estudiado la transformación de masas de agua en maneras distintas, con recursos y diferentes herramientas como la altimetría satelital, datos in situ (obtenidos de flotadores ARGOS y GLIDERs) y modelos numéricos (*e.g.* Pérez *et al.,* 2004; Groeskamp *et al.,* 2019). En un trabajo reciente

(*e.g.* Sosa-Gutiérrez *et al.,* 2020), sugieren que la formación del Agua Común del golfo se debe a la erosión progresiva del núcleo de salinidad de los RCL durante su desplazamiento hacia el oeste del GoM. Estos autores lograron generar conocimientos útiles e innovadores acerca de la transformación de masas de agua, sin embargo, pocos han sido los estudios que analizan la transformación de masas de agua dentro de remolinos de mesoescala y en particular en el GoM, debida a procesos dinámicos.

#### 1.1 Masas de agua atrapadas por los remolinos de la Corriente de Lazo

Además de desempeñar un papel muy importante en la circulación termohalina, los RCL son el principal medio de transporte de masas de agua que entran a través del Canal de Yucatán y se modifican a medida que viajan al oeste por mezcla con aguas circundantes del golfo. Conocer el origen de las masas de agua y entender los procesos físicos responsables de su transporte y transformación a lo largo de tiempo es fundamental. Portela *et al.* (2018) describen las masas de agua características del GoM y que están presentes en los RCL:

#### + El remante de agua superficial del Caribe (Caribbean Surface Water remnant, CSWr)

El CSWr se encuentra entre las profundidades de 50 m y 150 m y las isopicnas de 23.5 kg m<sup>-3</sup> y 25 kg m<sup>-3</sup>, coincidiendo con la ubicación de la capa máxima subsuperficial de oxígeno disuelto (dissolved oxygen, DO).

#### Agua subtropical subsuperficial del Atlántico Norte (North Atlantic Subtropical Underwater, NASUW)

Esta masa de agua se caracteriza por tener un máximo de salinidad absoluta (S<sub>A</sub>) superior a 36.8 g kg<sup>-1</sup>, con temperaturas conrservativas ( $\theta$ ) que oscilan entre los 20°C y 25°C, teniendo su núcleo en la isopicna de 25.5 kg m<sup>-3</sup>, el DO es ligeramente más bajo que el de las aguas circundantes. La NASUW se situada alrededor de los 200 m de profundidad.

#### + Agua común del golfo (Gulf Common Water, GCW)

Al igual que el CSWr, esta masa de agua se ubica entre los 50 m y 150 m de profundidad, sin embargo, apenas coexisten. El desprendimiento de los RCL y su propagación hacia el oeste conlleva al transporte de la NASUW al interior del GoM, erosionada por difusión vertical (Sosa-Gutiérrez *et al.*, 2020) y lateral (Meunier *et al.*, 2020), formando así el GCW. Se encuentra típicamente entre las

isopicnas de 25 kg m<sup>-3</sup> y 26 kg m<sup>-3</sup>, teniendo una SA menores a 36.8 g kg<sup>-1</sup>, valores de  $\theta$  entre los 20°C y 22°C y DO menores a 4.3 ml L<sup>-1</sup>.

#### + Agua central del atlántico tropical (Tropical Atlantic Central Water, TACW)

Localizada en la zona de mínimo oxígeno y en la isopicna de 27 kg m<sup>-3</sup>, presenta un DO menor a 2.5 ml L<sup>-1</sup> ubicada entre los 300 m y 700 m de profundidad.

#### + Agua intermedia Antártica (Antarctic Intermediate Water, AAIW)

Se localiza entre los 740 m y 900 m y se caracteriza por un mínimo profundo de S<sub>A</sub> aproximadamente de 35.08 g kg<sup>-1</sup> que se encuentra en la isopicna de 27.5 kg m<sup>-3</sup>. La  $\theta$  del AAIW en GoM varía entre 5.5°C y 6.5°C.

#### + Agua profunda del Atlántico Norte (North Atlantic Water, NADW)

Presente en todo el GoM y por debajo de la AAIW (>1000 de profundidad), encontramos a la NADW debajo de la isopicna de 27.75 kg m<sup>-3</sup>. Esta masa de agua tiene valores de SA de 35.15 g kg<sup>-1</sup>, con una  $\theta$  entre 4°C y 4.1°C por debajo de los 2000 m.

El diagrama  $\theta$ - S (Fig. 2) proporciona una representación clara de las principales masas de agua (descritas con anterioridad) presentes en el GoM entre la superficie y los 1000 m de profundidad.



**Figura 2.** Diagrama  $\theta$ -S y del oxígeno disuelto (*DO*, ml L<sup>-1</sup>, color) a partir de datos de glider. Los recuadros con líneas discontinuas representan los límites de las masas de agua en el GoM al oeste de 88°W. Figura extraída de Portela *et al.* (2018); las leyendas de las masas de agua están descritas en su interior

## 1.2 Remolino "Poseidón"

Numerosos han sido los RCL estudiados y muestreados durante los últimos años, sin embargo, esta investigación se enfocó en estudiar al remolino conocido como "Poseidón", que ha sido muestreado exhaustivamente por planeadores submarinos autónomos durante la mayor parte de su vida (Fig. 3).

Meunier *et al.* (2018a) mencionan que el remolino "Poseidón" se desprendió de la CL el día 15 de abril del 2016 causado por el efecto de dos ciclones frontales, alcanzó un diámetro a lo largo de su eje mayor y menor de 350 km y 300 km, respectivamente. De mayo a junio el RCL "Poseidón" se desplazó lentamente hacia el oeste del GoM con una velocidad que variaba entre los 2 cm s<sup>-1</sup> y 7 cm s<sup>-1</sup>. A principios de junio, los ejes del remolino se asemejan (diámetros de 310 km y 290 km, respectivamente) de tal manera que se formó una estructura casi-circular. En el mes de julio el RCL "Poseidón" comenzó a distorsionarse, evolucionando nuevamente a un remolino elíptico y para los meses restantes (agosto a diciembre) la forma del remolino no cambió significativamente. Durante 2017, el "Poseidón" se observó más deformado y débil, interactuando con otros remolinos circundantes a él y con la plataforma continental.



**Figura 3.** Mapas de anomalías del nivel del mar mensuales de la evolución temporal del RCL "Poseidón" señalado por el contorno negro desde su formación (enero 2016), desprendimiento de la CL (abril 2016), desplazamiento al oeste (agosto 2016), interacciones (enero y abril 2017) y su disipación en el oeste del GoM (octubre 2017).

Meunier *et al.* (2018a), mencionan que la estructura del "Poseidón" es el resultado de una combinación de condiciones atmosféricas y oceanográficas particulares y que se debe seguir investigando estos RCL para evaluar y comprender mejor su estructura, dinámica e impacto en la región. En particular proponen estudiar a fondo la evolución a largo plazo y la disipación de los RCL, ya que esto ayudaría a entender los procesos de mezcla que conducen a la liberación de calor y sal hacia el GOM y consecuente formación del GCW (i.e. la trasformación de masas de agua).

## 1.3 Justificación e hipótesis

Los RCL desde su formación hasta su disipación, juegan un papel importante en el transporte y transformación de masas de aguas a causa de la distribución horizontal y vertical de las propiedades termohalinas y biogeoquímicas (Chaigneau et al., 2009). Estos remolinos también son importantes en los procesos de mezcla en la capa superficial de océano y en el intercambio de calor con la atmósfera, teniendo un fuerte impacto en la formación, intensificación y evolución de huracanes (Shay *et al.*, 2000 ; Yablonsky & Ginis, 2013 ), ocurrencia de tormentas eléctricas al sur de los Estados Unidos (Molina *et al.*, 2016 ), así como en los ecosistemas (Biggs, 1992 ; Domingues *et al.*, 2016 ), operaciones de perforación de petróleo en aguas profundas (Koch *et al.*, 1991 ) y en la dispersión de derrames de petróleo (Goni *et al.*, 2015 ).

A pesar de que existen estudios acerca de la transformación de masas de agua en el GoM e incluso dentro de los remolinos que modulan su circulación (e.g. Vidal *et al.,* 1994; Sosa-Gutiérrez *et al.,* 2020), no hay un estudio observacional que analice dicha transformación de masas de aguas dentro de remolinos de mesoescala en función de los diferentes estados dinámicos del remolino o modos de inestabilidad (i.e. su forma). El cómo y cuándo se transforman estas masas de agua en el interior del remolino "Poseidón" aún no es claro y es posible que la interacción remolino-remolino o remolino-topografía jueguen un papel fundamental. Con este estudio se planeó investigar el posible papel de los cambios en la estructura vertical de propiedades conservativas asociadas a la transformación de masas de agua en su interior, específicamente la transformación de la NASUW/CSWr a la GCW. Además, se utilizó un modelo sencillo para la cuantificación de la transformación de masas de agua, asociándola con los diferentes estados dinámicos del RCL "Poseidón". Esto a su vez permitió localizar zonas o regiones donde la transformación de masas de agua juega un papel determinante en la disipación de esta importante estructura del GoM.

La hipótesis fundamental de este estudio es que habrá mayor mezcla entre las masas de agua en los primeros 400 m del remolino "Poseidón" cuando este se encuentre deformado por sus interacciones con otros remolinos o con la plataforma continental. Es decir, la mezcla será mayor cuando el remolino se deforme, por lo que la transformación de las masas de agua en el interior del remolino estará asociada a los efectos dinámicos de la interacción con otros remolinos y la topografía del GoM.

## 1.4 Objetivos

#### 1.4.1 Objetivo general

Explicar los procesos involucrados en la trasformación de masas de agua dentro del remolino "Poseidón" durante su vida (de joven a maduro) en el GoM, debido a las deformaciones sufridas por las interacciones remolino-remolino o remolino-topografía.

# 1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar y describir al remolino "Poseidón" a lo largo de su vida útil.
- Analizar perfiles verticales "típicos" de temperatura, salinidad, densidad y velocidades geostróficas del "Poseidón".
- Identificar los procesos involucrados en la transformación de masas de agua del interior del remolino "Poseidón".

#### 2.1 Datos

Para llevar a cabo este trabajo, se utilizaron datos obtenidos con planeadores submarinos autónomos (gliders, en inglés) encuadrados por sensores remotos (satélites), los cuales se resumen a continuación:

#### Altimetría satelital (Sensores remotos)

Para este estudio se utilizaron dos bases de datos de altimetría satelital, las cuales reflejan la circulación superficial del océano:

- (i) Datos de anomalía del nivel del mar (SLA, por sus siglas en inglés), consiste en la combinación de los datos de varios satélites. Estos datos de SLA son producidos por Ssalto/Duacs y distribuidos por AVISO (<u>http://www.aviso.oceanobs.com</u>), son útiles para la detección y seguimiento de remolidos oceánicos. Tienen una resolución espacial de 0.25° × 0.25° y una resolución temporal de 1 día.
- (ii) Datos de topografía dinámica absoluta (Absolute Dynamic Topography, ADT), estos productos representan la suma de la anomalía del nivel del mar y las alturas dinámicas medias con respecto al geoide. Esta base de datos tiene una resolución temporal y espacial igual a la anterior y son distribuidos por Copernicus Marine and Environment Monitoring Service (CMEMS; <u>https://www.copernicus.eu/en</u>).

