

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



**Maestría en Ciencias
en Oceanografía Física**

**Modulación de la distribución vertical de oxígeno disuelto por
remolinos de mesoescala en el Golfo de México**

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

Presenta:

Siria Raquel Muñoz Navarro

Ensenada, Baja California, México
2021

Tesis defendida por
Siria Raquel Muñoz Navarro

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Enric Pallàs Sanz
Director de tesis

Dr. Juan Carlos Herguera García

Dr. Julio Sheinbaum Pardo

Dr. Miguel José Costa de Almeida Tenreiro



Dr. José Gómez Valdés
Coordinador del Posgrado en Oceanografía Física

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta Siria Raquel Muñoz Navarro como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

Modulación de la distribución vertical de oxígeno disuelto por remolinos de mesoescala en el Golfo de México

Resumen aprobado por:

Dr. Enric Pallàs Sanz
Director de tesis

La variabilidad estacional y espacial de las concentraciones de oxígeno disuelto dentro de remolinos de mesoescala, desde la región central y oeste del Golfo de México fue estudiada a partir de datos obtenidos con gliders. La modificación de la Zona de Mínimo Oxígeno del remolino de la Corriente del Lazo Poseidón fue monitoreada por un año, desde el desprendimiento de la Corriente del Lazo hasta su disipación en el oeste del golfo. El hundimiento de aguas elevadas en oxígeno disuelto evita la formación de regiones con bajas concentraciones en presencia de remolinos de la Corriente del Lazo. Además de la evolución de esta característica, durante de su monitoreo se observó la formación de un máximo somero (sub-superficial) de oxígeno disuelto debajo de la capa de mezcla de verano, su desaparición debido a la mezcla profunda en la temporada de los vientos Nortes y su formación de nuevo durante primavera-verano. Este máximo somero se observa en regiones oligotróficas y en los remolinos de mesoescala puede ser formado por dos maneras, con procesos termodinámicos y por productividad biológica. Para determinar el proceso presente se correlacionaron los porcentajes de saturación de oxígeno disuelto para determinar el estado del agua, y además las concentraciones de clorofila. Los resultados indican que los remolinos ciclónicos son más productivos que los remolinos anticiclónicos debido a un mayor porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en la capa eufótica. En el Golfo de México, los procesos de layering, subducción y la presencia de los remolinos intratermoclinos de submesoescala pueden modificar un perfil típico de oxígeno disuelto dentro de remolinos anticiclónicos exportando aguas con concentraciones relativamente altas de oxígeno disuelto a profundidades de 100-400 m de profundidad. Estos procesos de variabilidad de pequeña escala son en gran medida desconocidos y estudios futuros tienen que orientarse en su caracterización espacial y temporal.

Palabras clave: Golfo de México, Corriente del Lazo, remolinos de mesoescala, Remolinos de la Corriente del Lazo, oxígeno disuelto, Zona de Mínimo Oxígeno, Giro de Campeche, máximo sub-superficial, gliders.

Abstract of the thesis presented by Siria Raquel Muñoz Navarro as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography.

Modulation of the vertical distribution of dissolved oxygen by mesoscale eddies in the Gulf of Mexico

Abstract approved by:

Dr. Enric Pallàs Sanz
Thesis Director

The seasonal and spatial variability of dissolved oxygen concentrations within mesoscale eddies from the central and western Gulf of Mexico was studied from glider data. The modification of the Oxygen Minimum Zone of the Poseidon Loop Current eddy was monitored for one year, from the detachment of the Loop Current to its dissipation in the western gulf. The sinking of high waters in dissolved oxygen prevents the formation of regions with low concentrations in the presence of eddies of the Loop Current. In addition to the evolution of this characteristic, during its monitoring, a shallow (sub-surface) maximum of dissolved oxygen was observed below the summer mixing layer, its disappearance due to deep mixing in the Northern winds season and its formation again during spring-summer. This shallow maximum is observed in oligotrophic regions and in mesoscale eddies can be formed in two ways, by thermodynamic processes and by biological productivity. To determine the present process, the dissolved oxygen saturation percentages were correlated to determine the state of the water, and also the chlorophyll concentrations. The results indicate that cyclonic eddies are more productive than anticyclonic eddies due to a higher percentage of dissolved oxygen saturation in the euphotic layer. In the Gulf of Mexico, the processes of layering, subduction, and the presence of submeso-scale intratermocline eddies can modify a typical dissolved oxygen profile within anticyclonic eddies by exporting waters with relatively high dissolved oxygen concentrations at depths of 100-400 m. These small-scale variability processes are largely unknown and future studies need to focus on their spatial and temporal characterization.

Keywords: Gulf of Mexico, Loop Current, mesoscale eddies, Loop Current Eddies, dissolved oxygen, Oxygen Minimum Zone, Campeche Gyre, sub-subsurface maximum, gliders.

Dedicatoria

**A mis padres: Belem e Ismael;
y a mis hermanos: Víctor, Luis e Ismael.**

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada por darme la oportunidad de estudiar una maestría en Oceanografía Física.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría. No. de becario: 898930.

A mi director de tesis, Enric. Por ser un excelente asesor, por su paciencia y atención al enfrentarme a temas desconocidos; y principalmente por despertar mi curiosidad por los remolinos.

A mis sinodales: Juan Carlos, Miguel y Julio. Por aceptar ser parte de esta travesía, especialmente gracias por su tiempo y valiosa aportación a mi trabajo de investigación.

Al Dr. Modesto Ortiz, por abrirme las puertas del Departamento de Oceanografía Física y despertar mi interés en realizar un posgrado. A Lupita y Angie por su apoyo y su disposición a todo momento. A mis profesores del posgrado, en especial al Dr. José Gómez Valdés por su apoyo durante esta etapa y por ayudarme a encontrar mis temas de interés en el curso de Lecturas y Conferencias.

A mi pequeña familia: mi mamá por ser mi mejor amiga, mi pilar y mi inspiración a ser mejor; a Ismael Alonso, Víctor Hissao, Luisito, Laila y Ramiro por ser parte de mi felicidad; a Ignacio Alcalá por su cariño, amistad y apoyo; a Raquel Vázquez por su amistad, consejos y por ser como una hermana mayor para mí; y a mi mejor amigo de toda la vida, Roberto Carlos Briceño.

A mis compañeros de generación y todos mis amigos que conocí durante esta aventura. En especial a mi mejor amigo Jesús Ocampo, por su apoyo dentro y fuera del aula de clases; y por hacer más agradable la convivencia en CICESE. A Gerardo Quintanilla, por ser un gran amigo y además por su valiosa aportación de conocimiento a mi trabajo de investigación.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	xi
Capítulo 1. Introducción	
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	5
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo general	6
1.3.2 Objetivos específico.....	6
Capítulo 2. Datos y métodos	
2.1 Datos.....	7
2.1.1 Seaglider.....	7
2.1.2 Base de datos hidrográfica histórica del GoM.....	7
2.1.3 Datos de altimetría.....	8
2.2 Metodología.....	10
2.2.1 Análisis y cálculo de variables.....	10
2.2.2 Detección de remolinos.....	12
Capítulo 3. Resultados	
3.1 Distribución vertical y espacial de la concentración promedio de oxígeno disuelto en el GoM.....	13
3.2 Estructura vertical del O ₂ disuelto en el interior de ciclones y anticiclones del Golfo de México.....	19
3.2.1 Caso de estudio: Estructura vertical de un ciclón y anticiclón típicos.....	22
3.3 Procesos de variabilidad del perfil típico (promedio) de oxígeno disuelto en anticiclones.....	25
3.3.1 Estacionalidad: modificación de la solubilidad por temperatura.....	26
3.3.2 Remolinos intratermoclinos: parches subsuperficiales ricos en oxígeno disuelto.	27
3.3.3 Filamentos ricos en oxígeno disuelto.....	28
3.4 Comparación de la estructura vertical del oxígeno disuelto entre un remolino ciclónico del oeste del GoM y el ciclón de la bahía de Campeche.....	29

Capítulo 4 . Discusión

4.1 Discusión.....	32
--------------------	----

Capítulo 5 . Conclusiones

5.1 Conclusiones finales.....	37
-------------------------------	----

Literatura citada.....	40
-------------------------------	-----------

Lista de figuras

Figura		Página
1	Área de estudio delimitada por la isóbata de 500m (contorno negro). La flota de gliders del Grupo de Monitoreo Oceanográfico con Gliders (GMOG) es operada en aguas profundas, generalmente, en columnas de agua de > 500 m de profundidad en el Golfo del Golfo de México (GoM). Las entradas y salidas del GoM son el Canal de Yucatán y el Estrecho de Florida, respectivamente. La barra de colores muestra la batimetría del GoM.	1
2	Extraída de Portela et al. (2018): a) Trayectoria de las seis primeras misiones de glider realizadas por el Grupo de Monitoreo Oceanográfico con Gliders (GMOG) en el Golfo de México (GoM). b) Diagrama Temperatura-Salinidad y oxígeno disuelto en barra de colores en base a las seis misiones de GMOG; los puntos grises indican la base de datos histórica de Portela et al. 2018.	3
3	Perfiles de % saturación de oxígeno disuelto (O_2) y de concentración de oxígeno disuelto ($[O_2]$) en el Océano Pacífico Norte en invierno (líneas continuas) y en verano (líneas discontinuas)	5
4	Mapa de Topografía Dinámica Absoluta (ADT, Absolute Dynamic Topography) junto a la trayectoria de las 18 misiones del GMOG en el Golfo de México desde mayo de 2016 hasta septiembre de 2019. La misión 0009 no será considerada en esta tesis debido a los datos erróneos por una mala calibración del sensor de oxígeno.	7
5	a) Mapa del GoM dividido en cuadrantes identificados con diferentes colores. b) Distribución vertical de la concentración de O_2 disuelto ($[O_2]$; $ml\ l^{-1}$) promediando los perfiles de los cuadrantes definidos en a). Los perfiles promedio han sido calculados a partir de la base de datos de Portela et al. (2018)	13
6	Perfiles promedio de concentración de oxígeno disuelto ($[O_2]$) dentro de un remolino anticiclónico de la CL joven (línea azul), maduro (línea naranja), y fuera de los remolinos (línea amarilla). Los perfiles promedios se han calculado a partir de datos de 17 misiones de GMOG.	15
7	Mapas de Topografía Dinámica Absoluta (ADT, Absolute Dynamic Topography) de los días a) 19 de septiembre, b) 9 de diciembre de 2016, c) 12 de febrero, y d) 14 de junio de 2017 junto las trayectorias de las misiones de glider (línea punteada negra). Se identifica la periferia del remolino anticiclónico Poseidón con el contorno punteado azul. Las líneas amarillas indican las secciones consideradas para el cálculo de los perfiles promedios mostrados en la figura 8. Nótese la propagación del Poseidón desde la zona central hasta la región oeste del golfo e interacción con la costa oeste.	15
8	Evolución del perfil promedio de concentración de oxígeno disuelto ($[O_2]$) dentro del remolino anticiclónico Poseidón para las misiones de glider del Grupo de Monitoreo Oceanográfico con Gliders (GMOG): 0003 (línea azul), 0004 (línea naranja), 0005 (línea amarilla), y 0006 (línea morada).	17

9	Evolución temporal del remolino Poseidón. De arriba a abajo: fila 1) O ₂ disuelto (ml l ⁻¹), fila 2) saturación de O ₂ (%), fila 3) temperatura (°C) en función de la profundidad, fila 4) temperatura del aire (°C) y fila 5) la magnitud de la velocidad del viento a 10m de la superficie del mar ($ U_{10} $; m s ⁻¹); los contornos negros representan anomalía de densidad potencial (kg m ⁻³).	18
10	Estructura vertical de anomalía de concentración de oxígeno disuelto ([O ₂] ['] ; ml l ⁻¹) durante las misiones de glider del Grupo de Monitoreo Oceanográfico con Gliders (GMOG): a) 0003, b) 0004, c) 0005, y d) 0006 dentro del remolino Poseidón. El perfil promedio utilizado para el cálculo de las anomalías ha sido obtenido a partir de la base de datos de Portela et al. (2018).	19
11	Perfiles promedio de concentración de oxígeno disuelto ([O ₂]) dentro de un remolino anticiclónico (línea roja) y un remolino ciclónico (línea azul). Se han utilizado 18 misiones de glider para la construcción de dichos perfiles promedios. Los sombreados rojo y azul indican la desviación estándar de las observaciones para remolinos anticiclónicos y ciclónicos, respectivamente.	20
12	Diagrama densidad (kg m ⁻³)-oxígeno (ml l ⁻¹) en un ciclón (perfil derecho) y anticiclón (perfil izquierdo) promedio muestreados obtenidos a partir de observaciones de 17 misiones de glider del GMOG.	21
13	Mapa de Topografía Dinámica Absoluta (ADT, Absolute Dynamic Topography) del día 9 de octubre de 2018 junto la trayectoria del glider (línea negra) durante la misión 0013 en la que se muestreó el remolino ciclónico de Campeche. Los puntos rojos indican la periferia del remolino y la línea amarilla la sección del ciclón considerada en las figuras 15a, c, y e.	23
14	Mapa de Topografía Dinámica Absoluta (ADT, Absolute Dynamic Topography) del día 25 de febrero de 2019 junto la trayectoria del glider (línea negra) durante la misión 0014 en la que se muestreó un remolino anticiclónico en el oeste del GoM. Los puntos azules indican la periferia del remolino y la línea amarilla la sección del anticiclónico considerada en las figuras 15b, d, y f.	23
15	Concentración de oxígeno disuelto ([O ₂]; ml l ⁻¹), saturación de oxígeno disuelto (SAT%; %) y temperatura (°C) dentro del remolino ciclónico de Campeche muestreado en la misión de glider 0013 (a, c, y e) y dentro de un remolino anticiclónico de la misión de glider 0014 (b, d, y f) localizado en el oeste del Golfo de México (ver figuras 13 y 14). Los contornos negros representan anomalía de densidad potencial (kg m ⁻³).	24
16	Distribución vertical de la anomalía de concentración de oxígeno disuelto ([O ₂] ['] ; ml l ⁻¹) de a) remolino ciclónico de Campeche en la misión 0013 y b) un remolino anticiclónico maduro muestreado en la misión 0014 localizado en el oeste del Golfo de México.	25
17	Evolución temporal de la temperatura (°C; línea azul) y solubilidad de oxígeno disuelto (ml l ⁻¹ ; línea naranja) promediadas en los primeros 50m de profundidad dentro del remolino Poseidón durante las misiones a) 0003, b) 0004, c) 0005, y d) 0006.	26

18	Mapa de Topografía Dinámica Absoluta (ADT, Absolute Dynamic Topography) del día 26 de junio de 2016 junto la trayectoria del glider (línea negra) durante la misión 0002 en la que se muestreó un remolino anticiclónico en el oeste del GoM. Los puntos azules indican la periferia del remolino y la línea verde la sección del anticiclónico considerada en la figura 20e y f.	27
19	Mapa de Topografía Dinámica Absoluta (ADT, Absolute Dynamic Topography) del día 6 de junio de 2019 junto la trayectoria del glider (línea negra) durante la misión 0018 en la que se muestreó un remolino anticiclónico en el oeste del GoM. Los puntos azules indican la periferia del remolino y la línea amarilla la sección del anticiclónico considerada en la figura 20a, b, c y d.	28
20	Distribución de la concentración de oxígeno disuelto ($[O_2]$; $ml\ l^{-1}$), en función de la profundidad (a, c, y e) y perfiles de $[O_2]$ promedios (b, d, y f) en el interior (línea naranja) y exterior (línea azul) de los remolinos intratermoclinos. Las misiones son indicadas en los títulos de las figuras.	29
21	Distribución vertical de concentración de oxígeno disuelto ($[O_2]$; $ml\ l^{-1}$), saturación de $[O_2]$ (SAT%; %) y concentración de clorofila-a ($\mu g\ l^{-1}$) dentro del ciclón de Campeche (a, c, y e) y dentro de un ciclón del oeste del GoM (b,d, y f); Los contornos negros representan anomalía de densidad potencial ($kg\ m^{-3}$).	31

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Misiones de glider GMOG junto con su ID, periodo de muestreo y número de remolinos detectados. El símbolo P indica las misiones que muestrearon el remolino Poseidón y el * las que muestrearon el ciclón de Campeche. Nótese que también se muestrearon ciclones fuera de la bahía de Campeche. † misión no considerada en la presente disertación debido a datos erróneos por mala calibración del sensor de oxígeno.....	9
2	Misiones de remolinos anticiclónicos y ciclónicos seleccionados para obtener el perfil promedio. La simbología C indica que es el remolino ciclónico semi permanente de Campeche. † misión no considerada en la presente disertación debido a datos erróneos por mala calibración del sensor de oxígeno.....	10
3	Valor de los coeficientes de solubilidad extraídos de Benson y Krause (1984).	11

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

El Golfo de México (GoM) es un mar marginal profundo (~3700 m) localizado entre 18° y 30° Norte, y 81° y 98° Oeste; está conectado con el Mar Caribe a través del Canal de Yucatán y con el Atlántico Norte a través del Estrecho de Florida (figura 1).

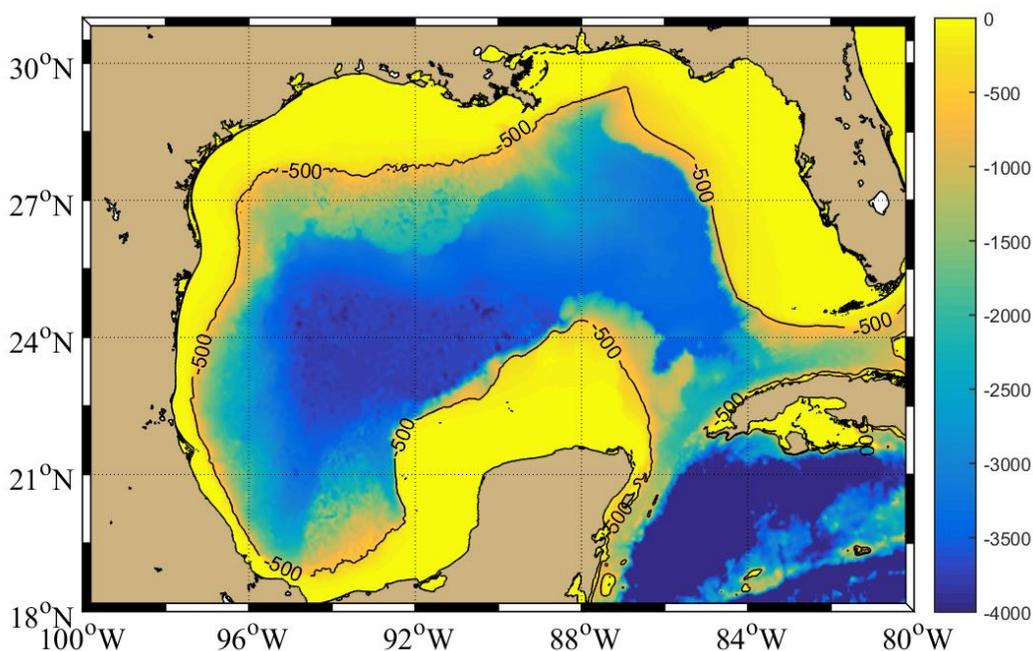


Figura 1.- Área de estudio delimitada por la isóbata de 500m (contorno negro). La flota de gliders del Grupo de Monitoreo Oceanográfico con Gliders (GMOG) es operada en aguas profundas, generalmente, en columnas de agua de > 500 m de profundidad en el Golfo del Golfo de México (GoM). Las entradas y salidas del GoM son el Canal de Yucatán y el Estrecho de Florida, respectivamente. La barra de colores muestra la batimetría del GoM.

La circulación regional en el GoM está dominada por la intensa Corriente del Lazo (CL) y remolinos de mesoescala. Esta corriente es una porción de la corriente de frontera oeste del Atlántico que entra al GoM a través del Canal de Yucatán, se extiende principalmente hacia el norte y sale a través del Estrecho de Florida (Vukovich et al., 1979) formando un meandro anticiclónico. Cuando la CL es estrangulada por remolinos ciclónicos frontales (Cochrane, 1972; Zavala-Hidalgo et al., 2003). Los procesos que generan estos remolinos frontales son variados y su importancia relativa se sigue investigando. Por ejemplo,

Candela et al., (2002), Athie et. al (2015), y Sheinbaum et al. (2016) sugieren que cambios en el flujo de vorticidad en el canal de Yucatán provocados por perturbaciones provenientes del Caribe anteceden el estrangulamiento y liberación del remolino de la CL (RCL). Sin embargo, hay incluso un debate sobre el signo de las perturbaciones provenientes del Caribe que pueden provocar la liberación del RCL (Oey et al., 2003).

Otros trabajos (Le Henaf et al., 2012; Donohue et al., 2016) sugieren que el proceso de separación se debe a inestabilidad local de la CL influenciada por su interacción con la topografía al extenderse hacia el interior del Golfo. La separación de un RCL es un proceso muy variable y generalmente no es un evento rápido y simple, sino largo y prolongado que puede tomar varios meses (Sturges & Leben, 2000). La mayoría de los remolinos anticiclónicos en la cuenca profunda del GoM proceden de la región de la CL y se propagan hacia el oeste a medida que su contenido de sal (Sosa-Gutiérrez et al. 2020) y calor (Meunier et al. 2020) es difundido a las aguas colindantes a lo largo de su trayectoria. La estructura de velocidad del remolino se modifica paulatinamente durante su propagación hacia el Oeste, conforme disminuye su vorticidad total (Hamilton, 1992). Comparando los remolinos del GoM de forma regional, en el este del golfo se presentan las máximas velocidades en un remolino anticiclónico. Brokaw et al. (2020) en base a simulaciones numéricas (validadas con derivadores ARGOS) encontraron velocidades promedio, en la periferia de compuestos de remolinos anticiclónicos, de 0.34 m s^{-1} en el este del GoM y 0.26 m s^{-1} en el oeste del mismo. Sin embargo, vale la pena mencionar que la forma adecuada de estimar el nacimiento y tiempo de vida de estos anticiclones se sigue debatiendo (Andrade et al. 2020).

Los RCL también tienen un efecto importante en la hidrografía del GoM. Esto se debe a que los RCL y otros remolinos de menor tamaño representan un mecanismo de atrapamiento y transporte de cuerpos de agua desde el sistema de la CL hasta el oeste del GoM (Jochens et al., 2005). Estos son formados por masas de agua de tipo caribeño que están contenidas en la mayoría de las aguas del sistema de la CL. Es por ello, que dichos RCL poseen masas de agua tienen características diferentes típicas del GoM, especialmente los primeros 100-200m. Entre las masas de agua atrapadas por los RCL están el Agua Superficial del Caribe (CSW, Caribbean Surface Water), el Agua Subtropical Subsuperficial (SUW, Subtropical UnderWater), Agua Central del Atlántico Tropical (TACW, Tropical Atlantic Central Water), y el Agua Intermedia Antártica (AAIW, Atlantic Intermediate Water) (Elliot, 1982; Vidal et al. 1994; Portela et al. 2018). Sheinbaum et al. (2002) reportan que se ha observado rastros del Agua modal o de 18°C (18SSW, 18°C Sargasso Sea Water) a través del Canal de Yucatán y en el oeste del GoM y es transportada por RCL's a su entrada en el golfo; Portela et al. (2018) la encuentran en el interior de los RCL (figura 2).

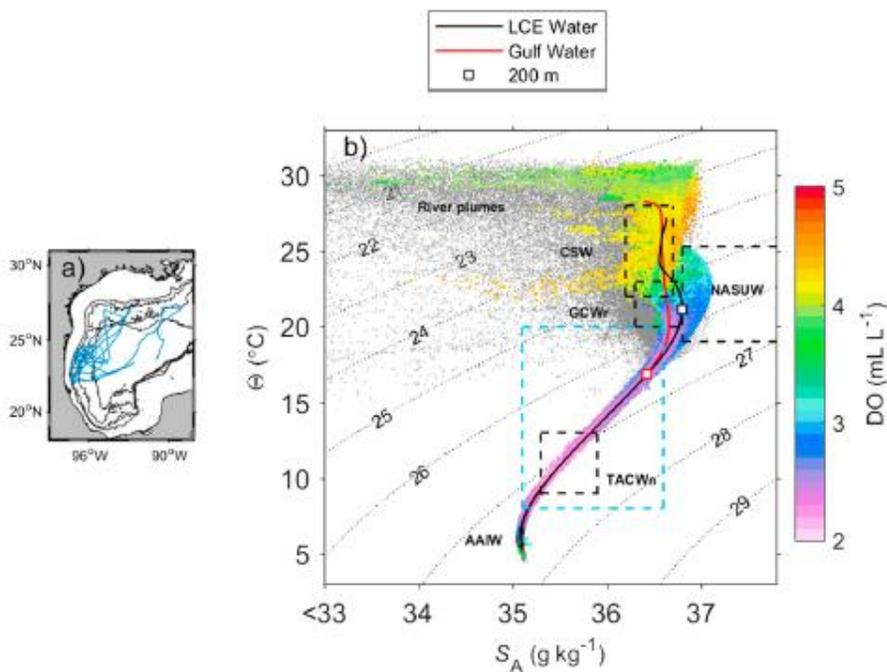


Figura 2.- Extraída de Portela et al. (2018): a) Trayectoria de las seis primeras misiones de glider realizadas por el Grupo de Monitoreo Oceanográfico con Gliders (GMOG) en el Golfo de México (GoM). b) Diagrama Temperatura-Salinidad y oxígeno disuelto en barra de colores en base a las seis misiones de GMOG; los puntos grises indican la base de datos histórica de Portela et al. 2018.

Diferentes tipos de remolinos ciclónicos del GoM se han observado en el sistema de la CL denominados genéricamente como LCFEs (Vukovich y Maul, 1985) pero sus tamaños y origen pueden ser diferentes (Sheinbaum et al., 2016; Jouanno et al., 2018). Entre ellos se ha identificado a los de la isla Tortugas denominados remolinos Tortugas (Fratantoni et al., 1998) aunque se debate su origen (Le Henaff et al., 2012). Están los LCFEs “clásicos” que intervienen en el estrangulamiento de la CL generados por diferentes mecanismos (Hamilton, 2007; Le Henaff et al., 2012; Rudnick et al., 2015; Donohue et al., 2016; Sheinbaum et al., 2016) y otros más pequeños (Sheinbaum et al., 2016; Jouanno et al., 2018).

En el interior del Golfo hay remolinos ciclónicos que se forman o asocian con la propagación de los RCLs y otros procesos (Hyun y Hogan, 2008) y el de la bahía de Campeche (BC) formando el denominado remolino ciclónico semipermanente de la BC.

El GoM profundo es altamente oligotrófico y, en promedio, solamente en las regiones costeras se registran valores de concentración de fitoplancton relativamente más elevados. Los núcleos de los RCL son

considerados desiertos biológicos en el sentido que contienen bajas concentraciones de clorofila superficial inferida desde el satélite (Muller-Karger et al., 2015; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009). Sin embargo, durante el invierno, las concentraciones de clorofila-a superficial se elevan considerablemente en algunas regiones (Damien et al., 2018; Pasqueron de Fommervault et al., 2017). Estos autores señalan que es importante tener en cuenta que la abundancia de clorofila en superficie no necesariamente indica lo que ocurre en la columna de agua y además que procesos de fotoaclimatación pueden ser importantes, por lo que debe tenerse cuidado en equiparar clorofila con biomasa. Sugieren, además, que debe estudiarse con mayor detalle cuándo y dónde los incrementos invernales en clorofila se deben a un aumento en la productividad debido a la inyección de nutrientes a la zona fótica, ya que la mezcla debida a procesos convectivos ocasionados por el paso de frentes fríos o Nortes puede no alcanzar la nutriclina y solo redistribuir la clorofila en la capa de mezcla sin que exista nueva producción.

Las principales fuentes de oxígeno disuelto en aguas del océano superior (0-200 m) en el GoM son la atmósfera y la fotosíntesis. Por debajo de la zona eufótica, en las aguas sub-superficiales hasta las profundas, los procesos de mezcla y la oxidación de la materia orgánica procedente de la superficie (ie., "marine snow"), y en casos excepcionales de fugas naturales de reservorios de hidrocarburos y gases, son los principales mecanismos de control de sus concentraciones (Herzka et al., 2014). La fuente de oxígeno disuelto en las aguas abisales es el transporte y la mezcla de masas de agua ricas en oxígeno procedentes del Mar Caribe que entran al GoM a través del Canal de Yucatán (Jochens et al., 2005; Rivas et al., 2005). La Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) son las profundidades en las que se observan menores concentraciones de oxígeno disuelto ($[O_2]$) que en el GoM está definida por el límite de $[O_2]$ de 3 ml l^{-1} (Morrison & Nowlin, 1977).

Una característica particular de la distribución vertical de oxígeno disuelto en el océano es la presencia de un máximo subsuperficial de oxígeno disuelto observado en un perfil típico entre los 40-60m de profundidad. Varios autores han estudiado la estacionalidad y las causas de la formación de este máximo subsuperficial de oxígeno disuelto. Por ejemplo, Reid & Shulenberger (1981), en el Océano Pacífico, propusieron que el máximo subsuperficial de oxígeno disuelto en presencia de aguas supersaturadas de oxígeno disuelto (% saturación $O_2 > 100\%$) es resultado de la producción fotosintética (subsuperficial) de oxígeno disuelto por fitoplancton. Este máximo puede persistir por varias semanas hasta meses debido a un intenso gradiente vertical de densidad (termoclina estacional) originado por el calentamiento en verano, que también denominamos estratificación (ver figura 3).

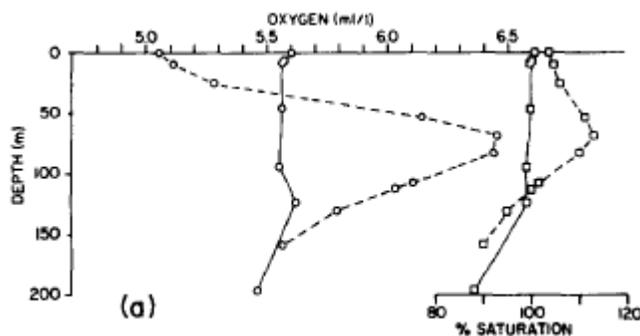


Figura 3.- Perfiles de % saturación de oxígeno disuelto (O_2) y de concentración de oxígeno disuelto ($[O_2]$) en el Océano Pacífico Norte en invierno (líneas continuas) y en verano (líneas discontinuas).