#### Planeadores submarinos autónomos (gliders)

El Grupo de Monitoreo Oceanográfico con Gliders (GMOG) ha utilizado gliders para el monitoreo de variables oceanográficas con el propósito de estudiar los procesos y estructura de flujos de mesoescala y submesoescala en el GoM. El GMOG cuenta con ocho planeadores submarinos autónomos que monitorean la parte central y principalmente el oeste del GoM desde el 2016 hasta la actualidad.

Los gliders perfilan verticalmente la columna de agua, modificado su flotabilidad. Su desplazamiento horizontal es posible gracias a las variaciones de la flotabilidad asociados al movimiento de su centro de masa y la presencia de alas. En general, estos planeadores tienen una trayectoria tipo "diente de sierra"

(i.e en zig-zag; Fig. 4) a través de la columna de agua desde la superficie hasta una profundidad operacional máxima de 1000 m, con una velocidad promedio de 0.15 m s<sup>-1</sup> que resulta en una duración promedio de 4 hr en cada ciclo de buceo, recorriendo una distancia horizontal que varía hasta los 9 km dependiendo de las corrientes. Al final de cada emersión transfiere los datos a tierra vía satélite y se le puede proporcionar nuevas indicaciones para proseguir con su misión. Cada planeador está equipado con sensores para medir variables físicas (temperatura, conductividad, presión y corrientes), tales como el CT-sail, el cual mide temperatura y conductividad en la columna de agua y el AD2CP que perfila las corrientes relativas al glider y permite el cálculo de velocidades absolutas. Además los gliders del GMOG miden variables biogeoquímicas como material orgánico disuelto cromatográfica, turbidez y fluorescencia clorofila-a; así como oxígeno disuelto con un sensor óptico WetLabs.



**Figura 4.** Trayectoria en forma de "diente de sierra" de un gliders a través de la columna de agua (tomada de <u>https://gliders.cicese.mx/gliders</u>) y descripción de las diferentes fases de cada ciclo completo de inmersión/emersión (buceo).

Se utilizaron principalmente datos de T, S, densidad y velocidades geostróficas derivadas, obtenidos durante cinco misiones de glider en el GoM, realizadas por el GMOG (Tabla 1). El periodo total de monitoreo es aproximadamente de 14 meses (agosto 2016 a octubre 2017) donde se realizaron transectos diseñados para cruzar al remolino "Poseidón" a través de su centro y lo más paralelo posible a los gradientes termohalinos; este es un ejercicio difícil, ya que el glider tiende a moverse más lento que las intensas corrientes cercanas a la periferia del remolino (Rudnick *et al.,* 2015; Meunier *et al.,* 2018a).

Misión	SG- ID de las misiones de Glider	Periodo de misión	Ciclos de inmersión/emersión
M3	623-0003	06-Ago-2016 al 07-Nov-2016	582
M4	623-0004	09-Dic-2016 al 11-Mar-2017	429
M5	624-0005	12-Feb-2017 al 01-Jun-2017	483
M6	625-0006	27-May-2017 al 25-Jun-2017	340
M7	624-0007	06-Jul-2017 al 14-Oct-2017	643

**Tabla 1.** Referencia del número de misión de los glider de GMOG: ID de la misión, periodo de muestreo y ciclos de buceo totales de cada misión.

# 2.2 Metodología

A continuación, se describe la metodología que se utilizó para la consecución de los objetivos de este estudio.

## 2.2.1 Detección y descripción del remolino "Poseidón"

Para la identificación y seguimiento de los remolinos en el GoM se utilizó el método descrito por Chaigneau *et al.,* (2009). Este algoritmo consiste en identificar los centros y bordes de los remolinos a partir de altimetría satelital, buscando en ventanas de 1° x 1° sobre mapas diarios de SLA, los máximos y mínimos locales de SLA que está asociado con los centros de los remolinos anticiclónicos (RAs) y ciclónicos (RCs), respectivamente. Para cada centro detectado el algoritmo busca un contorno cerrado de SLA con un incremento de 0.1 cm, es decir, el contorno más externo cerrado asociado a cada centro de los RAs y RCs es considerado como la periferia del remolino y los centroides se encuentran en el baricentro de estos contornos.

En la Figura 5, se ilustra un ejemplo de la aplicación del método de detección a una imagen satelital de anomalia del nievel del mar del 25 de mayo del 2016, donde se identifican ocho RAs (contornos rojos) y once RCs (contornos azules) en el interior del GoM. Este procedimiento de detección se realizó para cada mapa diario de SLA durante todo el periodo de estudio y para todo el GoM, pero únicamente se enfocó en detectar al remolino "Poseidón".



**Figura 5.** Identificación de RAs y RCs para el día 25 de mayo del 2016, el mapa de color corresponde a la anomalía del nivel del mar (cm) y los vectores indican el campo de velocidad geostrófica superficial (ms<sup>-1</sup>) en balance con el gradiente horizontal de SLA. Los contornos rojos (azules) definen la periferia de los RAs (RCs) y los puntos rojos (azules) corresponden a los centroides de RAs (RCs).

Con ayuda de ADT y corrientes geostróficas del GoM obtenidas de AVISO (Fig. 6a) se pudo identificar y obtener el seguimiento del remolino "Poseidón" y así poder comparar los contornos correspondientes al "Poseidón" con el método de detección expuesto anteriormente (Fig. 6b).

Siguiendo el patrón de la ADT y de las corrientes geostróficas y delimitando la latitud y longitud de su ubicación se pudo identificar al remolino "Poseidón" durante toda su vida, es decir durante los 14 meses del periodo de estudio. Una vez identificados todos los contornos correspondientes al remolino, se procedió a analizar y obtener información sobre la trasformación de las masas de agua contenidas en su interior.



**Figura 6.** a) Captura de pantalla del video de la Topografía Dinámica Absoluta (ADT) y corrientes geostróficas del GoM (Fuente: <u>https://gliders.cicese.mx/</u>) para el día 25 de mayo del 2016 y b) anomalía del nivel del mar (SLA) para el día 25 de mayo del 2016 del "Poseidón" para la obtención del contorno rojo señalado en ambas figuras dentro de un recuadro negro.

#### 2.2.2 Perfiles verticales

En este estudio se utilizaron perfiles verticales de T, S y densidad obtenidas a partir de mediciones con glider. A partir de estos perfiles se calculó la  $\theta$ , S<sub>A</sub> y las velocidades geostróficas en el interior del remolino "Poseidón", durante las cinco misiones de glider mencionadas (ver Tabla 1).

Para el cálculo de velocidad geostrófica se utilizó la relación de viento térmico y la velocidad promedio de la columna de agua, inferida de la deriva del glider como la velocidad de referencia, de acuerdo con Rudnick *et al.*, (2015) y Meunier *et al.*, (2018a). Esta cantidad está dada por:

$$U_g(r,z) = \overline{U} + \frac{g}{\rho_0 fH} \iint_{-H}^0 \partial_r \rho dz^2 - \frac{g}{\rho_0 f} \int_{-H}^0 \partial_r \rho dz$$
(1)

donde  $U_g(r, z)$  es la velocidad geostrófica absoluta, g es la aceleración de la gravedad, f es el parámetro de Coriolis, H es la profundidad máxima (1000 m),  $\overline{U}$  es la velocidad promedio de la columna de agua, inferida de la deriva del glider,  $\rho$  es la densidad calculada por el glider y r es la coordenada curvilínea siguiendo su trayectoria.

#### 2.2.3 Cuantificación de masas de agua

Se utilizó el método descrito por Tomczak (1981), el cual se basa en ampliar las técnicas de diagramas  $\theta$ -S para el análisis de cualquier número de masas de agua que no involucren suposiciones tales como estratificación vertical o mezcla isopicnal. Cuando se aplica a un conjunto de observaciones y sus resultados se comparan, el método puede resultar útil para un estudio detallado de la importancia relativa de las diferentes masas de agua en la columna de agua y para la formulación de un análisis cuantitativo del porcentaje de masa de agua modificada por procesos de mezcla. Es un sistema de ecuaciones que se resuelve a partir de un método de mínimos cuadrados:

$$Ax = B \tag{2}$$

donde A es la matriz n × n de los valores de los parámetros para n aguas tipo, B es un vector de n elementos que contiene las observaciones y x es un vector de n elementos que da las contribuciones relativas de las aguas tipo. Los elementos de la última fila de A y el último elemento de B son idénticamente 1, para expresar la condición de que todas las contribuciones deben sumar 100% del volumen de agua observado. Un ejemplo es el triángulo de mezcla que se obtiene al establecer tres aguas tipo (n=3) y elegir la temperatura y la salinidad como parámetros independientes. Si ( $T_i$ ,  $S_i$ ) son los valores de temperatura y salinidad del agua tipo i (i = 1, 2, 3) y ( $T_{obs}$ ;  $S_{obs}$ ) es la temperatura y salinidad observada, el sistema de ecuaciones (2) se puede escribir como:

$$x_{1}T_{1} + x_{2}T_{2} + x_{3}T_{3} = T_{obs}$$

$$x_{1}S_{1} + x_{2}S_{2} + x_{3}S_{3} = S_{obs}$$

$$x_{1} + x_{2} + x_{3} = 1$$
(3)

El modelo al no tener ninguna restricción en función de las características de las masas de agua, sumará todas las contribuciones para dar un porcentaje que estará en función de la profundidad. Si hay más de tres aguas tipo involucradas se deberá medir parámetros adicionales debido que al hacer el análisis con más de tres aguas tipos, la temperatura y salinidad por sí solas son insuficientes, a lo que Tomczak (1981) sugiere utilizar más parámetros conservadores dado que deben mantener su valor en todos los procesos e independientes porque cualquier parámetro que sea una función lineal de otro parámetro hará que el determinante del sistema de ecuaciones (3) sea cero.

Para definir las aguas tipo se utilizó como referencia los límites que describen Portela *et al.* (2018), enfocándonos en cuatro aguas tipo presentes en los primeros 400 m de profundidad, las cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Límites de cada una de las masas de agua encontradas dentro	o del remolino "Poseidón	" (tomadas de Portela
et al. 2018)		

Masa de agua	Temperatura (°C)	Salinidad (gkg <sup>-1</sup> )	Rango de profundidad (m)
CSWr	27.0	36.35	50 – 150
NASUW	22.6	36.90	150 - 230
GCW	22.0	36.50	50 – 150
TACW	12	35.50	300 - 700

# 3.1 Descripción de la evolución temporal del remolino "Poseidón"

Esta sección tiene como objetivo identificar y describir al remolino "Poseidón" utilizando el método de detección desarrollado por Chaigneau *et al.*, (2009) y con base en datos de altimetría descritos anteriormente (Fig. 6b). Se obtuvieron características del "Poseidón" considerando su centroides y periferias, tales como: i) amplitud (m), ii) área (km<sup>2</sup>), iii) energía cinética (EKE en sus siglas en inglés; ms<sup>-1</sup>), iv) radios (km) y v) vorticidad (s<sup>-1</sup>).

Se decidió analizar al remolino "Poseidón" en dos periodos, uno durante el 2016 cuando ocurrió su primera etapa de vida y en el 2017 cuando se observó su disipación. En la Figura 7 se muestran los contornos mensuales para el año 2016 donde se observa que durante los primeros meses (enero, febrero y marzo) este remolino sigue siendo parte de la CL manteniendo ligeras deformaciones; moviéndose latitudinalmente durante estas deformaciones (i.e. los centroides se mueven de norte a sur), a mediados del mes de abril el remolino "Poseidón" se liberó de la CL y empezó su recorrido hacia el oeste del GoM. Se observó cómo el remolino tiende a ser más elíptico e incluso llega a ser circulares como se muestran a mediados y finales del mes de mayo; para los meses restantes (junio a diciembre), los centroides tienden a moverse zonalmente de sus posiciones iniciales a las finales. Durante esta primera etapa de vida, el remolino "Poseidón" se caracterizó por tener radios de 108 km - 201 km, un radio promedio de 151 km, con un rango de amplitudes de 22 cm – 52 cm, con 38 cm de amplitud promedio y un área superficial de 3.62x104 km<sup>2</sup> - 1.26x105 km<sup>2</sup>, características propias de un remolino fuerte y joven.

En el segundo y último periodo de vida del remolino "Poseidón" se observan contornos más deformados y con mayor complejidad a excepción de los meses de enero y febrero donde el remolino es más elíptico, (Fig. 8), estas deformaciones están asociadas a las interacciones que el remolino "Poseidón" tiene con remolinos adyacentes o con la misma topografía del golfo, lo que tiende a debilitar al remolino hasta su disipación completa en octubre del 2017. El algoritmo detectó al remolino "Poseidón" por última vez el día 8 de octubre. Para este periodo se encontraron rangos de radio entre 21 km – 215 km, un radio promedio de 129 km, amplitudes entre 0.78 cm – 25.02 cm con una amplitud promedio de 14 cm y un rango de áreas que van desde 215 km<sup>2</sup> a los 30 km<sup>2</sup>, teniendo un área promedio de 129 km<sup>2</sup>.



**Figura 7.** Contornos diarios por mes correspondientes a la primera etapa de vida del RCL "Poseidón" en 2016. El primer contorno de cada mes está señalado con línea azul gruesa, mientras que en línea roja gruesa se señala el último contorno del mes. La línea negra representa la distancia que recorrieron los centroides de su posición inicial (puntos azules) a la final (puntos rojos) y en color gris se observan los centroides que corresponden al resto de los días de cada mes. La barra de color indica el día del mes de cada contorno.



Figura 8. Ídem a la Figura 7 pero para la última etapa de vida del RCL "Poseidón" en 2017.

Con este método se pudo tener una descripción de la evolución temporal de la forma del remolino "Poseidón" durante toda su vida, es decir, desde su formación, desprendimiento de la CL, desplaza-miento al oeste, interacciones y finalmente disipación en la región más al oeste del GoM (Fig. 9); ambas figuras representan los contornos encontrados con el método de Chaigneau *et al.,* (2009) para el periodo de estudio y en conjunto se puede observar su trayectoria.



**Figura 9.** Contornos diarios correspondientes al RCL "Poseidón" sobre un mapa de SLA (cm) para el 1 de enero del 2016 (panel superior) y 8 de octubre del 2017 (panel inferior), respectivamente. La barra de color tabula el tiempo de cada contorno.

Este RCL se mostró extremadamente energético y después de desprenderse se desplazó hacia el oeste del GoM con una trayectoria central entre los 23°N y 27°N, interactuando con la topografía del golfo y con los remolinos vecinos, a medida que alcanzaba la parte occidental de la cuenta; finalmente se disipó bajo el efecto de la topografía y la turbulencia geostrófica (Lipphardt et al., 2008; Meunier et al., 2018a). Durante estos procesos, el remolino "Poseidón" transportó y disipó grandes cantidades de calor y sal, salinizando dramáticamente al GoM.

# 3.2 Estructura vertical del remolino "Poseidón"

Durante las últimas dos décadas, la descripción de los procesos de formación de los RAs y RCs, su desprendimiento de la CL y seguimiento a lo largo de su trayectoria por el GoM se ha hecho a través de la altimetría satelital y de modelos numéricos regionales, los cuales han aumentado en gran medida la comprensión de su dinámica e impactos. Sin embargo, las observaciones *in situ* de la estructura vertical de estas estructuras siguen siendo fundamentales para tener una visión completa tridimensional del remolino que permita validar los modelos numéricos ,entender su ciclo de vida y su contribución en la dinámica del GoM, así como para validar los resultados de los modelos numéricos. En los últimos quince años, los gliders han demostrado ser las plataformas idóneas para el muestreo de estructuras de mesoescala tales como remolinos, corrientes y frentes.

Como se ha mencionado con anterioridad, el interés principal de este estudio es analizar las masas de agua del interior del remolino "Poseidón", por lo que se seleccionaron transectos de glider a través del remolino; se obtuvo un total de 8 transectos. En la Tabla 3 se muestran los periodos correspondientes a cada uno de los transectos, así como el número de ciclos de buceo por transecto.

Misión	Transecto	Periodo	Ciclos de inmersión/emersión
M3	Transecto 1	09-Agos-2016 a 02-Sep-2016	203
	Transecto 2	25-Sep-2016 a 31-Oct-2016	276
M4	Transecto 3	15-Dic-2016 a 18-Ene-2017	319
БАГ	Transecto 4	13-Feb-2017 a 12-Mar-2016	203
	Transecto 5	30-Mar-2017 a 28-Abr-17	147
MG	Transecto 6	21-Jun-2017 a 02-Jul-2017	109
IVIO	Transecto 7	20-Jul-2017 a 31-Jul-2017	65
M7	Transecto 8	04-Sep-2017 a 30-sep-2017	139

**Tabla 3.** Transectos de glider a través del RCL "Poseidón" y periodo de observación. Se indica también el número de misión y de ciclo de buceo por transecto.

Cada transecto se realizó en un periodo entre 12 y 46 días. Durante los transectos 1, 2, 4, 5, 6 y 7 el gliders cruza al RLC "Poseidón" de manera perpendicular a la corriente geostrófica superficial derivada de la altimetría, mientras que en los transectos 3 y 8 el glider rotó con la corriente en superficie alrededor del remolino, es decir, en sentido de las manecillas del reloj. En la Figura 10 se muestran mapas 2D de los transectos de glider con sus contornos y centroides correspondientes en función del tiempo. En general, los transectos 2, 3, 4, 5, 7, 8 tuvieron un tipo de muestreo característico en dirección suroeste a noreste (noreste a suroeste), a excepción de los transectos 1 y 6 que fueron en dirección sur a norte. Durante estos ocho transectos se puede observar que el remolino "Poseidón" experimenta diferentes deformaciones asociadas a distintos procesos dinámicos.



**Figura 10.** Transectos de gliders a través del "Poseidón". En cada panel se muestran los contornos y centroides señalados con una línea sólida y asteriscos, respectivamente, mientras que la trayectoria del glider se señalada con una línea de puntos. La barra de colores tabula el tiempo de cada contorno.

Para el análisis se decidió usar dos periferias, una al inicio del transecto (periferia inicial), la otra al final (periferia final). Se realizó una serie temporal de la distancia entre la ubicación del glider en cada emersión

a lo largo del transecto y el centro geométrico del remolino (centroide). Para el transecto 1 (Fig. 11a), ambas periferias se ubican a los extremos del transecto y en este caso el glider pasó a 6 km del centro geométrico obtenido por el método de detección. Mientras que, para el transecto 2 (Fig. 11b) el glider pasó a 65 km.



**Figura 11.** Serie temporal de la distancia entre la localización del glider y el centroide del remolino "Poseidón" para a) transecto 1 y b) transecto 2. La periferia inicial, el centro y periferia final son señaladas por las líneas rojas.

Aplicando el mismos procedimiento a los demás transectos realizados (Fig. 12), se encontró que durante el transecto 8 (Fig. 12f) la distancia del glider al centroide del remolino "Poseidón" fue de 70 km, mientras que para el transecto 4 el glider se ubicó a 3 km del centroide (Fig. 12b).



**Figura 12.** Ídem a la Figura 11 pero para a) transecto 3, b) transecto 4, c) transecto 5,d) transecto 6, e) transecto 7 y f) transecto 8.

Durante el análisis, se notó que esta consideración para definir el centro del remolino "Poseidón" falló para el transecto 4, ya que a la hora de extraer la información correspondiente a su centro se observó que
los datos que proporcionaba carecía de características de un centro típico de un RAs (*i.e.* núcleo típico de la NASUW), por lo que se consideró calcular el centro nuevamente, pero ahora tomando la profundidad de la isoterma de 20°C para representarlo. Se calculó la profundidad promedio diaria de la isoterma de 20°C obtenida con los datos de gliders y se define el centro del remolino "Poseidón" como la localización en el transecto donde la isoterma tiene su máxima profundización.

En la Figura 13 se comparan la serie temporal de la profundidad de la isoterma de 20°C, la distancia de la ubicación del glider al centroide y la distancia al máximo local de SLA (centro altimétrico), con la finalidad de comparar las diferencias que existen entre definir el centro con datos de altimetría satelital y con datos *in situ* de glider. Se observa que ambos cetros encontrado con altimetría satelital (centroide y centro altimétrico) coinciden, mientras que el centro calculado con la máxima profundidad de la isoterma de 20°C se encontró el 26 de febrero del 2016 días antes de los calculados con altimetría satelital



**Figura 13.** Detección del centro del remolino "Poseidón" para los transectos 4. La línea azul representa la serie de tiempo de la distancia entre la trayectoria del glider al centroide y la distancia mínima es señalado con la línea vertical azul. Las línea negra representa la serie temporal de la distancia entre la ubicación del glider al centro altimétrico y el centro se señala con la línea negra vertical, mientras que la línea roja representa la serie de tiempo de la profundidad promedio diaria de la isoterma de 20°C la línea roja vertical el instante de mayor profundización de la misma (centro *in situ*).

Haciendo el mismo análisis para los demás transectos, se encontró para el transecto 1 (Fig 14) ambas series temporales de la distancia del glider al cenroide y al centro altimerico, respectivamente, prentan un comportamiento muy similar entre ellas, mientras que la serie temporal de la profundidad de la isoterma de de 20°C presentan una tendencia opuesta. Se observa que los centros encontrados con estos metodos se encuentran desfasados con pocos dias de dierencia. El centro detectado con datos *in situ* fue el 23 de agosto del 2016 donde la isoterma de 20°C se profundizó hasta alcanzar los 338 m de profundidad, mientras que los centros detectados con altimetría fueron el día 22 de agosto del 2016 con el centroide y el 24 de agosto del 2016 con el centro altimetrico, considerando que cada metodo utilizados para la identificacion del centro del remolino "Poseidón" tuvo un desface de un día, se pudó inferir que estos metodos coiciden.



Figura 14. Ídem a la Figura 13 pero para el transecto 1.