Por otro lado, este proceso también fue encontrado en el Océano Atlántico. Recientemente, Cervantes-Díaz et al. (2019) observan un máximo subsuperficial de oxígeno disuelto en el GoM, el cual lo han asociado al calentamiento de verano y a la presencia de la CSW. La CSW se encuentra desde superficie hasta los 90 m de profundidad, y se caracteriza por ser agua cálida ($27-32^\circ\text{C}$) y con alta salinidad (~ 36.8 psu). El máximo subsuperficial fue encontrado entre los límites de las masas de agua CSW y GCW.

Los mecanismos que generan este máximo de oxígeno en aguas oligotróficas siguen siendo un tema de debate que involucra procesos físicos y biológicos (Richardson y Bendtsen, 2017).

1.2 Justificación

Los remolinos de mesoescala además de transportar masas de agua con diversas propiedades termohalinas y contenido de O_2 , también pueden modificar la estructura vertical de $[O_2]$ de la columna de agua. Los RCL y remolinos ciclónicos representan fuentes de variabilidad de oxígeno disuelto en el Oeste del GoM y pueden crear regiones locales con elevada $[O_2]$ en la sub-superficie, así como delimitar regiones de mayor productividad biológica con gran potencial pesquero. Debido a la escasez de información y de datos de oxígeno disuelto obtenidos durante periodos largos (series temporales largas), no se tiene información suficiente para caracterizar el ciclo estacional de O_2 , y solo se tienen hipótesis de los posibles mecanismos involucrados en la variabilidad regional de oxígeno disuelto inducida por remolinos de mesoescala.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Describir la variabilidad espacial y temporal del oxígeno disuelto en el oeste del Golfo de México asociada a los remolinos de mesoescala.

1.3.2. Objetivos específicos

- Describir los procesos de transformación del oxígeno disuelto en el interior de los remolinos anticiclónicos de la CL.
- Contrastar la estructura vertical del oxígeno disuelto en el interior de ciclones y anticiclones del GoM.
- Describir los procesos de variabilidad del perfil típico de oxígeno disuelto en los RCL.
- Contrastar la estructura vertical del oxígeno disuelto en el oeste del GoM y la BC.

Capítulo 2. Datos y métodos

2.1 Datos

A continuación, se describen las fuentes de datos utilizadas en este trabajo.

2.1.1 Seaglider

Los gliders son una gama de vehículos submarinos autónomos desarrollados para la medición de variables oceanográficas a lo largo de trayectorias tipo "diente de sierra". Todos los gliders de la flota del Grupo de Monitoreo Oceanográfico con Gliders (GMOG) son de la marca Seaglider, pueden descender hasta 1000 m de profundidad, y cada uno de ellos tiene la capacidad de hacer cientos de perfiles verticales durante un periodo de 1 a 4 meses. Estos vehículos autónomos se tripulan en aguas profundas ≥ 500 m de profundidad. Utilizan sus alas y cambios de flotabilidad para desplazarse en la columna agua.

Actualmente GMOG tiene una base de datos de más de 9000 perfiles verticales de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, clorofila-a, backscatter, y materia orgánica disuelta coloreada. Los datos pueden ser visualizados en la página oficial de GMOG (<https://gliders.cicese.mx/>). Para el desarrollo de esta tesis se utilizaron 18 misiones de gliders realizadas desde mayo del 2016 hasta septiembre del 2019 (Tabla I, figura 4).

2.1.2 Base de datos hidrográfica histórica del GoM

La base de datos de Portela et al. (2018) consiste en perfiles verticales de temperatura conservativa, salinidad absoluta y oxígeno disuelto desde la superficie y hasta profundidades máximas entre los 1500 hasta los 3000 m. La base de datos está compuesta por 14 cruceros oceanográficos, las seis primeras misiones del GMOG, 17695 perfiles obtenidos de boyas ARGOS, y 15854 perfiles de la base de datos del World Ocean Database 2013 (WOD13).

En la base de datos hay perfiles con datos desde el año 1930 hasta el 2017, mostrando mayor densidad de datos a partir del 1990 y en la plataforma y talud continental del norte del GoM. Debido a que las condiciones climáticas favorables para muestrear el GoM son en verano, el mayor número de datos se centra entre los meses de junio, julio y agosto. Esta base de datos fue utilizada para obtener un perfil vertical promedio de oxígeno disuelto para el GoM, en regiones donde no hubo influencia de los remolinos de mesoescala de la región y poder calcular las anomalías de oxígeno disuelto en el interior de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos.

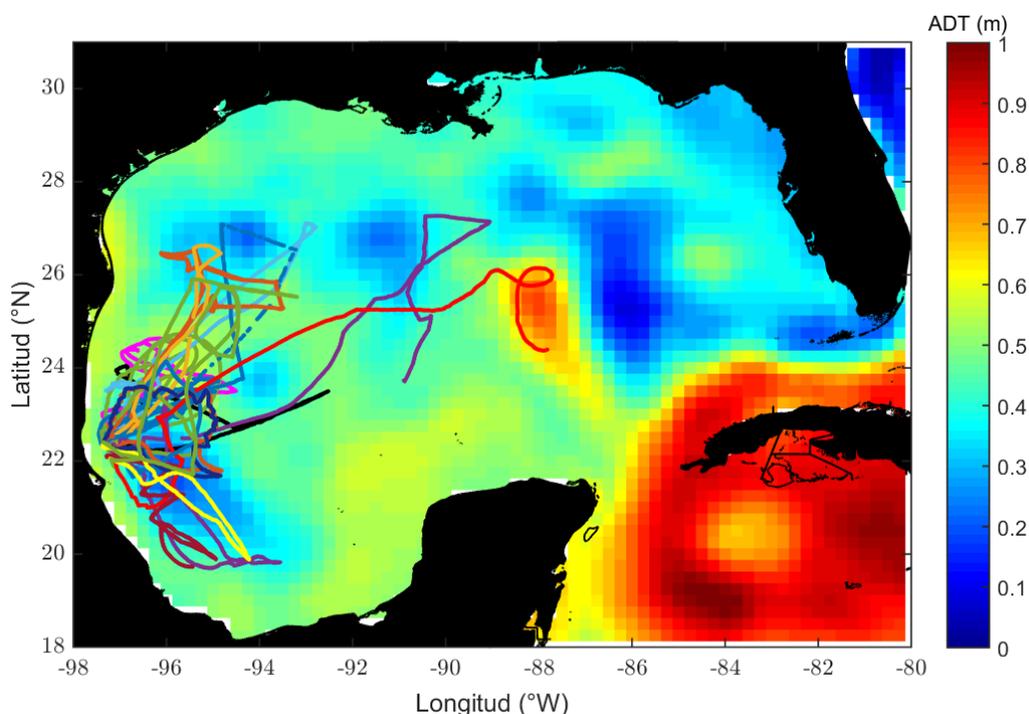


Figura 4.- Mapa de Topografía Dinámica Absoluta (ADT, Absolute Dynamic Topography) junto a la trayectoria de las 18 misiones del GMOG en el Golfo de México desde mayo de 2016 hasta septiembre de 2019. La misión 0009 no será considerada en esta tesis debido a los datos erróneos por una mala calibración del sensor de oxígeno.

2.1.3 Datos de altimetría

Datos de topografía dinámica absoluta (ADT, Absolute Dynamic Topography) y velocidad geostrofica superficial descargados de la plataforma Copernicus – Marine and Environment Monitoring Service (CMEMS) construidos a partir de un reanálisis de observaciones de diferentes satélites, datos, y modelos (<https://www.copernicus.eu/en>). Tienen una resolución temporal de un día y son objetivamente interpolados sobre una malla regular de $1/4^{\circ} \times 1/4^{\circ}$.

Tabla 1. Misiones de glider GMOG junto con su ID, periodo de muestreo y número de remolinos detectados. El símbolo P indica las misiones que muestrearon el remolino Poseidón y el * las que muestrearon el ciclón de Campeche. Nótese que también se muestrearon ciclones fuera de la bahía de Campeche. † misión no considerada en la presente disertación debido a datos erróneos por mala calibración del sensor de oxígeno.

Misión	ID Glider	Periodo	Remolinos muestreados	
			Ant	Cic
0001	SG-624	20/May/16 – 28/Jun/16	2	
0002	SG-622	26/Jun/16 – 11/Jul/16	1	
0003 - P	SG-623	19/Sep/16 – 15/Nov/16	1	1
0004 - P	SG-623	09/Dic/16 – 24/Ene/17	1	
0005 - P	SG-624	14/Feb/17 – 20/Mar/17	1	
0006 - P	SG-625	14/Jun/17 – 08/Jul/17	1	
0007	SG-624	29/Ago/17 – 22/Sep/17	1	
0008	SG-623	09/Dic/17 – 14/Ene/18		1
0009†	SG-622	23/Nov/17 – 13/Ene/18	1	2
0010 *	SG-652	23/Mar/18 – 10/Abr/18		1
0011	SG-623	26/Mar/18 – 10/abr/18	1	
0012	SG-625	15/Jul/18 – 30/Jul/18	1	1
0013 *	SG-624	09/Oct/18 – 16/Nov/18		1
0014	SG-624	11/Feb/19 – 16/Mar/19	1	1
0017 *	SG-652	18/Apr/19 – 01/May/19		1
0018	SG-625	06/Jun/19- 04/Ago/19	2	1

2.2 Metodología

2.2.1 Análisis y cálculo de variables

Los datos medidos con los gliders a lo largo de la trayectoria en diente de sierra son interpolados utilizando el método de análisis objetivo de Barnes (1994) sobre una malla regular de 2 km (horizontal) x 2 m (vertical); con escalas de decorrelación de 30km (horizontal) y 20 m (vertical).

Para el promedio de un perfil típico de un remolino anticiclónico (remolinos de la Corriente del Lazo) y ciclónico del GoM se seleccionaron 13 remolinos anticiclónicos y 6 ciclónicos (Tabla 2).

Tabla 2. Misiones de remolinos anticiclónicos y ciclónicos seleccionados para obtener el perfil promedio. La simbología C indica que es el remolino ciclónico semi permanente de Campeche. † misión no considerada en la presente disertación debido a datos erróneos por mala calibración del sensor de oxígeno.

Anticiclones	Ciclones
M0001 (2)	M0008
M0002	M0014
M0003	M0018
M0004	M0010 - C
M0005	M0013 - C
M0006	M0017 - C
M0007	
M0009†	
M0012	
M0014	
M0018(2)	

La solubilidad del oxígeno disuelto en el agua de mar ($[O_2^*]$, (1)) se calcula utilizando la librería de funciones Matlab de TEOS-10 (<http://www.teos-10.org>) y se define como la concentración de oxígeno disuelto, en un agua de mar con temperatura T y salinidad S, en equilibrio con la atmósfera (McDougall y Barker, 2011). Utiliza los coeficientes de solubilidad derivados de Benson y Krause (1984), ajustados por Garcia & Gordon (1992; 1993).

$$\ln[O_2^*] = A_0 + A_1T_S + A_2T_S^2 + A_3T_S^2 + A_3T_S^3 + A_4T_S^4 + A_5T_S^5 + S (B_0 + B_1T_S + B_2T_S^2 + B_3T_S^3) + C_0S^2 \quad (1)$$

Donde:

T_s (2) es una temperatura escalada en grados centígrados (°C).

$$T_s = \ln [(298.15-T)(273.15+T)^{-1}] \quad (2)$$

, T y S son la temperatura y salinidad, respectivamente; los coeficientes A_i ($i=0,1,\dots,5$) y B_i ($i=0,1,\dots,3$) y C_0 son mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Valor de los de solubilidad extraídos de Benson y Krause (1984).

Coeficiente	Valor
A_0	5.80871
A_1	3.20291
A_2	4.17887
A_3	5.10006
A_4	-9.86643×10^{-2}
A_5	3.80369
B_0	-7.01577×10^{-3}
B_1	-7.70028×10^{-3}
B_2	-1.13864×10^{-2}
B_3	-9.51519×10^{-3}
C_0	-2.75915×10^{-7}

Para obtener el porcentaje de saturación del oxígeno disuelto (SAT%, (4)) dentro de los remolinos, se dividió la concentración de oxígeno disuelto medido entre la solubilidad del oxígeno disuelto y después se multiplicó por 100.

$$SAT\% = \left(\frac{[O_2]}{[O_2^*]} \right) \times 100 \quad (3)$$

2.2.2 Detección de remolinos

Se utilizaron datos de altimetría desde el año 2016 hasta 2019 obtenidos de CMEMS para poder identificar los remolinos, ciclónicos y anticiclónicos, del GoM. El método utilizado en esta disertación detecta el centro y la periferia del remolino definidos como un máximo/mínimo local de ADT y el contorno de ADT cerrado más externo alrededor del centro se consideró como la periferia del remolino, respectivamente (Chaigneau et al. 2009). El método de detección es ligeramente modificado por Sosa-Gutiérrez et al. (2020) para restringir la búsqueda del contorno al que posea la máxima velocidad azimutal. Esto permitió identificar qué perfiles medidos por los gliders estaban dentro de los remolinos, ciclónicos y anticiclónicos, y cuales estaban fuera.

Capítulo 3. Resultados

Con la base de datos de Portela et al. (2018) se describe un primer análisis de cajas de la distribución vertical y espacial de la concentración promedio de oxígeno disuelto en el GoM, desde 88°W hacia el oeste (Figura 5a). Independientemente de la región del oeste del GoM, el perfil vertical de $[O_2]$ promedio en cada una de las regiones muestra valores elevados en superficie y en los 40-50m se observa un máximo sub-superficial de $[O_2]$, después disminuyen con el aumento de la profundidad alcanzando un mínimo de $[O_2]$ en la ZMO y finalmente vuelven a incrementar en profundidad. Los perfiles verticales de $[O_2]$ de cada región (caja) de la figura 4a son mostrados en la figura 4b y tabulados por colores. Las concentraciones más altas en superficie ($> 4 \text{ ml l}^{-1}$) se encuentran en la BC (cuadrante verde y rosa) y al norte del GoM (cuadrante rojo y morado), relacionado con la aportación de las descargas del Río Mississippi (Louisiana) y Grijalva/Usumacinta (Campeche). El mínimo de $[O_2]$ de $< 2.6 \text{ ml l}^{-1}$ se localiza por alrededor de los 400 m de profundidad en los cuadrantes del oeste (naranja, amarillo, azul celeste, y azul) y en mayores profundidades de 400m en los cuadrantes del este-noreste (rojo y azul oscuro). Las $[O_2]$ en aguas superficiales y profundas disminuyen conforme nos acercamos al oeste del golfo, alcanzando concentraciones mínimas alrededor de $\sim 4 \text{ ml l}^{-1}$ en superficie y un mínimo de 2.2 ml l^{-1} a los 400 m en el cuadrante más occidental (azul celeste) y en plataforma de Yucatán (color granada).

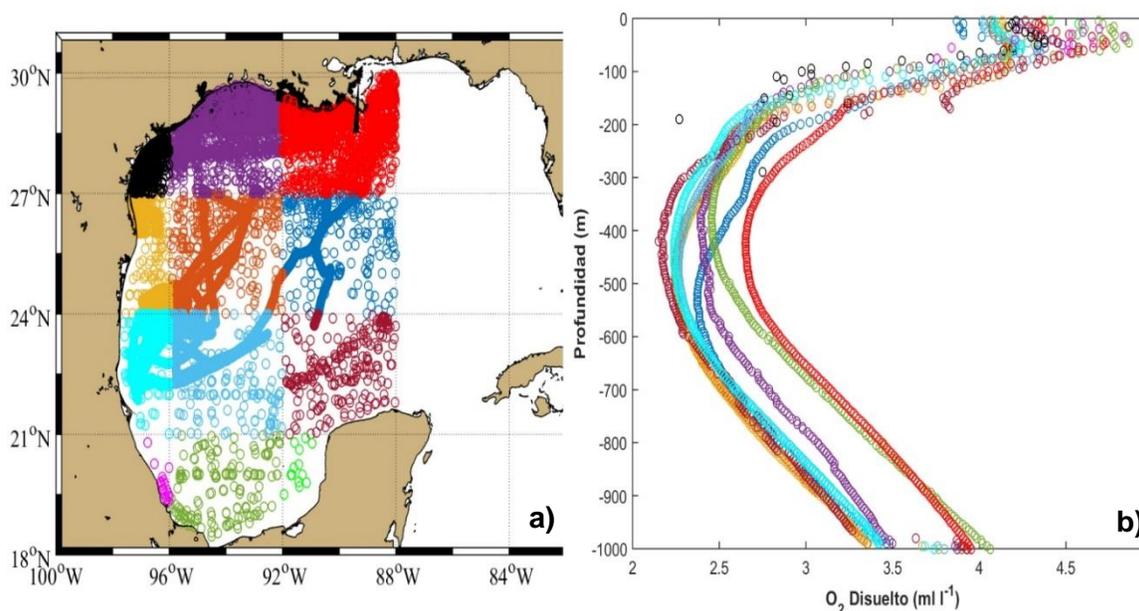


Figura 5.- a) Mapa del GoM dividido en cuadrantes identificados con diferentes colores. b) Distribución vertical de la concentración de O_2 disuelto ($[O_2]$; ml l^{-1}) promediando los perfiles de los cuadrantes definidos en a). Los perfiles promedio han sido calculados a partir de la base de datos de Portela et al. (2018).

Con el fin de mostrar las diferencias en la distribución vertical de $[O_2]$ entre un remolino anticiclónico joven de la CL (i.e., recién liberado de la CL) y uno maduro (i.e., que lleva meses propagándose en el GoM), se dividió el área de estudio en dos partes: se consideraron remolinos jóvenes (maduros) todos los muestreados al este (oeste) de $92^\circ W$ durante las 17 misiones de gliders del GMOG. Una vez identificados los RCL de cada región, se localizaron los perfiles verticales de $[O_2]$ en su interior y se promediaron (figura 6). A modo de referencia en la figura 6 se incluye el perfil vertical promedio de todos los perfiles fuera de los remolinos. Los RCL jóvenes que se encontraron están caracterizados por mostrar $[O_2]$ relativamente más altas en comparación con los RCL maduros.

Los remolinos recién liberados de la CL, son muy coherentes y probablemente aún no se han mezclado con las aguas del interior del golfo. Contrariamente, los remolinos maduros, al trasladarse hacia el oeste, experimentan intercambios con el exterior por procesos físicos, como difusión lateral o vertical, así como consumo de oxígeno disuelto en el interior del remolino por procesos biogeoquímicos tales como respiración y/o degradación de materia orgánica. El decaimiento de los RCL en el oeste del GoM modifica las isopícnas y las $[O_2]$ dentro del remolino, y se observa una somerización de la zona de mínimo oxígeno, entre 400 y 500 m (respecto a 500-600m característicos de los RCL jóvenes del este). Además de comparar las diferencias de la evolución de un RCL, se muestra un perfil promedio (línea amarilla) de $[O_2]$ fuera de los RCL, el cual se obtuvo de las mediciones de los gliders cuando no muestreaban dentro de los remolinos. Su ZMO es más somera que un remolino maduro, sin embargo, su mínimo de $[O_2]$ es igual a este remolino. En promedio, fuera de los RCL se observan concentraciones relativamente mayores en aguas profundas.

La reducción promedio de la $[O_2]$ en remolinos maduros es apreciable en toda la columna de agua, desde la superficie hasta los 1000m de profundidad. Una característica común de ambos perfiles promedio es la presencia del máximo subsuperficial de $[O_2]$ centrado aproximadamente a los 50m de profundidad en todo el GoM; indicando que el mecanismo que lo genera no depende de la dinámica del remolino (cyclónica vs anticiclónica) sino de la estación del año.

Para estudiar en más detalle la transformación de la distribución vertical de oxígeno en los RCL durante su propagación hacia el oeste e interacción con la plataforma oeste del GoM, se utilizaron datos de las misiones de glider 0003 a la 0006 que corresponden a 1 año de monitoreo del remolino Poseidón, el cual fue desprendido de la CL a principios del mes de abril del 2016 (figura 7).

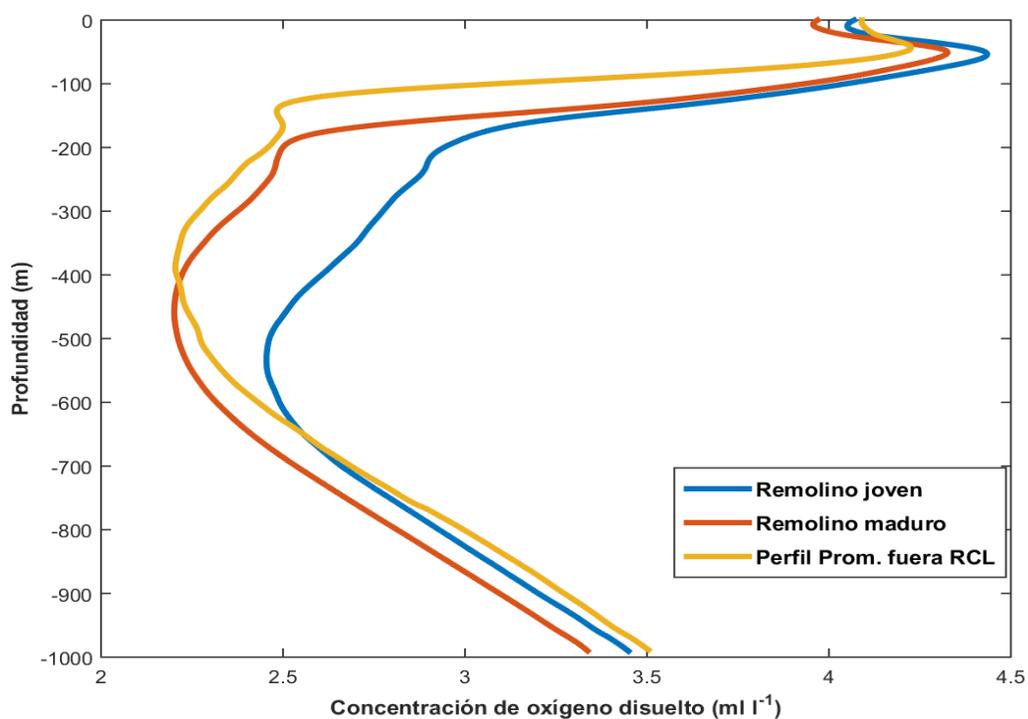


Figura 6.- Perfiles promedio de concentración de oxígeno disuelto ($[O_2]$) dentro de un remolino anticiclónico de la CL joven (línea azul), maduro (línea naranja), y fuera de los remolinos (línea amarilla). Los perfiles promedio se han calculado a partir de datos de 17 misiones de GMOG.

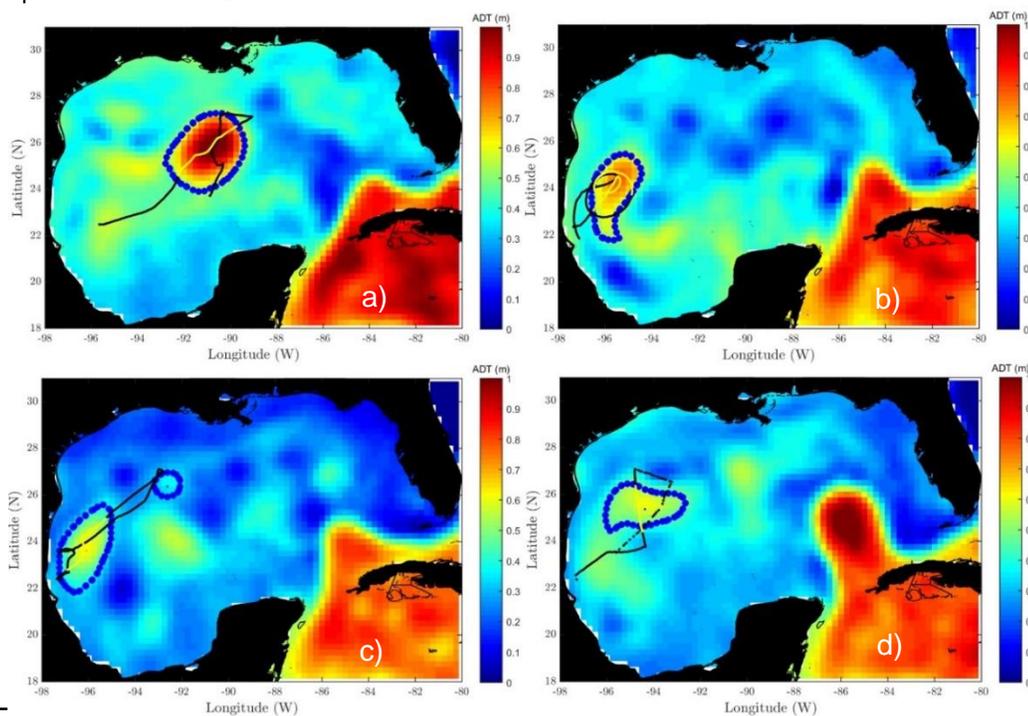


Figura 7.- Mapas de Topografía Dinámica Absoluta (ADT, Absolute Dynamic Topography) de los días a) 19 de septiembre, b) 9 de diciembre de 2016, c) 12 de febrero, y d) 14 de junio de 2017 junto las trayectorias de las misiones de glider (línea punteada negra). Se identifica la periferia del remolino anticiclónico Poseidón con el contorno punteado azul. Las líneas amarillas indican las secciones consideradas para el cálculo de los perfiles promedio mostrados en la figura 8. Nótese la propagación del Poseidón desde la zona central hasta la región oeste del golfo e interacción con la costa oeste.

La evolución del perfil promedio de $[O_2]$ del remolino Poseidón se muestra en la figura 8. El periodo de muestreo fue desde septiembre 2016 hasta agosto 2017; la primera sección de la misión 0003 y la misión 0006 se realizaron en verano, la 0004 en invierno, y la 0005 en primavera. Los perfiles de la misión 0003 y 0006 muestran una distribución vertical similar con un máximo subsuperficial entre [4-4.2] ml l⁻¹ a los ~50 m de profundidad, disminución de la $[O_2]$ conforme aumenta la profundidad hasta alcanzar la ZMO, para incrementar sus concentraciones en profundidad. Al llegar el invierno (de finales de 2016 a inicios de 2017; misión 0004), el máximo subsuperficial ya no es visible posiblemente debido a los procesos de convección durante el invierno que homogenizaron la $[O_2]$ en la capa de mezcla.

La ZMO de la misión 0003 se observó alrededor de los 500m con unos valores mínimos de $[O_2]$ de 2.4 ml l⁻¹. Conforme el remolino se fue desplazando hacia el oeste, la estructura de la ZMO y las $[O_2]$ se observan modificadas en sus perfiles. En la misión 0004 se observa un aumento relativo en los valores de oxígeno disuelto de los primeros 200m de profundidad y una disminución de la $[O_2]$ en la ZMO y hasta los 1000m de profundidad. En la misión 0005 la $[O_2]$ se observa una tendencia a seguir disminuyendo el oxígeno disuelto en la ZMO entre los [200-400]m de profundidad. La misión 0006 es la que presenta la ZMO más superficial con valores de ($[O_2]_{min} = 2.2$ ml l⁻¹). Nótese el ascenso de la ZMO de la misión 0004 a la 0006. Lo anterior es evidencia que, el remolino Poseidón en la misión 0003 era un remolino joven con altas concentraciones relativas de oxígeno disuelto en la columna de agua y conforme pasó el tiempo, durante las misiones restantes, este remolino se fue debilitando al tiempo que disminuía su contenido en oxígeno disuelto, pasando a ser un remolino maduro en la misión 0006. Contrariamente, la $[O_2]$ entre los [500-600]m y los 1000m en las misiones 0005 y 0006 es mayor respecto la misión 0004. Esto podría ser indicativo de una oxigenación profunda debido al debilitamiento del RCL Poseidón y el ascenso de aguas más frías y oxigenadas. Dicho debilitamiento del RCL Poseidón ha sido evidenciado en términos de la reducción del contenido de calor (Meunier et al. 2020) y la erosión del máximo subsuperficial salino de la SUW (Sosa-Gutiérrez et al., 2020).

La evolución temporal de $[O_2]$, SAT% y temperatura en función de la profundidad del remolino Poseidón junto a la temperatura del aire y la velocidad del viento del mismo periodo de muestreo se muestran en la figura 9. Las misiones 0003 y 0006 (verano) presentaron una fuerte estratificación y el máximo subsuperficial de $[O_2]$ bien definido justo debajo de la capa de mezcla. La temperatura del aire en ambas misiones fue relativamente similar: temperaturas cálidas alcanzando los 30°C, además de la presencia de vientos con magnitud menor a 11 m s⁻¹.