Para los transectos 2 y 3 (Figs. 15a y b) en el caso del centro encontrado con los datos *in situ*, se observó que cerca de las periferias se tenía una máxima profundidad de la isoterma de 20°C por arriba de los 295 m, lo que sugiere que estos máximos estarían asociados a intrusiones de agua más cálidas causado por algún proceso dinámico y no al centro del remolino "Poseidón". Sin embargo, la máxima profundidad de la isoterma de 20°C mantuvo un rango constante, por lo que se consideró, un día dentro de este rango como el posible centro del remolino. Cabe señalar que durante estos transectos el remolino "Poseidón"

sufre algunas deformaciones causadas por la interacción con remolinos cercanos a él y también con la plataforma continental.

En los transectos 5, 7 y 8 (Fig.15 c, d y f), se obtuvo resultados similiares, teniendo una diferencia minima entre 1 y 3 dias entre los diferentes centros detectados con altimetría y los detectados con perfiles verticales de temperatura obtenidos con los gliders. Una excepción fue el transecto 6 (Fig. 14c), ya que el centro fue detectado el mismo día 24 de junio del 2016 con ámbos métodos.



Figura 15. Ídem a la Figura 13 pero para los transectos a) 2, b) 3, c) 4, d) 5,e) 7 y f) 8.

A continuación se muestran las secciones de densidad interpoladas objetivamente, utilizando una malla espacial x-z regular (x indica la dirección de traslación del glider) y escalas de correlación definidas tanto en la horizontal como en la vertical (15 km y 20 km, respectivamente). Con estos campos de densidad se calcularon las velocidades geostróficas, la cuales fueron evaluadas sin modificar la dirección del glider, por lo que velocidades negativas se ubican a la izquierda del glider (*i.e.* saliendo de la página) y las positivas a su derecha (entrando hacia la página). Es importe señalar que el glider solo permite calcular la velocidad geostrófica transversal a su dirección de traslación, ya que únicamente se puede estimar el gradiente a lo largo de su trayectoria.

En la Figura 16a se muestra la sección vertical de densidad para el transecto 1, en el cual se observa un núcleo homogéneo entre los 100 m y 200 m de profundidad, aproximadamente. Este núcleo, también conocido como "termostato" (Sosa-Gutiérrez et al. 2010), está delimitado por zonas de estratificación fuerte (picnoclinas) y representa una de las características principales de los RCL. También se puede observar la presencia de remolinos intratermoclinos (ITE, por sus siglas en inglés) entre los ~ 230 m y 400 m de profundidad. Esto ITE divide la picnoclina en dos que contienen aguas con propiedades termohalinas casi homogéneas. Además, se muestra la sección vertical de velocidades geostróficas derivadas del campo de densidad donde se observa el efecto del fuete gradiente de densidad en las periferias del remolino "Poseidón" ocasionando dos núcleos de velocidades intensas muy bien definidos donde se observa velocidades absolutas máximas de >0.28 ms<sup>-1</sup> ubicada entre la superficie y los 230 m de profundidad. Los ITE se pueden observar en la sección de densidad (círculos negros discontinuos), muestran una circulación anticiclónica asociada con dos chorros de velocidad geostrófica de 0.1 ms<sup>-1</sup> y simetría azimutal. En este caso la sección de densidad durante el transecto 2 (Fig. 16b) muestra un núcleo de densidad homogénea entre los 50 m y 200 m de profundidad, la presencia de ITE (ver Meunier *et al.*, 2018b) y los núcleos de máximas velocidades en ambas periferias del remolino "Poseidón".

A diferencia de los transectos anteriores, el transecto 3 (Fig. 17a), no presentó señal de ITEs, sin embargo, se sigue observando la estructura del remolino "Poseidón" con el núcleo homogéneo y ambos núcleos de velocidad máxima en las periferias como en los primeros dos transectos. Para el transecto 4 (Fig. 17b) el núcleo empieza a estar más somero (<200 m) y un ITE se vuelve nuevamente notorio por debajo de 200 m. El núcleo de velocidad máxima es asimétrico todavía intenso de >0.28 m s<sup>-1</sup> al inicio de la sección y más débil (0.07 m s<sup>-1</sup>) entre la superficie y 155 m de profundidad al final de la sección. En el transecto 5 (Fig. 17c) los núcleos de velocidad máxima siguen disminuyendo (0.06 m s<sup>-1</sup>) en ambas periferias.



**Figura 16.** Sección vertical de densidad (kg/m<sup>3</sup>) y velocidades geostróficas (m/s) a través del remolino "Poseidón" para a) transecto 1 y b) transecto 2. Los círculos discontinuos señalan la ubicación de los remolinos intratermoclinos (ITEs).



Figura 17. Ídem a la Figura 15 pero para los transectos a) 3, b) 4 y c) 5.

Por último, se muestran las secciones de los transectos 6 y 7 (Fig. 18b y c). El núcleo del remolino "Poseidón" es somero (centrando en 100 m), los ITE ya no se observan y los núcleos de velocidad máxima en las periferias siguen disminuyendo para ambas periferias y se ubican entre la superficie y los 65 m de profundidad, para el caso de la periferia inicial y entre la superficie y 135 m de profundidad para la periferia final.



Figura 18. Ídem a la Figura 15 pero para los transectos a) 5, b) 6 y c) 7.

En las siguientes Figuras se presentan las secciones verticales de salinidad y temperatura de los diferentes transectos para hacer un análisis cuantitativo de la presencia de las diferentes masas de agua dentro del remolino "Poseidón". En el caso de la sección vertical de salinidad del transecto 8 el glider tuvo un problema con el sensor de conductividad por lo que no se pudo calcular la salinidad durante el resto de la trayectoria del glider.

Se puede observar que para las secciones de salinidad (Fig. 19) de los transectos 1, 2, 3 y 4 entre los 200 m y 300 m encontramos la NASUW, lo que se confirmó con las secciones de temperatura potencial ( $\theta$ ), ya que esta masa se encuentra típicamente definida entre los 20°C y 25 °C. Durante el transecto 5 se pueden observar todavía "parches" de lo que podría ser NASUW, sin embargo en el resto de los transectos (6, 7 y 8), la masa de agua NASUW claramente no está presente



Sección vertical de Salinidad

**Figura 19.** Sección vertical de salinidad en función de la profundidad y el tiempo por transectos de gliders a través del "Poseidón".

En las secciones verticales de temperatura potencial (Fig. 20) se observa claramente el ciclo estacional de la profundidad de la capa de mezcla con las máximas temperaturas en una pequeña franja superficial durante los meses de verano, mientras que esta se extiende en profundidad durante los meses de invierno por procesos de mezcla vertical que destruyen la termoclina estacional principalmente asociada al paso de frentes fríos de norte en la temporada invernal.



Sección vertical de Temperatura Potencial

Figura 20. Ídem a la Figura 19 pero para la sección vertical de temperatura potencia.

En la Figura 21 se muestran los perfiles promedios termohalinos para cada transecto. En los perfiles verticales de salinidad (primer panel) donde se puede observar el pico de máxima salinidad característico de la NASUW está muy marcado en los primeros dos transectos, empezando su erosión durante el transecto 3 y 4 donde el núcleo de la NASUW disminuye (se reduce el máximo subsuperficial de salinidad) y se localiza más somero entre los 150 m y 200 m. Este es el rango de profundidades donde se mantiene el núcleo de la NASUW erosionándose durante el resto del año y hasta su disipación en octubre del 2017 (transectos 5, 6 y 7). En cuanto a los perfiles verticales de temperatura se observa una capa de mezcla muy somera (50 m) para los transectos 1 y 2 y profunda (150 m) durante los transectos 3, 4 y 5 asociado al paso de frentes fríos sobre el GoM (Sosa-Gutiérrez *et al.*, 2020). Durante los transectos 6, 7 y 8; y la llegada del verano, la capa de mezcla vuelve a ser somera. También es evidente el fuerte enfriamiento que sufre el remolino "Poseidón" durante los ocho transectos. Sosa-Gutiérrez *et al.* (2020) sugieren que el

desplazamiento de las isotermas (enfriamiento) puede estar relacionado con el debilitamiento del "Poseidón". Los diagramas  $\theta$ -S para los ocho transectos muestran claramente que existe una transformación de masas de agua entre la NASUW a GCW y esta transformación se empieza a notar a partir del transecto 4.



**Figura 21.** Perfiles verticales promedios de salinidad, temperatura y diagrama  $\theta$ -S para cada transecto total. Cada transecto está señalado por colores, mientras los puntos negros del diagrama  $\theta$ -S representan los núcleos de la NASUW y GCW.

Para evidenciar los efectos de la erosión de las masas de agua dentro del remolino "Poseidón" se realizó el análisis de los perfiles verticales promedios para los centros de los ocho transectos. Es importante recalcar que debido a que el método de detección con datos satelitales falló para el transecto 4, se optó por utilizar, para este transecto en particular el centro encontrado a partir de la profundidad de la isoterma de 20°C.

En los perfiles verticales promedio para los centros (Fig. 22), se obtuvieron resultados similares al de los promedios por transecto (Fig. 21). En los perfiles de salinidad indica una erosión del máximo salino

característico de NASUW, el cual se encuentra situado entre los 200 m y 250 m para el caso de los transectos 1 y 2, mientras que esta erosión es más notable a partir del transecto 3 donde el máximo salino ya es más somero (entre los 150 m y 200 m de profundidad). En los transectos 3 y 4 el máximo aún está muy marcado con valores de salinidad de 36.8 kg m<sup>-3</sup> y para los transectos 5, 6 y 7 la salinidad ya disminuye por debajo de los 36.8 kg m<sup>-3</sup>, sugiriendo dilución de la NASUW. Los perfiles verticales de temperatura nuevamente indican enfriamiento en la capa de mezcla. En los transectos 1 y 2 se tiene una capa de mezcla muy somera que se empieza a profundizar llegando a 150 m en los transectos 3, 4 y 5, disminuyendo 5 °C en superficie, aunque para los últimos tres transectos (6, 7 y 8) la temperatura en superficie vuelve a aumentar (~ 3°C), volviendo a observarse una capa de mezcla somera con la base en 50 m de profundidad. Los diagramas θ-S nos muestran de nuevo como la NASUW se va transformando en GCW.



Figura 22. Ídem a la Figura 21 pero para los perfiles verticales promediados únicamente en el centro del "Poseidón".

Se realizaron las mismas figuras para el caso de los perfiles verticales promedio en las periferias iniciales y finales de los diferentes transectos (Figs. 23a y b). Para las periferias iniciales (Fig. 23a), se obtuvieron perfiles de salinidad muy similares entre los ocho transectos con máximos de salinidad subsuperficial en un rango entre 36.5 gkg<sup>-1</sup> y 36.6 gkg<sup>-1</sup> a profundidades que varían entre los 100 m y 200 m. En cuanto a los

perfiles verticales de temperatura en las diferentes periferias, la mayoría de los transectos presentan una profundidad de la capa de mezcla a ~50 m, a excepción del transecto 5 donde se observa una capa de mezcla claramente más profunda ~100 m. En las periferias iniciales del remolino "Poseidón" se observa un enfriamiento y dilución de la salinidad entre los transectos 1 y 8, indicando el decaimiento del remolino. Sin embargo, las periferias finales de los diferentes transectos (Fig. 23b) muestran todavía la presencia del máximo salino típico de aguas del Caribe (transecto 2, 3 y 4). Estas periferias son las más alejadas de la plataforma oeste del GoM. Durante los transectos 2, 3 y 4 el remolino "Poseidón" se encuentra desplazándose al oeste del GoM, empezando su interacción con la plataforma continental por un flanco oeste y con remolinos adyacentes a él, lo que provoca múltiples deformaciones, causado posiblemente las diferencias entre los perfiles termohalinos de ambos flancos del remolino. Estas deformaciones del remolino podrían permitir que las masas de agua típicas del remolino (NASUW) puedan ser detectadas cerca de la periferia.