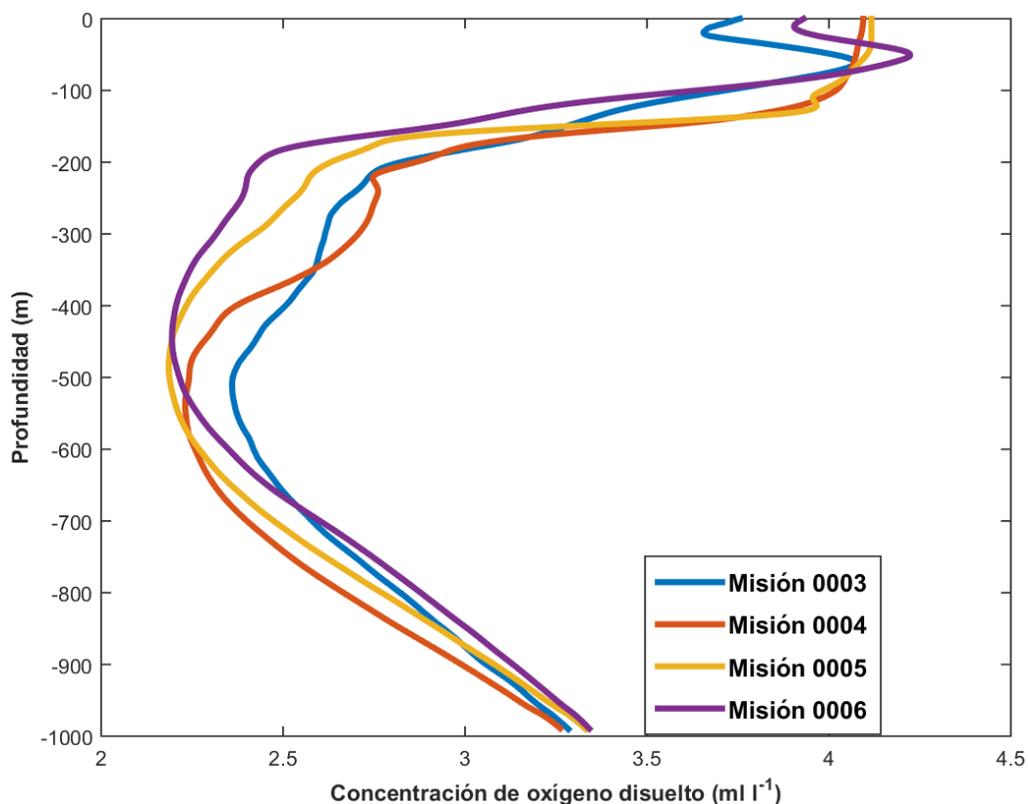


Figura 8.- Evolución del perfil promedio de concentración de oxígeno disuelto ($[O_2]$) dentro del remolino anticiclónico Poseidón para las misiones de glider del Grupo de Monitoreo Oceanográfico con Gliders (GMOG): 0003 (línea azul), 0004 (línea naranja), 0005 (línea amarilla), y 0006 (línea morada).

Al llegar el invierno (diciembre 2016 a marzo 2017) los vientos se intensifican y se intensifica la mezcla por convección. La capa de mezcla es más profunda y la $[O_2]$ se hace más homogénea en los primeros 200 m de profundidad. Los máximos subsuperficiales de $[O_2]$ y de SAT% se observan solo a inicios de primavera y verano, más no durante el invierno. El máximo de $[O_2]$ y SAT% para las misiones 0004 (0005) fueron de 4.26 ml l^{-1} (4.42 ml l^{-1}) por lo que hay un 91 % (93 %) de saturación, respectivamente. La SAT% también presenta un ciclo estacional con la formación de un máximo subsuperficial en verano y una capa de mezcla más profunda y homogénea en invierno. Esta es la temporada de Nortes (frentes fríos) y la magnitud del viento llega a superar los 14 m s^{-1} .

Como se mencionó anteriormente en la figura 8 se aprecia como el Poseidón pierde intensidad y la $[O_2]$ de las aguas dentro del remolino se ve modificada conforme pasa el tiempo.

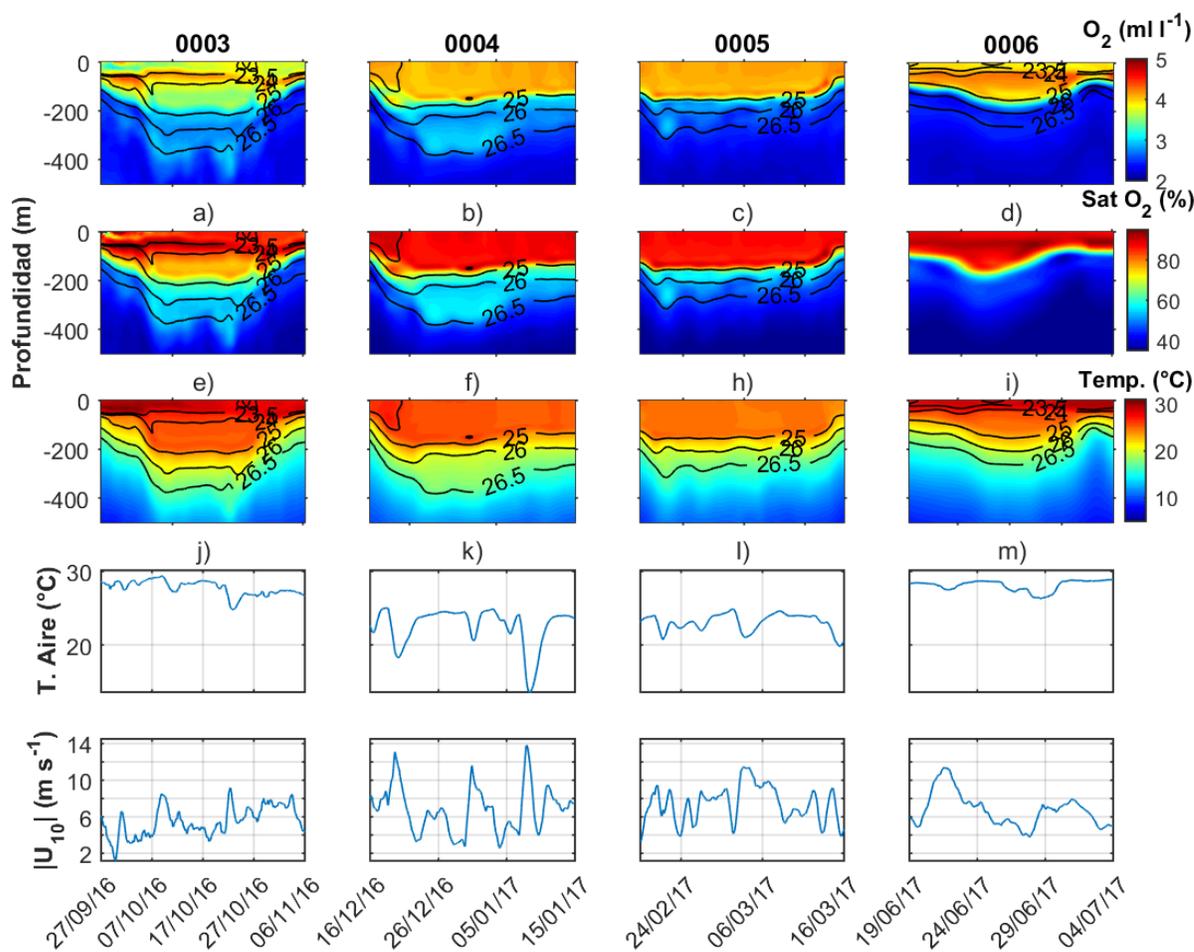


Figura 9.- Evolución temporal del remolino Poseidón. De arriba a abajo: fila 1) O_2 disuelto ($ml\ l^{-1}$), fila 2) saturación de O_2 (%), fila 3) temperatura ($^{\circ}C$) en función de la profundidad, fila 4) temperatura del aire ($^{\circ}C$) y fila 5) la magnitud de la velocidad del viento a 10m de la superficie del mar ($|U_{10}|$; $m\ s^{-1}$); los contornos negros representan anomalía de densidad potencial ($kg\ m^{-3}$).

Otro análisis más cuantitativo muestra la evolución de la disminución de $[O_2]$ dentro del RCL Poseidón en términos de la estructura vertical de la anomalía de $[O_2]$ en la figura 10. En la misión 0003 el remolino Poseidón es joven ($ADT > 0.9m$; figura 7a). En esta región central del GoM ($\sim 90-91^{\circ}W$, $\sim 26-27^{\circ}N$) se observan valores relativamente mayores de oxígeno disuelto en el remolino (valores positivos de anomalía) desde los 100 hasta los 550 m de profundidad. En la misión 0004 los valores del oxígeno disuelto disminuyen a lo largo de la profundidad entre los 100 hasta 400 m; aunque se observan máximos locales de $[O_2]$ de mayor intensidad. En las misiones 0005 y 0006 el remolino se encuentra aproximadamente en los $96^{\circ}W$, $25-26^{\circ}N$, región donde el cambio en los valores de oxígeno disuelto dentro del remolino es más

notorio; en la 0005 (0006) la profundidad del mínimo de oxígeno disuelto se someriza desde los 100 hasta los 300 m (200 m) de profundidad. La magnitud de las anomalías se reduce igualmente.

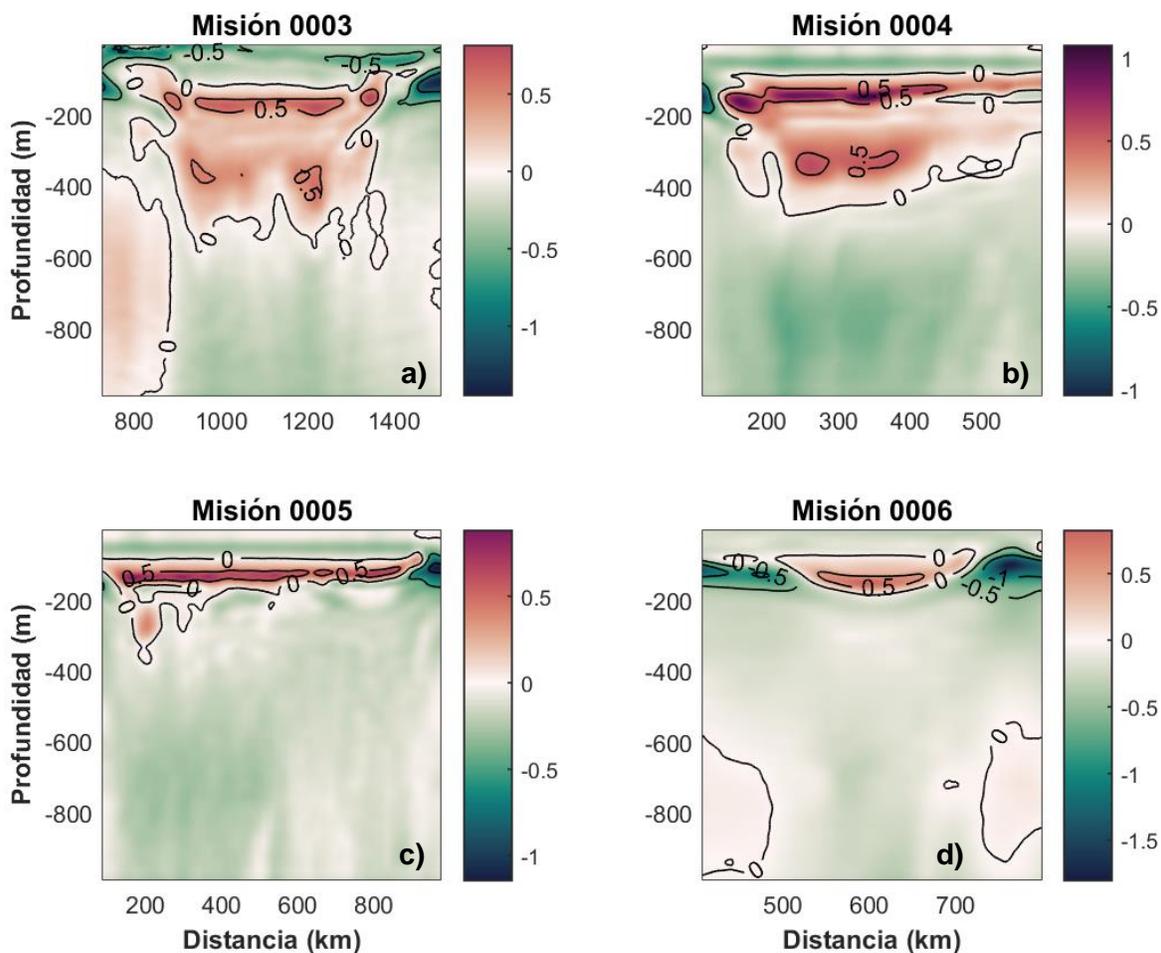


Figura 10.- Estructura vertical de anomalía de concentración de oxígeno disuelto ($[O_2]'$; $ml\ l^{-1}$) durante las misiones de glider del Grupo de Monitoreo Oceanográfico con Gliders (GMOG): a) 0003, b) 0004, c) 0005, y d) 0006 dentro del remolino Poseidón. El perfil promedio utilizado para el cálculo de las anomalías ha sido obtenido a partir de la base de datos de Portela et al. (2018).

3.2 Estructura vertical del O_2 disuelto en el interior de ciclones y anticiclones del Golfo de México.

Los perfiles promedios en el interior de todos los ciclones (perfil azul) y anticiclones (perfil rojo) muestreados durante las 18 misiones del GMOG entre mayo de 2016 y septiembre de 2019 se muestran en la figura 11. En promedio, un ciclón contiene mayores concentraciones de oxígeno disuelto,

comparándolas con un anticiclón. El ciclón rebasa los 4.5 ml l^{-1} a los 80 m de profundidad, por debajo se observa consistentemente una disminución en los valores de oxígeno disuelto con concentraciones $<3 \text{ ml l}^{-1}$ a los 100 m, y una ZMO más somera entre los 300-400 m de profundidad. Hay mayor variabilidad en los ciclones que en los anticiclones, debido a que se promedian ciclones del oeste del GoM con el ciclón de BC con diferentes tamaños y extensiones verticales. En el anticiclón promedio se observan concentraciones máximas en superficie, ligeramente menores a las del ciclón promedio, de $[O_2]_{max} = 4.3 \text{ ml l}^{-1}$ aproximadamente a los 80 m (versus $[O_2]_{max} = 4.7 \text{ ml l}^{-1}$ en ciclón), una profundización de la ZMO entre los 400-600 m y un mínimo en las concentraciones de $[O_2]_{min} < 2.5 \text{ ml l}^{-1}$ a los 500 m. En los anticiclones hay menor variabilidad debido a que se promedian remolinos anticiclónicos de estructura vertical parecida, i.e., remolinos de la Corriente de Lazo. Estos remolinos anticiclónicos promedio, contienen consistentemente mayores valores de oxígeno disuelto entre los 100-200m de profundidad y menor entre 300-1000m de profundidad respecto los ciclones promedio.

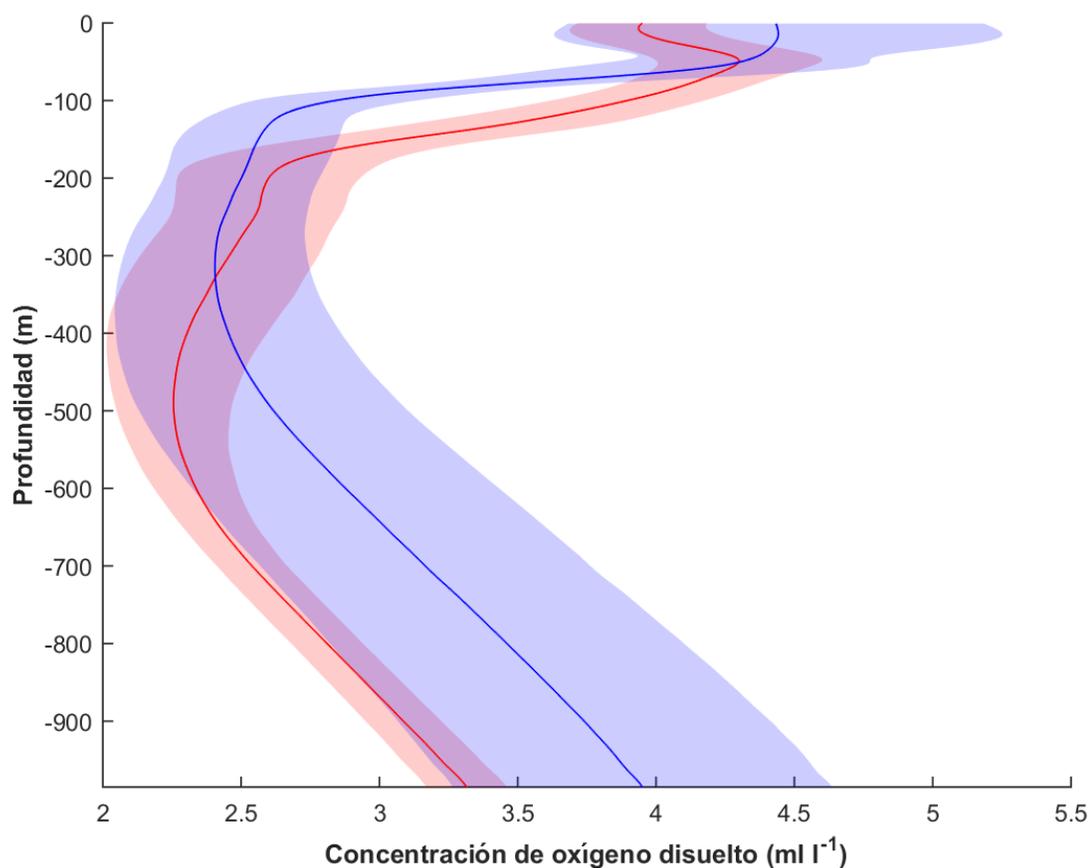


Figura 11.- Perfiles promedio de concentración de oxígeno disuelto ($[O_2]$) dentro de un remolino anticiclónico (línea roja) y un remolino ciclónico (línea azul). Se han utilizado 17 misiones de glider para la construcción de dichos perfiles promedios. Los sombreados rojo y azul indican la desviación estándar de las observaciones para remolinos anticiclónicos y ciclónicos, respectivamente.

En la figura 12 se muestra la estructura vertical del oxígeno disuelto (ml l^{-1}) en función de la densidad (kg m^{-3}) y profundidad (m; colores) de un remolino anticiclónico (perfil izquierdo) y uno ciclónico (perfil derecho) promedio de las 17 misiones de glider del GMOG. Se realizó este diagrama con el fin de observar la estructura vertical de las concentraciones de oxígeno disuelto sin considerar el efecto de “hundimiento” o “abombamiento” de las isopícnas en ambos tipos de remolinos. Se observan altas $[\text{O}_2]$ superficiales (encima de la isopícnica de 24.5 kg m^{-3}), disminución de las concentraciones entre las isopícnas de $[24.5-26.5] \text{ kg m}^{-3}$ y la ZMO alrededor de la isopícnica de 27 kg m^{-3} . En promedio, la $[\text{O}_2]$ en el interior de ciclones es mayor que en anticiclones en toda las isopícnas excepto alrededor de la isopícnica de 26.5 kg m^{-3} . Sin embargo, estadísticamente la desviación estándar de los perfiles promedios indica que esas diferencias no son significativas ya que se superponen en gran medida (Fig. 11). En términos de densidad, y por debajo de la isopícnica de $\sim 25 \text{ kg m}^{-3}$, el perfil vertical de $[\text{O}_2]$ en el interior de los dos tipos de remolinos es similar. Es decir, las características más relevantes del perfil se localizan sobre las mismas isopícnas en los dos tipos de remolinos: mayor tasa de cambio vertical de la $[\text{O}_2]$ centrada sobre la isopícnica de 25.5 kg m^{-3} , mínimo de $[\text{O}_2]$ alrededor de la isopícnica de 27 kg m^{-3} , y máximo profundo sobre la isopícnica de 27.5 kg m^{-3} . Las profundidades donde se localizan, sin embargo, se encuentran desplazadas aproximadamente 150-200m hacia arriba en el ciclón respecto el anticiclón debido a las diferencias en el campo vertical de densidad: “hundimiento” en anticiclones y “abombamiento” en ciclones.

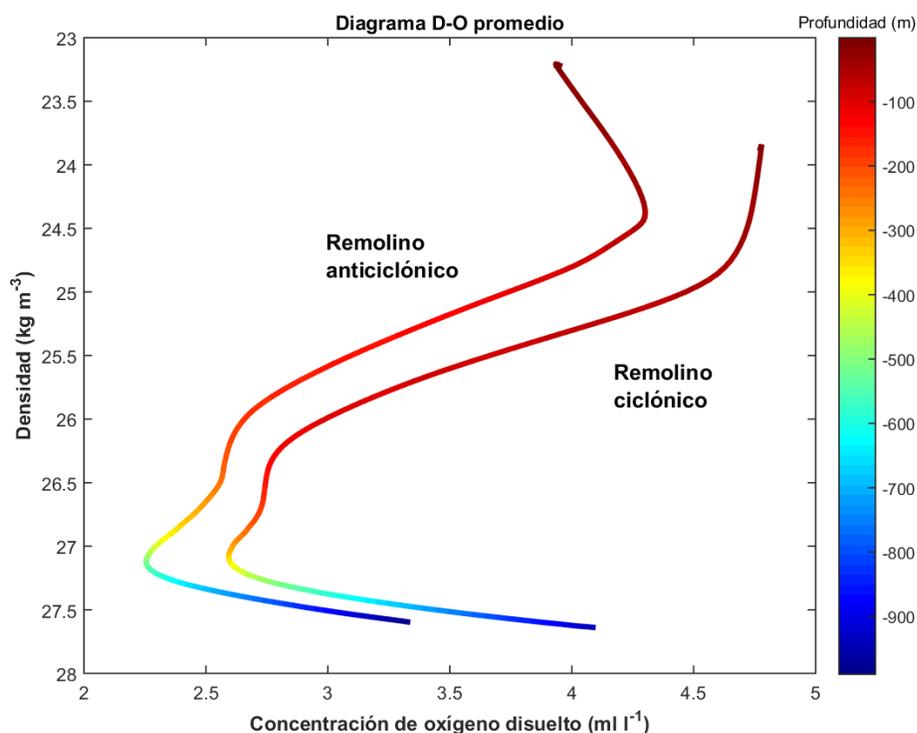


Figura 12.- Diagrama densidad (kg m^{-3})-oxígeno (ml l^{-1}) en un ciclón (perfil derecho) y anticiclón (perfil izquierdo) promedio muestreados obtenidos a partir de observaciones de 17 misiones de glider del GMOG.

3.2.1 Caso de estudio: estructura vertical de un ciclón y anticiclón típicos

La comparación de la estructura vertical de oxígeno disuelto (ml l^{-1}), saturación de oxígeno disuelto (%), y temperatura dentro del remolino ciclónico de Campeche muestreado durante la misión 0013 (figura 13) y uno anticiclónico durante la misión 0014 (figura 14) se muestra en la figura 15. Ambos remolinos fueron aproximadamente en la misma temporada, i.e. invierno.

La sección vertical del ciclón de Campeche (9 de octubre al 16 de noviembre de 2018) muestra una distribución de las isolíneas de $[O_2]$, SAT%, y de temperatura abombadas hacia arriba en el núcleo del remolino y hundidas en la periferia (figura 15a, c, y e). La mezcla convectiva debida a los Nortes todavía no inicia y eso se ve reflejado a las aguas cálidas ($30\text{ }^\circ\text{C}$) en la capa de mezcla somera; y, que todavía está presente el máximo sub-superficial de oxígeno disuelto aproximadamente a los 60 m. El máximo de $[O_2]$ subsuperficial contiene concentraciones aproximadamente de 4.3 ml l^{-1} e igual para este rango de profundidad las aguas se consideran subsaturadas (SAT% = 93%). Por otra parte, la estructura vertical del anticiclón (sección vertical muestreada entre el 25 de febrero y el 16 de marzo de 2019) es distinta, con un hundimiento de las isolíneas de $[O_2]$, SAT%, y de temperatura en el núcleo del remolino (figura 15b, d, y f). Hay mezcla intensa (capa de mezcla mucho más profunda que en el ciclón de Campeche), manteniendo una $[O_2]$ de 4 ml l^{-1} en los primeros 180 m. En este mismo rango de profundidad también se encuentra la saturación máxima, que alcanza el 80%. Esto quiere decir que el agua está más subsaturada que el ciclón de Campeche muestreado.

No se observa una modificación significativa en la profundidad de la ZMO; esto se debe a que el remolino anticiclónico ya es maduro (ADT=0.55m), y lleva varios meses en el oeste del GoM interaccionando con la plataforma y otros remolinos.

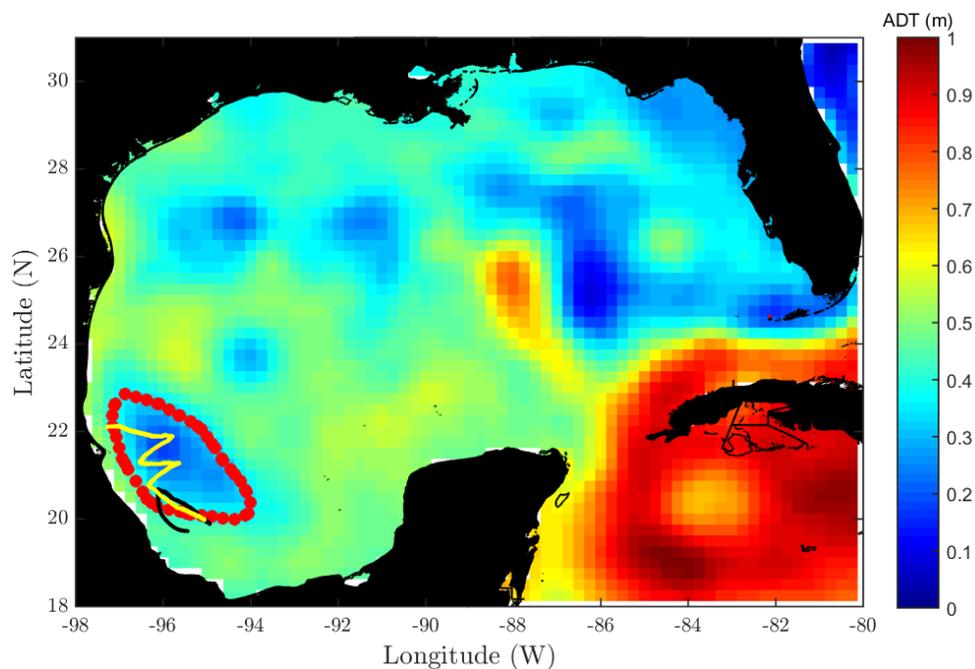


Figura 13.- Mapa de Topografía Dinámica Absoluta (ADT, Absolute Dynamic Topography) del día 9 de octubre de 2018 junto la trayectoria del glider (línea negra) durante la misión 0013 en la que se muestreó el remolino ciclónico de Campeche. Los puntos rojos indican la periferia del remolino y la línea amarilla la sección del ciclón considerada en las figuras 15a, c, y e.

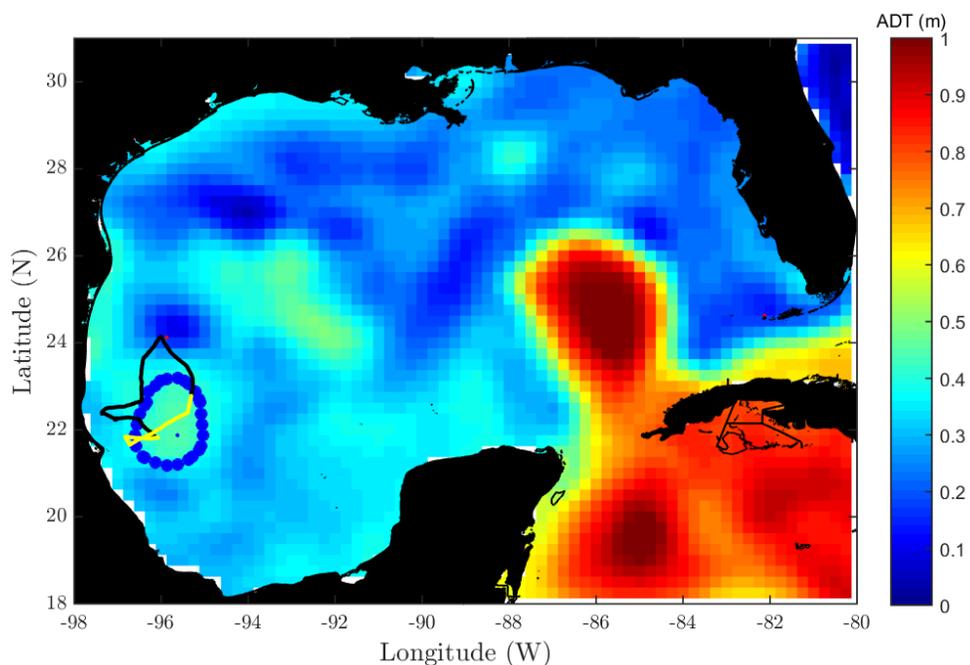


Figura 14.- Mapa de Topografía Dinámica Absoluta (ADT, Absolute Dynamic Topography) del día 25 de febrero de 2019 junto la trayectoria del glider (línea negra) durante la misión 0014 en la que se muestreó un remolino anticiclónico en el oeste del GoM. Los puntos azules indican la periferia del remolino y la línea amarilla la sección del anticiclónico considerada en las figuras 15b, d, y f.

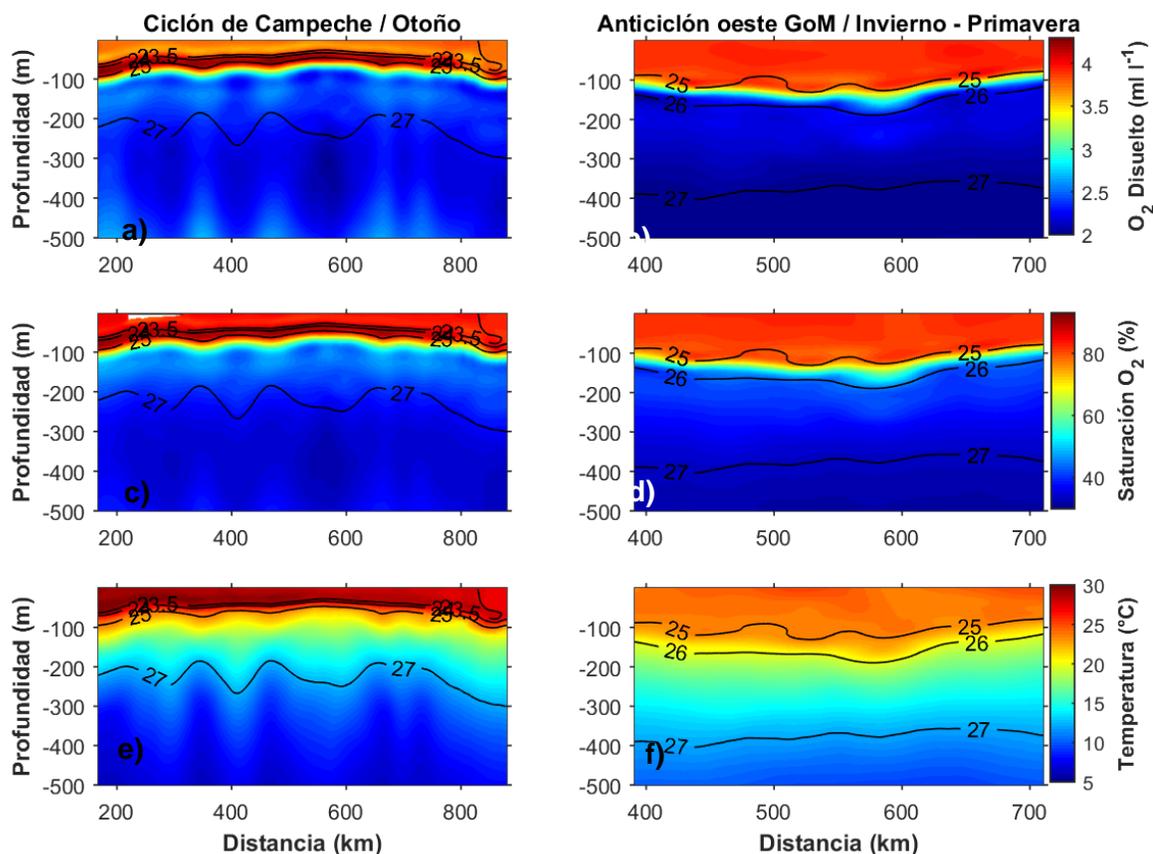


Figura 15.- Concentración de oxígeno disuelto ($[O_2]$; $ml\ l^{-1}$), saturación de oxígeno disuelto (SAT%; %) y temperatura ($^{\circ}C$) dentro del remolino ciclónico de Campeche muestreado en la misión de glider 0013 (a, c, y e) y dentro de un remolino anticiclónico de la misión de glider 0014 (b, d, y f) localizado en el oeste del Golfo de México (ver figuras 13 y 14). Los contornos negros representan anomalía de densidad potencial ($kg\ m^{-3}$).