En relación con los perfiles de temperatura en la periferias, se muestra una capa de mezcla muy somera apenas llegando a 50 m de profundidad para los transectos 1 y 2, que se empieza a profundizar hasta llegar a 150 m en los transectos 3, 4 y 5. Aunque existe la posibilidad de que estos perfiles no sean de las periferias del remolino, ya que las periferias se definieron con base a datos satelitales de altimetría. En los transectos 6, 7 y 8 la capa de mezcla vuelve a estar ubicada en los primeros 50 m cerrando así el ciclo estacional de la profundidad de la capa de mezcla en el golfo. En los diagramas  $\theta$ -S se observa en casi todos los transectos la presencia de la GCW a excepción de los transectos iniciales 2, 3 y 4 en los cuales se muestra la presencia de la NASUW de un "Poseidón" joven. Esta presencia persiste de GCW a partir del transecto 4 es indicativo de la transformación de la NASUW a GCW durante los periodos de fuertes deformaciones provocadas posiblemente por interacciones del remolino "Poseidón" con otras estructuras y con la plataforma al oeste del GOM.

La presencia de la NASUW junto a las periferias detectadas por los datos de ADT satelitales podría asociarse con las deformaciones que sufre el "Poseidón" durante su desplazamiento al oeste del GoM donde interactúa con otros remolinos y finalmente con la topografía del oeste del GoM. Nótese que en la Figura 10 se tienen contornos del "Poseidón" más deformados, lo que sugiere que el remolino en esta etapa tiene más posibilidades de intercambiar propiedades con el exterior y así, originar una erosión efectiva de la NASUW con formación de la GCW cerca de la periferia del remolino.





Figura 23. Ídem a la Figura 21 pero para los perfiles verticales promedios a) periferias iniciales y b) periferias finales

A continuación, se analizan los perfiles verticales de salinidad de los centros y periferias iniciales y finales por transecto medido con los gliders. En el primer panel de la Figura 24 se muestran los perfiles correspondientes al transecto 1 donde se observa para la periferia inicial perfiles que tienen un máximo de salinidad a 200 m de profundidad con fuerte variabilidad; para la periferia final se tiene el máximo salino un poco más profundo y con menos variabilidad. Para el centro se tienen perfiles con un máximo salino con valor 36.9 g kg<sup>-1</sup> ubicado a ~230 m y muy bien definido. Este máximo salino típico de la presencia de la NASUW también se observa en el transecto 2 ligeramente por arriba de 230 m para el caso del centro y los perfiles correspondientes a la periferia final, pero para este caso se ubicó a 200 m de profundidad.

En cuanto a los perfiles correspondientes al transecto 3, en la periferia inicial se obtuvieron valores menores a los 36.6 g kg<sup>-1</sup>, donde se pude observar que durante este transecto los perfiles tanto de ambas periferias como los del centro se encontraron muy cercanos entre sí, sugiriendo que la erosión de la NASUW alcanzó el interior del remolino "Poseidón" y no se redujo únicamente a la periferia. Notando el hecho de observar más consistentemente la NASUW en las periferias finales del remolino que en las iniciales sugiere que existe una erosión diferencial en ambos flancos del remolino; siendo mayor en el

flanco oeste que interacciona en primera instancia con la plataforma oeste del GoM. Nótese que el método de detección puede representar una fuente importante de error en la separación de perfiles de centro y periferia; considerando perfiles de periferia como de centro y viceversa. La sensibilidad a este error se pudo calcular aplicando otro método de detección de remolinos y comparando los resultados con el utilizado en esta tesis.

En la Figura 25 se muestran los perfiles verticales de salinidad del resto de los transectos (4, 5, 6 y 7). Para las periferias se observa un máximo salino con valores mayores a los 36.5 g kg<sup>-1</sup> en un rango entre los 100 m y 200 m de profundidad. Para el centro, los perfiles que se observan tienen valores de salinidad muy similares, pero el pico se encuentra a 200 m. Comparando los transectos anteriores y estos se puede observar la erosión del máximo salino en todos los sectores del remolino (periferias y centro), el cual inició con valores mayores a 36.8 g kg<sup>-1</sup> (transecto 4) que se reducen hasta un 0.3 g kg<sup>-1</sup>, hasta llegar a valores ligeramente mayores a 36.5 g kg<sup>-1</sup>.

Al igual que los transectos 1 y 3, los perfiles correspondientes a la periferia inicial del transecto 4, muestran una variabilidad diferentes que puede estar asociada al tipo de muestreo, ya que el glider en todas las misiones comenzó su trayectoria cerca de la plataforma continental, lo que sugiere que esta región presenta más variabilidad asociada a la interacción del remolino "Poseidón" con la topografía.



Figura 24. Perfiles verticales de salinidad por transecto (1, 2 y 3). Las líneas de color azul representan la periferia inicial, las líneas color naranja la periferia final y las líneas verdes representan los perfiles del centro del "Poseidón".

Haciendo el mismo análisis, pero ahora para los perfiles verticales de temperatura potencial (Fig. 26), se tiene una capa de mezcla muy marcada en los primeros 50 m de profundidad en las tres regiones del remolino (centro y periferias). En el transecto 3, sin embargo, se nota que los perfiles correspondientes al centro y periferia presentan una profundidad de la capa de mezcla ~25 m más profunda del transecto 1 al 8, se observa una homogenización de los perfiles verticales de temperatura entre regiones del remolino. Los transectos 1 y 2 se realizaron durante los meses de verano-otoño, lo que explica la profundidad somera de la capa de mezcla y que la termoclina y temperatura superficial sea elevada entre los 30°C y 28°C. El transecto 3 se realizó durante meses de invierno, por lo que se obtiene una capa de mezcla más profunda como se observa en los perfiles del centro y periferia final con rangos entre los 120 m y 180 m de profundidad, respectivamente.

En los perfiles verticales de los transectos 4 y 5 (Fig. 26b) tienen un comportamiento similar con una capa de mezcla profunda que alcanza 150 m, mayormente marcada en los perfiles del centro del "Poseidón".



Figura 25. Ídem a la Figura 24 pero para los a) transectos 4, 5 y 6 y b) transecto 7.

Sin embargo, cabe señalar que estos transectos fueron realizados durante meses de invierno-primavera, mientras que los transectos 6 (Fig. 26b), 7 y 8 (Fig. 26c), se realizaron nuevamente en meses de verano-

otoño y por ello, la capa de mezcla vuelve a ser somera ubicándose en los primeros 50 m (ciclo estacional en superficie para el GoM). Nótese también como los perfiles del centro y periferias se empiezan a parecerse entre ellos, lo que nos indicaría el debilitamiento progresivo del remolino "Poseidón".





Figura 26. Ídem a la Figura 24 pero para los perfiles verticales de temperatura potencial

Una vez hecho el análisis de los perfiles verticales de S y T, se procedió a describir los diagramas  $\theta$ -S para proceder con un análisis cualitativo de los diferentes tipos masas de agua en el interior del remolino "Poseidón" durante el periodo de su vida.

En la Figura 27a se muestran los diagramas  $\theta$ -S del centro y ambas periferias iniciales y finales. Para el  $\theta$ -S referente al transecto 1, se puede observar la presencia muy marcada de tres masas de agua CSWr, GCW y TAWC en ambas periferias, pero también se observa una ligera presencia de la NASUW en las periferias iniciales. El diagrama  $\theta$ -S del centro muestra la presencia nuevamente de tres masas de agua una más somera correspondiente a CSWr, otra intermedia NASUW y una más profunda TACW. En el transecto 2, se observó algo similar al transecto 1, sin embargo, en la periferia final no se observó la presencia de GCW, mientras que en la periferia inicial sí. En cuanto al  $\theta$ -S del centro del transecto 2 se observó idéntico al transecto 1 pero con agua más fría en superficie debido al inicio del otoño y de la temporada de frentes fríos. Para el transecto 3, se observa una historia parecida al transecto 2 la presencia de las tres masas de agua CSWr, GCW y TACW en el  $\theta$ -S de la periferia inicial, mientras que los diagramas de la periferia final y

centro muy parecidos teniendo presente solo dos masas de agua NASUW y TACW, mientras los diagramas θ-S para los transectos 4, 5 y 6 se muestran en la Figura 27b, en los cuales se observan que el diagrama del centro del "Poseidón" se asemeja a los  $\theta$ -S de las periferias (inicial y final), la presencia de NASUW es nula, a excepción de la periferia final del transecto 4 donde todavía no se ha diluido completamente la NASUW. En resumen, las aguas que predominaron más en los tres  $\theta$ -S fueron consistentemente la CSWr, GCW y TACW. Por último, en el transecto 7 (Fig. 27c), los diagramas que se muestran son casi idénticos, la presencia de la CSWr y TACW está muy marcada y se observa la ausencia de NASUW.

Estos resultados muestran la evidente erosión del núcleo de máxima salinidad durante la vida del "Poseidón", es más evidente durante el transecto 4 donde el remolino presenta mayor erosión probablemente causada por las interacciones con su entorno y deformación. También es evidente la transformación de la NASUW en GCW, la cual se discutirá más adelante.



**Diagramas O-S** 





c)

**Figura 27.** Diagramas  $\theta$ -S por transectos. Los puntos color verde representa el  $\theta$ -S del centro del "Poseidón", los puntos azules la periferia inicial y con los puntos naranjas la periferia final. Los recuadros discontinuos señalan los límites de las diferentes masas de agua

## 3.3 Cuantificación del porcentaje de masas de agua dentro del "Poseidón"

Una vez hecho el análisis cualitativo de los diferentes tipos de masas que se encontraban dentro del remolino "Poseidón", se procedió a cuantificar la dispersión de los diagramas  $\theta$ -S en función del porcentaje de esas masas de agua con los diferentes núcleos de cada una de las masas de agua tipo, utilizando el método descrito en la sección 2.2.3.

Se estudiaron cuatro masas de agua en particular: CSWr, GCW, NASUW y TACW ubicadas entre la superficie y los 400 m de profundidad. Al encuadrar el análisis se encontró que este método tiene un margen de error de 20%, asociado a la ausencia de restricciones adicionales en función a las características de las diferentes masas de agua y por suponer que la suma total del efecto de las diferentes masas de agua es igual al 100% de la dispersión de los datos del diagrama  $\theta$ -S, por lo que se utilizarán solo los resultados superiores al 20%. También se delimitó los rangos de profundidades donde cada una de estas masas de

agua existen, por lo que aguas que no se encuentren dentro de este rango no son precisamente las masas de agua que se estudiaron, posiblemente siendo masas de agua transitorias consideradas como aguas en función del nucleó de cada una de las diferentes masas de agua.

En las siguientes figuras se cuantifica el porcentaje de agua en función de los núcleos de las masas de agua de la superficie hasta 400 m a lo largo de los diferentes transectos totales. El primer panel muestra el diagrama θ-S utilizado en el análisis donde se señalan los núcleos de las diferentes masas de agua a cuantificar (CSWr, GCW, NASUW y TACW), el segundo panel muestra el resultado del método de cuantificación con un binning (promedio) cada 5 m de profundidad, el cual se promedió en el tercer y último panel en función del porcentaje para una mejor visualización del comportamiento en la columna de agua. Para el transecto 1 (Fig. 28) se observan dos masas de agua coexistiendo con una fuerte compensación, es decir, cuando hay un mayor porcentaje de CSWr, el porcentaje de GCW tiende a disminuir. Las aguas típicas al núcleo de la CSWr se cuantificaron entre los 50 m y 150 m de profundidad con un porcentaje máximo del 90% por debajo de los 50 m de profundidad donde comenzó a disminuir, mientras la GCW se mantiene con un rango menor a los 40% de presencia. Las aguas típicas al núcleo de la NASUW comienzan aumentar por debajo de los 200 m de profundidad con un máximo del 90% a los 255 m, mientras que la TACW (300 m a 400 m) comienza a aumentar con un 80% de presencia a los 400 m. Claramente, se encontró en este transecto total la señal típica de las diferentes masas de agua contenidas en el RCL expresada por el porcentaje de la dispersión del diagrama  $\theta$ -S en función de las diferentes masas de agua tipo.



**Figura 28.** Método de cuantificación del porcentaje de las aguas típicas a los núcleos de masas de agua (CSWr, GCW, NASUW y TACW) de la superficie a 400 m de profundidad para el transecto 1. El primer panel representa el diagrama  $\theta$ -S utilizado en el análisis donde los colores representan la profundidad de los datos observados; los puntos de colores indican los diferentes núcleos de las diferentes masas de agua tipo (ver leyenda panel central). En el panel central se muestra el resultado de la dispersión del diagrama  $\theta$ -S en función del porcentaje de presencia de las diferentes masas de agua tipo. El último panel presenta el resultado del porcentaje promedio (binning) cada 5 m de profundidad de la dispersión del  $\theta$ -S en función del núcleo de las diferentes masas de agua tipo.

El transecto 2 (Fig. 29a), el porcentaje cuantificado para la CSWr (GCW) disminuyó (aumentó) un 5% comparando con el transecto anterior, mientras que el resultado para las aguas referentes al núcleo de la NASUW es similar. Para el transecto 3 (Fig. 29b) la CSWr y la GCW se cuantificaron con un porcentaje constante del 60% y 40% de presencia, respectivamente, entre los 50 m y 150 m de profundidad, mientras que para el transecto 4 (Fig. 29c) este comportamiento se invierten, cuantificando un porcentaje constante del 40% y 50%, respectivamente. Por su parte, las aguas típicas del núcleo de la NASUW comienzan a ser más someras y empieza a aumentar ligeramente más arriba de la columna de agua alcanzando entre los 150 m y 230 m de profundidad un máximo cercano a los 180 m con un 60% de presencia. La TACW a su vez (300 m a 400 m) comienza a aumentar con un 80% de presencia a los 395 m y a los 325 de profundidad, respectivamente.





b)

Transecto 3 (Total)





Figura 29. Ídem a la Figura 28 pero para a) transecto 2, b) transecto 3 y c) transecto 4.

Para los transectos 5, 6 y 7 (Figs. 30 a, b y c), el porcentaje de la GCW presenta un máximo del 80% por arriba de los 150 m de profundidad, mientras que el máximo para la NASUW, la cual se ubica a los 170 m de profundidad donde comenzó a disminuir durante los transectos posteriores. La TACW únicamente aparece en el transecto 5 con un máximo del 100% a los 310 m de profundidad.



b)



Figura 30. Ídem a la Figura 28 pero para a) transecto 5, b) transecto 6 y c) transecto 7.

A grandes rasgos, estos resultados mostraron que la formación de la GCW ocurre en gran medida entre los transectos 4 y 5, cuando el porcentaje de la GCW aumenta, mientras el porcentaje de la NASUW disminuye. Esto también se observó durante el análisis de los perfiles de salinidad y diagramas  $\theta$ -S, donde el máximo salino representativo de la NASUW se empieza a erosionar precisamente durante estos transectos.

Durante el transecto 4, el remolino "Poseidón" empezó a experimentar sucesivas deformaciones, lo que pudo causar la transformación entre la NASUW a la GCW. No siendo todavía clara, esta transformación de masas de agua se podría asociar con las deformaciones que tuvo el remolino durante esta fase debido principalmente a su interacción con otros remolinos. Sin embargo, queda en evidencia que posiblemente existan interacciones también en profundidad donde la erosión de la NASUW pueda estar contribuyendo de gran manera para la erosión del remolino.

Con la finalidad de evaluar con mayor certeza la causa por la cual se da la trasformación de las diferentes masas de agua y en lo particular de la NASUW a la GCW, se realizó el mismo análisis anterior pero enfocándose ahora en el centro y en las periferias ubicadas en dos flancos; 1) oeste, el cual se ubicó cerca de la plataforma continental y 2) este ubicado en aguas profundas (*i.e.* alejado de la plataforma continental). Con la finalidad de tener un panorama más concreto, se analizaron tres transecto en particular: i) Transecto 1 donde el "Poseidón" se caracterizó por ser un remolino joven con pocas deformaciones, ii) transecto 4 donde el remolino se ubicaba al oeste del GoM muy cerca de la plataforma y consecuentemente sufre fuertes deformaciones y iii) el transecto 7 donde el "Poseidón" experimenta su disipación.

En la Figura 31 se muestra el porcentaje resultante de la dispersión de los datos del diagrama  $\theta$ -S en función del núcleo de las diferentes masas de agua para los datos del centro del remolino "Poseidón" definiendo un rango de valores con los resultados que se obtuvieron de los tres métodos explicados en la sección 3.2; así como sus mapas de SLA para encuadrar los resultados.

Se pudo observar que durante los transectos 1, 4 y 7 (Figs. 31 a, b y c) la GCW aumentó su porcentaje del 40% al 95%, mientas que la NASUW delimitada entre los 150 m y 230 m de profundidad disminuyó 20%, lo que sugiere una erosión progresiva de la NASUW a esta profundidades de la columna de agua, la cual sería precursora dela GCW.

En los mapas de SLA se pudo observar que a lo largo del transecto 1 SLA (Fig. 31c), el remolino "Poseidón" se ubicó entre 89°W y 93°W (centrado en el GoM), cuando era un remolino joven e intenso con un contorno elíptico y deformaciones menores, ya que durante su desplazamiento al oeste del GoM no tuvo interacciones con remolinos vecinos ni con la topografía (Sosa-Gutiérrez *et al.*, 2020).

Durante el transecto 4 (Fig. 31d) el remolino sufrió un estiramiento generando una serie de deformación, causado por dos RCs adyacentes a él. En esta fase se observó un remolino maduro menos intenso, ubicado cerca de la plataforma oeste del GoM, lo que también sugeriría una estrecha interacción con la topografía.

Para el transecto 7 (Fig. 31f) se observó un remolino con un área más grande con respecto al transecto 4, sin embargo, se tuvo un contorno un poco más elíptico con ligeras deformaciones en sus extremos. En esta fase el remolino se disipó.



-350

400

37

-350

-400

0 20 40 60 -350

-400

0 20 40 60

80 100

웅

TACW

80 100

응

b)

c)

16

36

36.5

Salinidad



**Figura 31.** Método de cuantificación del porcentaje de las aguas típicas a los núcleos de masas de agua (CSWr, GCW, NASUW y TACW) de la superficie a 400 m de profundidad para los transectos a) 1, b) 4 y c)7. También se muestran los mapas de SLA para el día de la posición del glider en el centro de cada transecto (asterisco negro), el contorno del remolino (línea roja) y el centro del remolino (punto rojo) por transectos d) 1, e) 4 y f) 7.

Se muestra en la Figura 32 el caso del flanco oeste donde al igual que en el análisis relativos a los centros del remolino "Poseidón" se observó como la GCW comenzó a aumentar su porcentaje a partir del transecto 4 (Fig. 32b) alcanzando un máximo del 90% de presencia durante el transecto 7 (Fig. 32c).

El "Poseidón" se mostró intenso con un contorno elíptico y ligeramente deformado al sur de su centro, con pocos remolinos a su alrededor. En cambio, en la periferia inicial del transecto 4 (Fig. 32e), el "Poseidón" se observó rodeado de remolinos (dos RCs y un RAs). Sin embargo, se mantuvo con un contorno elíptico cercano a la costa, mientras que para el transecto 7 (Fig. 32f), el remolino se mostró débil, alargado en sus extremos, pero conservando una forma elíptica y alejado de la costa y sin remolinos alrededor.





c)



Figura 32. Ídem a la Figura 31 pero para el flanco oeste del remolino "Poseidón".

Para el caso del flanco este se observó que durante el transecto 1 se observó una compensación muy marcada entre la CSWr y GCW, el porcentaje máximo de la CSWr se cuantificó en superficie (a los 50 m), mientras que las aguas típicas al núcleo de la GCW comenzaron a ser más someras con un 90% de presencia

durante el transecto 1 y 7 (Figs. 33a y c), siendo el transecto 4 (Fig.33b) donde presente una mayor modificación, al igual que los análisis del centro y flanco oeste se observó como el porcentaje máximo cuantificado para la NASUW disminuyo del 60% a un 40% de presencia y la TACW no se hizo notar a lo largo de los tres transecto.

Los mapas de SLA (Figs. 33 d, e y f) presentan un remolino con un contorno casi circular sin deformaciones, ni interacciones a su alrededor a lo largo del transecto 1. Por otro lado, el remolino "Poseidón" presentó una reducción de su área, así como un evidente debilitamiento y un contorno más amorfo durante el transecto 4 y por último, el remolino durante el transecto 7 fue más débil con un contorno alargado con ligeras deformaciones en sus extremos y con un área mayor que la periferia final del transecto 4.







Figura 33. Ídem a la Figura 33 pero para el flaco este del "Poseidón".

3.4 Cuantificación del porcentaje de masas de agua en función con la densidad dentro del "Poseidón"
Con la finalidad de estudiar la posible mezcla que existe durante los transecto, se realizó la cuantificación de la dispersión de aguas con características similares a los núcleos de las masas de aguas estudiadas en función con la densidad. Con estos resultados se pretende encontrar que dicha transformación está asociada a los diferentes estados dinámicos que el remolino "Poseidón" presenta a lo largo de su vida.

Al igual que el análisis anterior se presentan tres transectos: i) transecto 3, ii) transecto 4 y iii) transecto 5 y se analizaron los datos para sus centros y ambos flancos. Se observó que durante el transecto 4 existe mayor mezcla diapicnal entre las aguas típicas del núcleo de la NASUW y de la GCW en el caso del análisis de los centros del remolino "Poseidón" (Fig. 34a) donde para el transecto 3 las aguas típicas al núcleo de la GCW se cuantifican con porcentajes menores a los 40% de presencia, mientras que para el transecto 5 aumentó un 40% de presencia y las aguas típicas al núcleo de la NASUW disminuyen un 20%.