La comparación de la estructura vertical de las anomalías de $[O_2]$ de los mismos casos de estudio se muestra en la figura 16. Las anomalías positivas (“oxigenación”) dentro del ciclón de Campeche se encuentran en aguas subsuperficiales y por debajo de los 400m de profundidad, con valores hasta de $>0.4\ ml\ l^{-1}$ (máximo de $0.5\ ml\ l^{-1}$ a 600-700 m de profundidad) (figura 16a). Se observa una anomalía negativa de $[O_2]$ (“consumo de oxígeno disuelto”) ocurre en el centro del remolino, desde los 80 hasta los 150 m (figura 16a). La estructura de las anomalías de $[O_2]$ en el anticiclón es distinta; un ligero aumento de oxígeno disuelto ($\sim 0.2\ ml\ l^{-1}$) ocurre en el centro del remolino centrado aproximadamente a los 100m de profundidad y disminución relativa en el oxígeno disuelto significativa ($-0.5\ ml\ l^{-1}$) en superficie y más intensa ($<-1\ ml\ l^{-1}$) en las periferias entre 150-200m de profundidad y por debajo de la anomalía positiva. La anomalía negativa en las periferias sugiere relajación (ascenso) de las isopícnas. Nótese que esta estructura vertical de la anomalía de $[O_2]$ (figura 16b) es muy similar a la del remolino Poseidón al final de

su ciclo de vida (misión 0006). En este remolino anticiclónico la oxigenación en el núcleo de la SUW no es muy intensa debido a que es un remolino ya maduro y muy debilitado. En el caso del remolino Poseidón, por ejemplo, las anomalías positivas llegan a alcanzar 1 ml l^{-1} (figura 10).

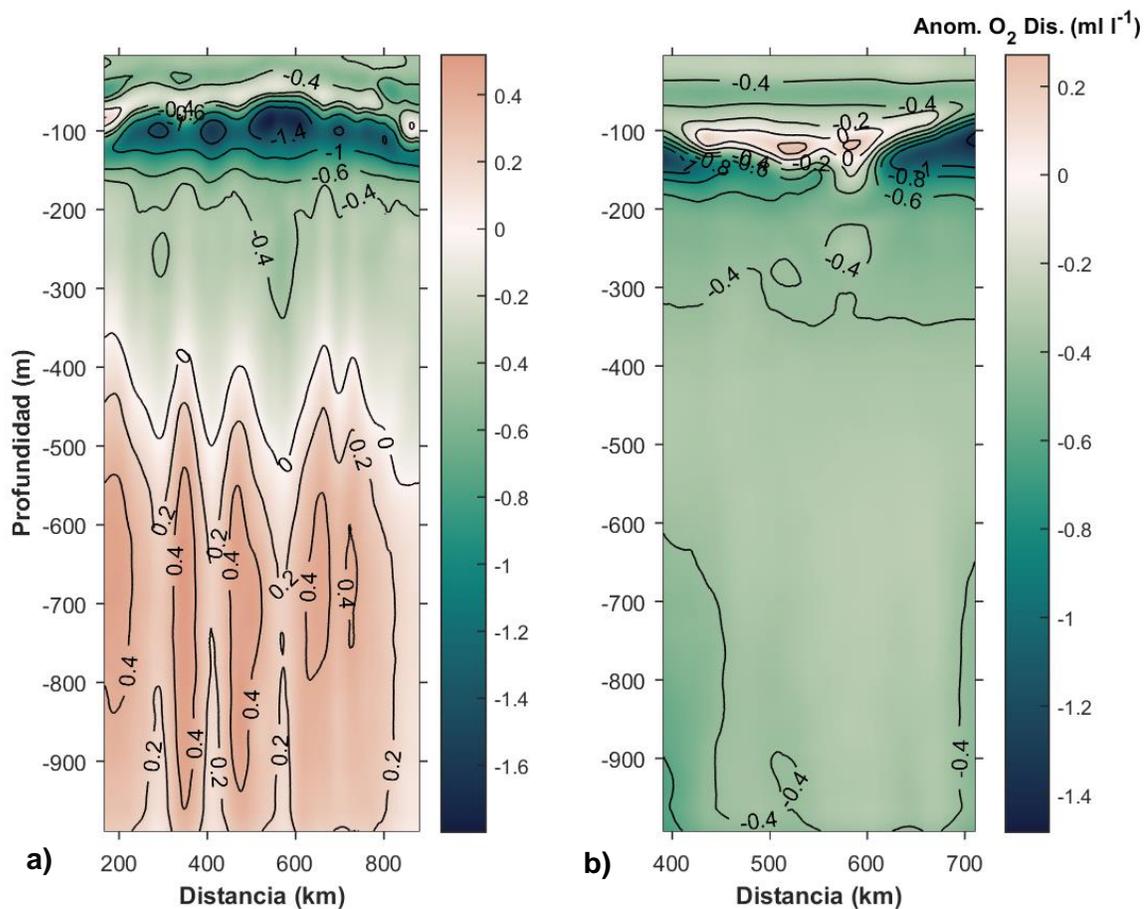


Figura 16.- Distribución vertical de la anomalía de concentración de oxígeno disuelto ($[O_2]'$; ml l^{-1}) de a) remolino ciclónico de Campeche en la misión 0013 y b) un remolino anticiclónico maduro muestreado en la misión 0014 localizado en el oeste del Golfo de México.

3.3 Procesos de variabilidad del perfil típico (promedio) de oxígeno disuelto en anticiclones

A continuación, se describen las diferentes fuentes de variabilidad vertical de la $[O_2]$ en el interior de remolinos de mesoescala anticiclónicos identificados con los datos de glider en el GoM.

3.3.1 Estacionalidad: modificación de la solubilidad por la temperatura

La evolución temporal de la $[O_2]$ en los primeros 200 m, la temperatura, y la solubilidad del O_2 en el remolino Poseidón es mostrada en la figura 17. Las temperaturas más altas se encontraron en las misiones de verano (0003 y 0006; figuras 17 a y d, respectivamente) con máximas dentro del remolino de $\sim 30^\circ\text{C}$ y concentraciones de $[O_2]$ mínimas de 4.3 ml l^{-1} causando que las concentraciones de oxígeno disuelto en la capa de mezcla disminuyeran. En las misiones de otoño e invierno (0004 y 0005; figuras 17 b y c, respectivamente) el océano superior se enfría por el paso de los frentes fríos del Norte con temperaturas mínimas de $\sim 24^\circ\text{C}$ y las concentraciones de oxígeno disuelto aumentan a 4.7 ml l^{-1} . Nótese la estacionalidad del máximo subsuperficial de $[O_2]$, ubicuo en verano (figuras 8 y 9), el cual está estrechamente relacionado con la restratificación y disminución de solubilidad del oxígeno disuelto en la capa de mezcla ($\sim 50\text{m}$) debida al incremento estacional de la temperatura (figuras 17a y d).

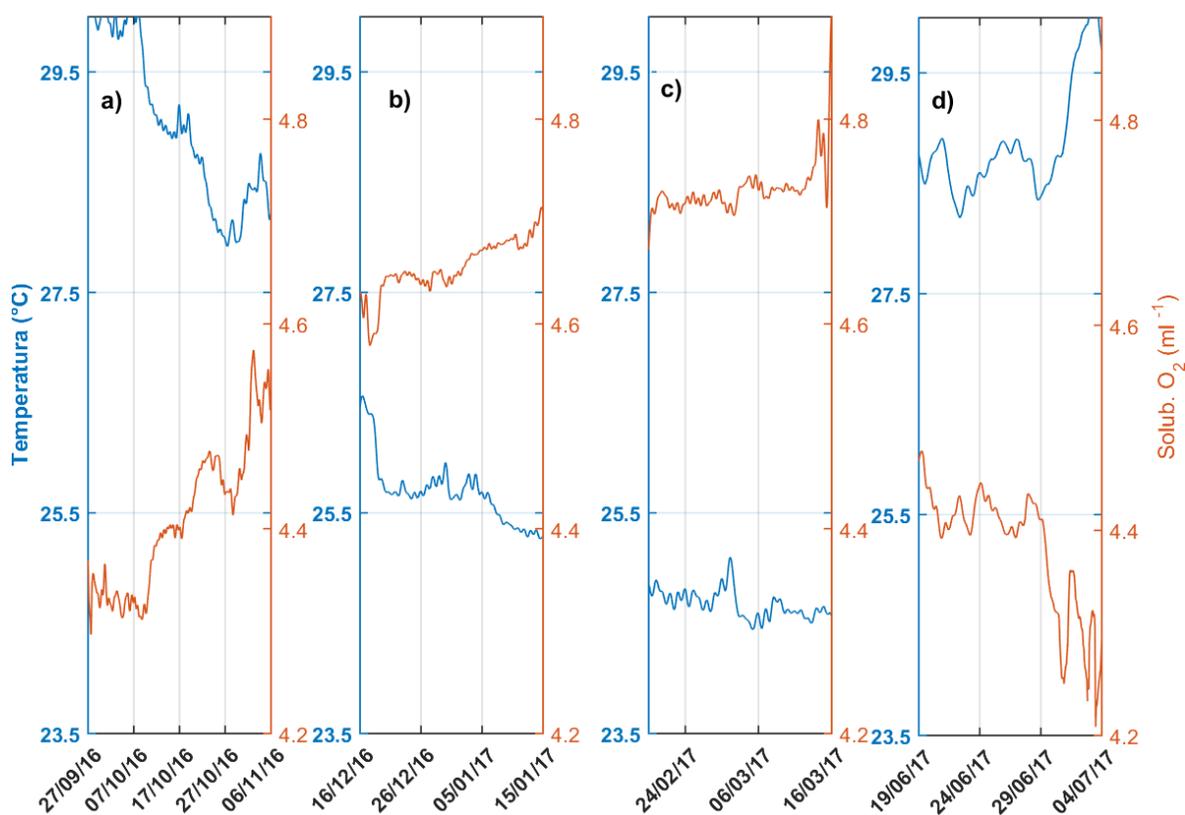


Figura 17.- Evolución temporal de la temperatura ($^\circ\text{C}$; línea azul) y solubilidad de oxígeno disuelto (ml l^{-1} ; línea naranja) promediadas en los primeros 50m de profundidad dentro del remolino Poseidón durante las misiones a) 0003, b) 0004, c) 0005, y d) 0006.

3.3.2 Remolinos intratermoclinos: parches subsuperficiales ricos en oxígeno disuelto

Dentro de tres remolinos anticiclónicos de la CL se encontraron “parches” subsuperficiales ricos en oxígeno disuelto. Estos parches de elevadas $[O_2]$ están asociados con abombamientos y hundimientos locales de la termoclina hacia arriba y abajo indicando la presencia de remolinos anticiclónicos submesoescalares (20-30km de diámetro) intratermoclinos (Meunier et al. 2018). En esta disertación se utilizaron 2 misiones de glider, diferentes a la misión mostrada en Meunier et al. (2018): la 0002 (desde 26 de junio hasta 11 de julio de 2016, ver figura 18) y la 0018 (desde 6 de junio hasta 28 de junio de 2019, ver figura 19). En las figuras 20a, c, y e se muestran las secciones verticales de $[O_2]$ en dichos remolinos. En la misión 0018 se muestreó dos veces un remolino intratermocliño (primero y segundo panel) y en la misión 0002 (tercer panel) se midió un tercer remolino. Todos ellos se localizan entre los 200-500m de profundidad y tienen radios entre los 15-25km; similares a los encontrados en Meunier et al. (2018). En las figuras 20b, d, y f se muestran dos perfiles promedios: un promedio de todos los perfiles fuera del remolino intratermocliño y uno de todos los perfiles dentro del remolino intratermocliño. En general ambos perfiles tienen un comportamiento similar: máximo subsuperficial de verano bien definido y la disminución de oxígeno disuelto conforme aumenta la profundidad. La diferencia principal es la presencia de este parche de alta $[O_2]$. En los tres remolinos intratermoclinos, los parches muestran un aumento en las $[O_2]$ de 0.4 a 0.6ml l⁻¹ respecto al perfil de referencia (fuera). Estos parches de oxígeno disuelto modifican un perfil típico de verano, produciendo un segundo máximo subsuperficial que permite alcanzar $[O_2]$.

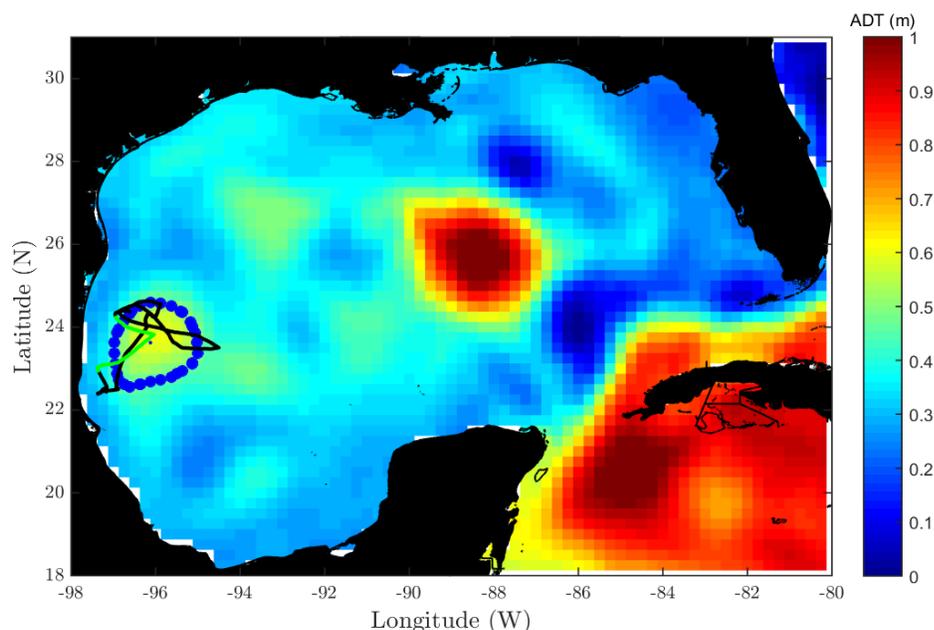


Figura 18.- Mapa de Topografía Dinámica Absoluta (ADT, Absolute Dynamic Topography) del día 26 de junio de 2016 junto la trayectoria del glider (línea negra) durante la misión 0002 en la que se muestreó un remolino anticiclónico en el oeste del GoM. Los puntos azules indican la periferia del remolino y la línea verde la sección del anticiclónico considerada en la figura 20e y f.