En cuanto al mapa de SLA para el transecto 3 (Fig. 34b) donde se muestra un remolino elíptico si deformaciones ni interacciones, mientras el transecto 4 (Figs. 34f) mostró un remolino elíptico pero con mayor deformación causado por la interacción que el remolino "Poseidón "tuvo con la plataforma continental y remolinos alrededor mientras que para el transectos 5 (Fig. 34c) el remolino aumenta de área, mantiene su forma elíptica con ligeras deformaciones provocados por dos RCs cernos a él.





**Figura 34.** a) Método de cuantificación del porcentaje de aguas típicas relativas a los núcleos de las masas de agua (CSWr, GCW, NASUW y TACW) de la superficie a 400 m de profundidad del remolino "Poseidón" en función de la densidad. También se muestran los mapas de SLA para el día de la posición del glider en el centro de cada transecto (asterisco negro), el contorno del remolino (línea roja) y el centro del remolino (punto rojo) por transectos a) 3 y b) 5.

En cuanto al flanco oeste (Fig. 35 a) los transectos tuvieron un comportamiento muy similar, sin embargo, en el transecto 4 se cuantifico aguas más densas en comparación de los transectos 3 y 5, pero los porcentajes de masas típicas a los núcleos de las diferentes masas de agua mantuvieron un porcentaje similar entre los tres transectos, mientras que para el flanco este (Fig. 35b) presentó un comportamiento muy similar al de los centros, ya que se observó una disminución en el porcentaje de las agua típicas al núcleo de la NASUW a lo largo de los transecto 4 y 5 y un aumento de las aguas típicas al núcleo de la GCW, lo que nos indicaría que ambas masas de agua (NASUW y la GCW) se estrían transformando, esto durante el transecto 4.



**Figura 35.** Cuantificación de la dispersión de las aguas típicas al núcleo de diferentes masas de agua (de 0 a 400 m) para el centro del remolino "Poseidón" por transectos 3, 4 y 5 para a) flanco oeste y b) flanco este.

En la Figura 36 muestran los mapas de SLA correspondientes a cada transecto. En cuanto al flaco oeste (Fig. 36 a) el transecto 3, 5 muestran un remolino deformado causado probablemente por la interacción que tuvo con la plataforma continental y con otros remolinos cercano a él, al igual que en el transecto 4 (Fig. 32e) donde el remolino estuvo muy cerca de la plataforma continental e interactuó con remolino adyacentes a él. Para el flanco este el remolino fue más elíptico, presento una disminución en su área a partir del transecto 4 (Fig. 33e).



**Figura 36.** Mapas por transecto correspondientes a) flanco oeste y b) flanco este. Los mapas de colores corresponden a la SLA (cm), los vectores indican el campo de velocidad geostrófica superficial (ms<sup>-1</sup>), el día de la posición del glider (asterisco negro), el contorno del remolino "Poseidón" (línea roja) y el centroide del remolino (punto rojo).

En resumen con estos resultados se obtuvo que la masa de agua NASUW es precursora para la formación de la GCW, ya que al cuantificar la dispersión de aguas con características similares a los núcleos de estas masas de agua se observó que cuando la NASUW presentaba una disminución, la GCW aumentaba, sugiriendo la trasformación de estas masas de agua, ocurriendo durante el transecto 4 el cual fue realizado durante los meses de inviernos y donde el remolino "Poseidón" presento mayor interacciones con otros remolinos y la plataforma continental, lo que provocó que el remolino sufriera múltiples deformaciones.

Las observaciones de gliders junto con datos de altimetría satelital permitieron muestrear de manera exitosa al remolino "Poseidón" durante su vida. Utilizando el método de detección de Chaigneau *et al.* (2009), se detectó al remolino y se siguió durante su propagación hacia al oeste del GoM. Las periferias del remolino fueron delineadas diariamente y utilizadas para poder identificar las deformaciones que presentaba el remolino, mientras que el "Poseidón" se encontraba asociado aún a la CL, presentó pocas deformaciones. Al liberarse e inicio de su propagación hacia el oeste del GoM el remolino presentó poca interacción con otros remolinos cercanos y la topografía, lo que podría indicar que no sufriera intercambio de masa con las aguas circundantes y sus contornos fueran bastante circulares y con pocas deformaciones. Una vez, ubicado en el oeste del golfo, su forma presentó mayores deformaciones debido a las interacciones con la misma plataforma continental y con remolinos vecinos.

Con base en observaciones con glider se encontró que la erosión del núcleo máximo salino de 36.8 g kg<sup>-1</sup> entre las profundidades de 200 y 300 m (Sosa-Gutiérrez *et al.,* 2020) que caracteriza la presencia de la NASUW, la cual fue atrapada por este remolino durante su formación y se transporta al oeste del golfo modulando la distribución de masas de agua en el interior del golfo (Portela *et al.,* 2018), fue más evidente durante el transecto 4, donde el remolino "Poseidón" sufrió bruscas deformaciones, como se muestra en la Figura 37, en la cual presenta dos mapas de SLA: el primer mapa representa la periferia inicial y el segundo la prefiera final. Se observa como al inicio del transecto (Fig. 37a) el "Poseidón" se encuentra en el oeste del GoM, muy cerca de la plataforma continental, remolino intenso con un contorno elíptico a su alrededor se observan dos anomalías negativas asociadas a RCs (al norte y al sur de él) entre 94°W y 96°W y dos anomalías positivas (RAs) entre 91°W y 94°W. Un mes después (Fig. 37b), el remolino presentó un contorno con mayor deformación y reducción de su área, la elevación de su centro es menor, lo que indicaría un remolino débil y menos marcado, muy probablemente por la interacción que el "Poseidón" presentó con los remolinos adyacentes a él. Al ser un remolino más débil que los dos RCs cercanos, comienza a presentar mayor deformación y tiende a sufrir una redistribución del núcleo salino de la NASUW.

La interacción remolino- remolino provoca que el "Poseidón" se divida, estire y comprima, generando un proceso de intercambio de masas entre remolino y aguas circundantes (Lipphardt *et al.* 2008); y por consecuente que las masas de agua de su interior, en particular la NASUW que se encuentra en el núcleo del "Poseidón" se estén transformado y mezclando con las aguas circundantes.



a)

b)

**Figura 37.** a) Contorno correspondiente a la periferia inicial y b) contorno para la periferia final del remolino "Poseidón" durante el transecto 4. Los mapas de colores corresponden a la SLA (cm), los vectores indican el campo de velocidad geostrófica superficial (ms<sup>-1</sup>) y el punto negro representa la posición del glider para ese día.

La redistribución del núcleo salino de la NASUW que se mencionó con anterioridad se observó claramente en la sección vertical de salinidad (Fig. 38). A lo largo de cuatros días (del 4 al 8 de marzo del 2016) el núcleo ya no es claro, sugiriendo que el remolino redistribuyo el núcleo salino. Durante este periodo es donde se observó RCs que comprimen el remolino "Poseidón" provocando su estiramiento. Una vez que los RCs empiezan a debilitarse, el núcleo salino del "Poseidón" se vuelve a definir.



Figura 38. Sección vertical de salinidad para el transecto 4.

Al utilizar el método de detección para extraer el centro del remolino a lo largo del transecto 4, se encontró que fue durante el periodo donde el núcleo salino estaba indefinido por lo que se sugirió utilizar otro método, el cual pudiera identificar un centro mejor definido, entendiendo que en el centro debería predominar un núcleo subsuperficial de salinidad bien marcado. Utilizando datos de glider se calculó la profundidad máxima de la isoterma de 20°C. Ambos métodos detectaron de manera exitosa el centro del remolino "Poseidón" y estos resultados permitieron tener una comparación entre la detección con datos de altimetría y datos de glider.

En la Figura 39a se muestra el mapa de SLA para el 7 de marzo del 2017, mostrando el centro del remolino encontrado con el método de detección con datos de ADT, así como la posición del glider que estuvo más cerca del mismo. A pesar de tener al glider ubicado a 3 km de dicho centro no se tuvo registro del núcleo salino de la NASUW dentro del remolino "Poseidón" para esa fecha y en esa posición, lo que imposibilitó tener un núcleo bien definido (ver Fig. 38). Esto originó bastantes dudas sobre el método de detección y los datos de satélite asociados a efectos debido a las deformaciones provocadas por los dos RCs presente en la periferia del "Poseidón", mientras que el centro verdadero detectado con datos de glider se ubicó a 33 km del centro indicado por datos satelitales, centro definido por la máxima profundidad de la isoterma de 20°C a lo largo del transecto.



**Figura 39.** a) Método de detección con datos de altimetría satelital y b) Método de detección con datos de gliders. El contorno del centro del remolino "Poseidón" está señalado con el perímetro rojo al igual que su centro y el punto negro representa la posición del glider.

Al comparar ambos métodos se pudo concluir que en la mayoría de los transectos (1, 5 y 7), ambos métodos tenían una diferencia entre 1 a 3 días, a excepción del transecto 6 donde ambos métodos coincidieron, ya que detectaron el centro del "Poseidón" el mismo día, mientras que, en los transectos 2 y 3 se encontró que la máxima profundidad de la isoterma de 20°C se ubicó cerca de las periferias causado muy probablemente por la intrusión de agua más cálida, también es importante mencionar que durante estos transectos el remolino "Poseidón" se caracterizaron por tener algunas deformaciones a causa de la interacción con la plataforma continental y con remolinos adyacente al "Poseidón" para el caso del transecto 4. Lo que se sugiere que la causa más viable a que estos métodos fallaran entre sí pudiera

deberse a las interacciones que el remolino "Poseidón" tuvo a lo largo de su vida, que resulta en las deformaciones del mismo que no son bien capturadas por la resolución de los datos remotos.

Se sabe que existe una erosión del máximo salino causado por el esfuerzo de viento debido al paso de frentes fríos durante la época invernal del GoM (Sosa-Gutiérrez *et al.,* 2020). Además en este estudio se demostró que esta erosión sucedió a partir de que el remolino "Poseidón" sufriera sucesivas deformaciones a causa de la interacción que tuvo con remolinos vecinos, dando pauta a que la NASUW se diluya y sea precursora de la GCW. Portela *et al.* (2018) mencionan que la transformación completa al GCW ocurre al occidente del GoM principalmente en la mezcla de invierno, lo cual coincide, ya que el transecto 4 se realizó durante los meses de invierno, observando capas de mezcla más profundas y marcadas durante este transecto, la temperatura y salinidad disminuían a medida que el remolino maduraba y se erosionaba.

Al cuantificar el porcentaje de masas de agua dentro del "Poseidón" se pudo confirmar lo que con los perfiles verticales se mostraba, la deformación que tuvo el remolino durante el transecto 4 provocó que los porcentajes de la NASUW fueran casi nulos en los transectos posteriores, demostrando que la transformación de masas de agua para el caso del NASUW a GCW estuvo en parte causada por la erosión de su máximo salino provocado por la interacción que el remolino "Poseidón" tuvo con remolinos adyacentes a él.

Aun con las limitaciones que el método presenta y considerando los límites que Portela *et al.*, (2018) proponen, se pudo cuantificar de manera exitosa el porcentaje de masas de agua dentro del remolino "Poseidón" y las diferentes relaciones entre 3 masas de aguas a diferentes profundidades. También, con ayuda de los mapas de SLA se pudo determinar los estados dinámicos que el remolino presentó durante las diferentes etapas de su vida y así, poder asociar la trasformación de la NASUW a la GCW. Sin embargo, se detectaron ciertas incoherencias relativas a la detección del posible centro del remolino usando datos de ADT al ser comparados con perfiles de glider alrededor de la región central del remolino. Se ha mostrado claramente que el núcleo del remolino "Poseidón" no coincide con el máximo de ADT cuando este experimenta deformaciones provocadas por la interacción con la topografía o con otros remolinos.

En este estudio se ha analizado la transformación de masas de agua dentro del remolino "Poseidón" a partir de datos de glider, los cuales ayudaron a comprender el origen y los procesos de dicha transformación, mientras que los datos de altimetría satelital permitieron hacer una descripción de la evolución temporal del remolino y en conjunto proporcionaron una mejor comprensión de la estructura vertical del remolino "Poseidón" y los procesos que conducen a la transformación de masa dentro de su interior.

El método de detección que se utilizó para extraer los contornos del remolino "Poseidón" funcionó correctamente para casi todo los transectos estudiados, a excepción del transecto 4, por lo que se decidió implementar un método basado en ubicación de la profundidad máxima de la isoterma de 20°C, esto utilizando datos de glider. La comparación entre ambas metodologías muestran resultados muy afines en cuatro transectos (1, 5, 7 y 8) con una diferencia entre 1 y 3 días, para el transecto 6 ambos métodos coincidieron al encontrar el centro el mismo día, se caracterizó por tener un contorno muy similar a lo largo de su trayectoria. Sin embargo, los transectos 2, 3 y 4 se encontraron diferencias mayores a 10 días entre los centros detectados por los diferentes métodos. Esta diferencia es atribuida a las deformaciones bruscas que presentó el remolino durante los transectos a lo largo de su propagación hacia el oeste del GoM y las interacciones con la topografía y otros remolinos. Lo que sugiere que la diferencia de ambos métodos entre sí podría estar asociada tanto a la deformación del "Poseidón" como a su propagación al oeste del golfo.

Con base en datos obtenidos de cinco misiones de gliders, se pudo tener una descripción de la estructura vertical del remolino "Poseidón" a lo largo su vida (4 meses después de su desprendimiento), durante el análisis de los perfiles verticales de temperatura y salinidad. Se encontró que los perfiles correspondientes a la periferia inicial presentaban una gran variabilidad, esto durante los transectos 1, 3, 4 y 6, los cuales presentaron un tipo de muestreo de sur a norte o de suroeste a noreste, mientras que el resto de los transectos (2, 5, 7 y 8) presentaron perfiles más coherentes (menor variabilidad) y se caracterizaron por tener un muestreo de tipo norte sur o noreste a suroeste, es decir en regiones más lejanas a la costa (aguas profundas), por lo que es posible que esta variabilidad este causada por el tipo de masas de agua interactuando en la región.

Se observó un máximo salino característico de la NASUW que se erosiona con el paso del tiempo y debilitamiento del remolino, lo que indica la posible transformación de la NASUW en la GCW. La mayor erosión se produjo durante el transecto 4, realizado durante los meses de invierno con una capa de mezcla profunda, marcada y homogénea. También durante este transecto el "Poseidón" se caracterizó por tener una serie de deformaciones intensas. Así mismo, al utilizar el método de cuantificación de masas de agua se comprobó la presencia de las masas de agua obtenidas con el análisis cualitativo de los diagramas  $\theta$ -S y se pudo identificar la porción de las mismas en función de la profundidad.

A pesar de ser una primera aproximación, el método de cuantificación de la presencia de las diferentes masas de agua implementado en este estudio en conjunto con los mapas de SLA obtenidos por satélite, permitieron mostrar evidencias de que la deformación de esta estructura de mesoescala induce cambios drásticos en su estructura vertical, haciendo más eficiente la transformación entre la NASUW a la GCW dentro del "Poseidón". Dos de los principales mecanismos que parecen ser los responsables de la deformación que sufrió el remolino, son la interacción con la topografía y otras estructuras de mesoescala en la región al oestes del Golfo de México.

- Biggs, D. C. 1992. Nutrients, plankton, and productivity in a warm-core ring in the western Gulf of Mexico. Journal of Geophysical Research, 97: 2143–2154. doi.org/10.1029/90JC02020.
- Chaigneau, A., Eldin, G., y Dewitte, B. 2009. Mesoscale eddies off Perú in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns. Progress in Oceanography, 79: 106–119. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.013
- Cushman-Roisin, B., Tang, B., & Chassignet, E. P. 1990. Westward motion of mesoscale eddies. Journal of Physical Oceanography, 20, 758– 768. <u>https://doi.org/10.1175/1520-</u> 0485(1990)020<0758:WMOME>2.0.CO;2
- Domíngues, R., Goni, G., Bringas, F., Muhling, B., Lindo-Atichati, D., & Walter, J. 2016. Variability of preferred environmental conditions for Atlantic bluefin tuna (Thunnus thynnus) larvae in the Gulf of Mexico during 1993–2011. Fisheries Oceanography, 25(3), 320– 336. https://doi.org/10.1111/fog.12152
- Elliot, B. A. 1982. Anticyclonic rings in the Gulf of México. Journal Physical Oceanography, 12(11): 1292– 1309. <u>https://doi.org/10.1175/1520-0485(1982)012<1292:ARITGO>2.0.CO;2</u>
- Goni, G. J., Trinanes, J. A., MacFadyen, A., Streett, D., Olascoaga, M. J., Imhoff, M. L., et al. 2015. Variability of the Deepwater Horizon Surface Oil Spill Extent and Its Relationship to Varying Ocean Currents and Extreme Weather Conditions. Vol. 2, pp. 1– 22. Switzerland: Springer. Consultado el 20 de mayo del 2022, <u>https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-16459-5\_1</u>
- Groeskamp, S., Abernathey, R. P., y Klocker A. 2016. Water mass transformation by cabbeling and thermobaricity. Geophysical Research Letters, doi.org/10.1002/2016GL070860.
- Groeskam, S., Griffies, S.M., Ludicone, D., Marsh, R., Nurser, G., y Zika, J. 2019. The Water Mass Transformation Framework for Ocean Physics and Biogeochemistry. Annual Review of Marine Science. doi.org/10.1146/annurev-marine-010318-095421
- Koch, S., Barker, J., & Vermersch, J. 1991. The Gulf of Mexico Loop Current and deepwater drilling. Journal of Petroleum Technology, 43(09), 1–046. doi:10.2118/20434-PA.
- Leben, R. 2005. Altimeter-derived Loop Current metrics. Geophysical Monograph, 161: 181–201. https://doi.org/10.1029/161GM15
- Lipphardt, B. L., A., P., Kirwan, A., Kantha, L., y Zweng, M. 2008. Death of three Loop Current rings. J. Mar. Res., 66: 25–60. <u>https://doi.org/10.1357/002224008784815748</u>
- 1a obra: Meunier, T., Pallás, E., Tenreiro, M., Portela, E., Ochoa, J., Ruiz, A., y Cusí, S. 2018. The Vertical Structure of a Loop Current Eddy. Journal of Geophysical Research: Oceans. doi.10.1029/2018JC013801.
- 2a obra: Meunier, Tenreiro, M., T., Pallás, E., Ochoa, J., Ruiz, A., Portela, E., Cusí, S., Damien, P., y Carton X. (2018). Intrathermocline Eddies Embedded Within an Anticyclonic Vortex Ring. Geophysical Research Letters. <u>https://doi.org/10.1029/2018GL077527</u>

- Meunier, T., Sheinbaum, J., Pallás, E., Tenreiro, M., Ochoa, J., Ruiz, A., Carton, X., y Marez, C. 2020. Heat Content Anomaly and Decay of Warm-Core Rings: the Case of the Gulf of Mexico. Geophysical Research Letters. <u>https://doi.org/10.1029/2019GL085600</u>
- Molina, M., Timmer, R., & Allen, J. 2016. Importance of the Gulf of Mexico as a climate driver for US severe thunderstorm activity. Geophysical Research Letters, 43, 12,295– 12,304. https://doi.org/10.1002/2016GL071603
- Oey, L.-Y., Lee, H.-C., y Schmitz, W. 2005. Effects of winds and Caribbean eddies on the frequency of Loop Current eddy shedding: A numerical model study. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978– 2012), 108(10): 1–25. <u>https://doi.org/10.1029/2002JC001698</u>
- Pérez, P., Rossby, T., y Watts D. (2004). Transformation of the Warm Waters of the North Atlantic from a Geostrophic Streamfunction Perspective. Journal of Physical Oceanography. doi.org/10.1175/1520-0485.
- Portela, E., Tenreiro, M., Pallás, E., Meunier, T., Ruiz, A., Sosa, R. 2018. Hydrography of the Central and Western Gulf of México. Journal of Geophysical Research: Oceans. doi.10.1029/2018JC013813.
- Rudnick, D. L., Gopalakrishnan, G., & Cornuelle, B. D. 2015. Cyclonic eddies in the Gulf of Mexico: Observations by underwater gliders and simulations by numerical model. Journal of Physical Oceanography, 45, 313–326. doi.org/10.1175/JPO-D-14-0138.1
- Shay, L. K., Goni, G. J., & Black, P. G. 2000. Effects of a warm oceanic feature on Hurricane Opal. Monthly Weather Review, 128, 1366. <u>https://doi.org/10.1175/1520-</u> 0493(2000)128<1366:EOAWOF>2.0.CO;2
- Sosa Gutiérrez, E. R., Pallás Sanz, E., Jouanno, J., Chaigneau, A., Candela Pérez, J., & Costa de Almeida Tenreiro, M. J. (2020). Erosion of the Subsurface Salinity Maximum of the Loop Current Eddies from Glider Observations and a Numerical Model. Journal of Geophysical Research: Oceans, 125(7), 1-18. doi: 10.1029/2019JC015397
- Sturges, W., Lugo-Fernandez, A., y Shargel, M. 2005. Introduction to Circulation in the Gulf of México. American Geophysical Union, 161: 1–10. <u>https://doi.org/10.1029/161GM02</u>
- Tomczak, M., 1981. A multi-parameter extension of TS-diagram techniques for the analysis of nonisopycnal mixing.Progress In Oceanography, 10(3):147-171. DOI:10.1016/0079-6611(81)90010-0
- Vidal, V. M. V., V. F., y Pérez-Molero, J. M. 1992. Collision of a Loop Current anticyclonic ring against the continental-shelf slope of the western Gulf of Mexico. J. Geophysics. Res., 97: 2155–2172. <u>https://doi.org/10.1029/91JC00486</u>
- Vukovich, F. M. 2007. Climatology of Ocean Features in the Gulf of Mexico Using Satellite Remote Sensing Data. J. Phys. Oceanogr., 37: 689–707. <u>https://doi.org/10.1175/JPO2989.1</u>
- Yablonsky, R. M., & Ginis, I. 2013. Impact of a warm ocean eddy's circulation on hurricane-induced sea surface cooling with implications for hurricane intensity. Monthly Weather Review, 141, 997– 1021. doi.org/10.1175/MWR-D-12-00248.1