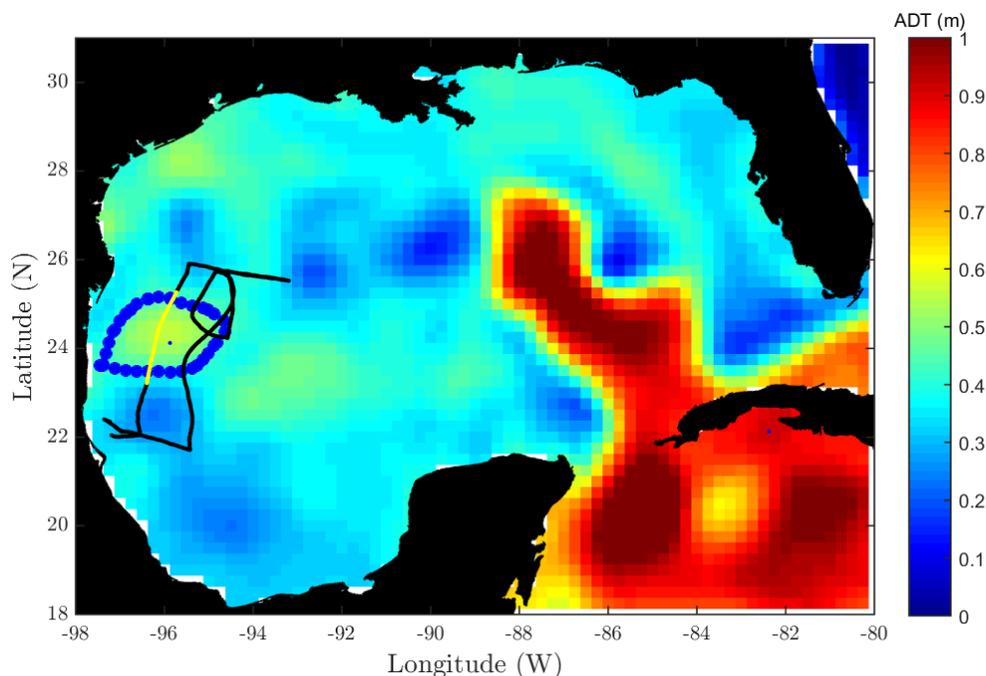


Figura 19.- Mapa de Topografía Dinámica Absoluta (ADT, Absolute Dynamic Topography) del día 6 de junio de 2019 junto la trayectoria del glider (línea negra) durante la misión 0018 en la que se muestreó un remolino anticiclónico en el oeste del GoM. Los puntos azules indican la periferia del remolino y la línea amarilla la sección del anticiclónico considerada en la figura 20a, b, c y d.

3.3.3 Filamentos ricos en oxígeno disuelto

La $[O_2]$ en el remolino Poseidon joven (figura 9a) muestra filamentos de alta $[O_2]$ en la periferia de los mismos que se extienden desde el máximo subsuperficial de verano ($\sim 50\text{m}$) hasta los 100-150m de profundidad y hacia en núcleo del remolino. Estas capas con mayor contenido en oxígeno disuelto se han observado en otras misiones del GMOG asociadas a las periferias de alta velocidad de los RCL. Una hipótesis para explicar dicha variabilidad es la formación de capas compensadas termohalinamente generadas mecánicamente en las periferias de los remolinos donde hay un corte vertical significativo de velocidad. Éste fenómeno se denomina *layering* y ha sido observado en el remolino Poseidón exactamente en la misma localización donde observamos las capas de alta $[O_2]$ (ver Meunier et al. 2019 y figura 9a). Otra hipótesis es que estas capas ricas en $[O_2]$ se pueden generar por subducción submesoesalar en la periferia del remolino. Omand et al. (2015) encontró este mecanismo en el Atlántico Norte, donde describe con datos y modelización numérica la subducción de aguas superficiales ricas en carbono

orgánico particulado por circulación ageostrófica secundaria intensa (100 m día^{-1}) en la periferia de los remolinos.

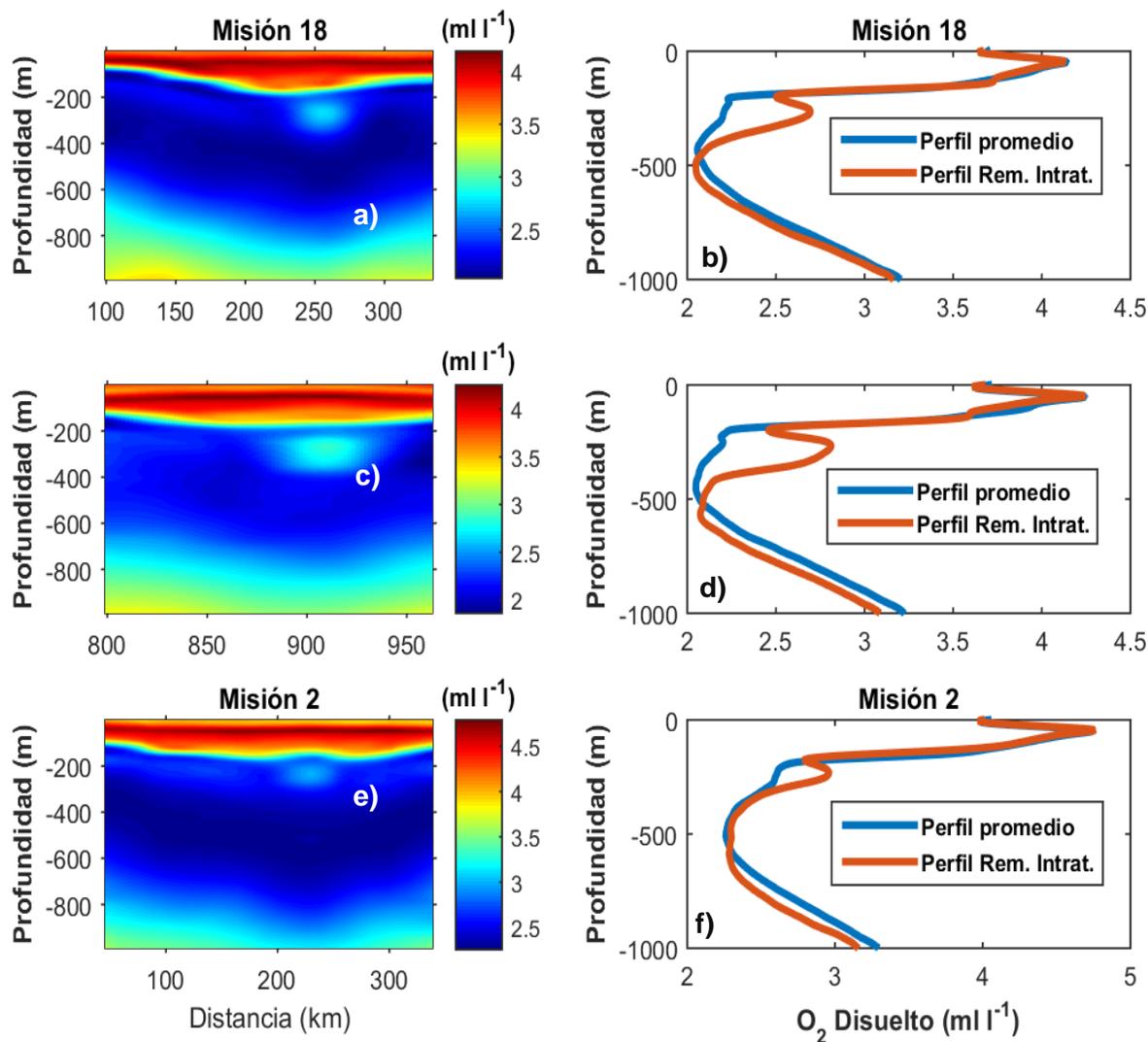


Figura 20.- Distribución de la concentración de oxígeno disuelto ($[O_2]$; ml l^{-1}), en función de la profundidad (a, c, y e) y perfiles de $[O_2]$ promedios (b, d, y f) en el interior (línea naranja) y exterior (línea azul) de los remolinos intratermoclinos. Las misiones son indicadas en los títulos de las figuras.

3.4 Comparación de la estructura vertical del oxígeno disuelto entre un remolino ciclónico del oeste del GoM y el ciclón de la bahía de Campeche

En esta tesis de maestría nos centramos principalmente en el análisis de la variabilidad del oxígeno disuelto en el interior de remolinos anticiclónicos porque la base de datos de GMOG esta sesgada hacia el muestreo

de RCL (ver Tablas 1 y 2). Sin embargo, en esta sección comparamos dos secciones de dos remolinos ciclónicos: (i) el remolino ciclónico de Campeche (Pérez-Brunius et al., 2013; Sebastián Cisneros, 2021) y (ii) un ciclón de la región oeste del GoM.

La estructura vertical de la $[O_2]$, SAT%, y clorofila-a dentro del ciclón de Campeche muestreado en la misión 0010 y dentro de un remolino ciclónico del oeste (no mostrados) se presenta en la figura 21. El ciclón de Campeche fue muestreado desde el 26 de marzo hasta el 10 de abril de 2018. La estructura vertical del ciclón de Campeche (figuras 21a, c, y e) es muy parecida a la de un ciclón del oeste del GoM (figuras 21b, d, y f): levantamiento de isolíneas de $[O_2]$, isolíneas de SAT% e isopicnas. Sin embargo, los valores de las tres variables son mayores en el ciclón de Campeche que en el ciclón del oeste. La concentración máxima de oxígeno disuelto en el ciclón de Campeche es de 6 ml l^{-1} mientras que en el ciclón del oeste es de 4 ml l^{-1} . El ciclón de Campeche está sobresaturado de oxígeno disuelto (120%) mientras que el del oeste está subsaturado (80%). Esto sugiere mayor actividad biológica en la capa eufótica del remolino de Campeche versus el remolino del oeste lo que es reflejado en la mayor concentración de clorofila- a en el remolino de Campeche ($>1 \mu\text{g l}^{-1}$) respecto el remolino del oeste ($\sim 0.8 \mu\text{g l}^{-1}$) (figura 21e versus figura 21f). La capa de mezcla del ciclón de Campeche ($\sim 70 \text{ m}$) es más somera que la del ciclón del oeste ($\sim 100 \text{ m}$); esto se debe a que el de Campeche fue muestreado en primavera y el del oeste en invierno. La ZMO en ambos ciclones se encuentra justo en el límite inferior de la capa de mezcla, siendo más somero en el ciclón de Campeche.

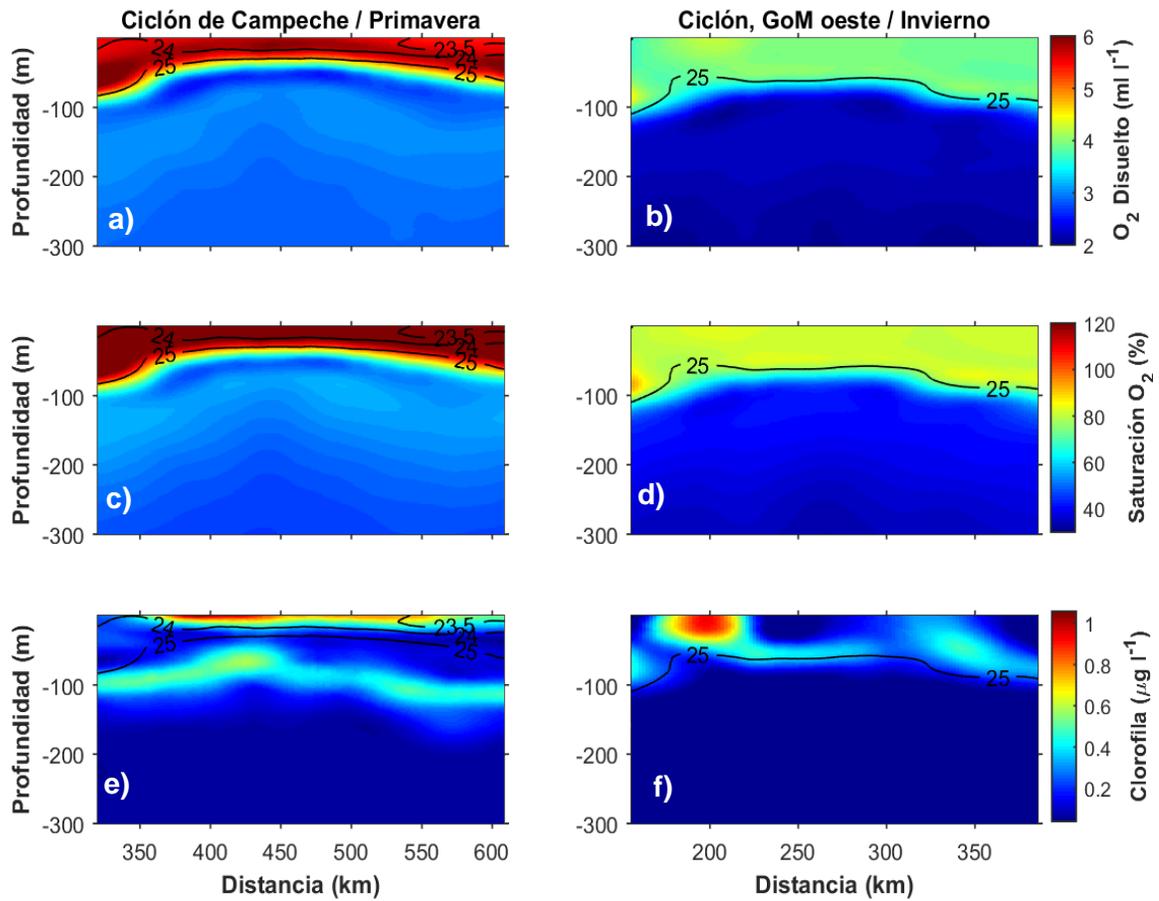


Figura 21.- Distribución vertical de concentración de oxígeno disuelto ($[O_2]$; $ml\ l^{-1}$), saturación de $[O_2]$ (SAT%; %) y concentración de clorofila-a ($\mu g\ l^{-1}$) dentro del ciclón de Campeche (a, c, y e) y dentro de un ciclón del oeste del GoM (b,d, y f); los contornos negros representan anomalía de densidad potencial ($kg\ m^{-3}$).

Capítulo 4. Discusión

La estructura vertical del oxígeno disuelto en el interior de remolinos de mesoescala del Golfo de México fue descrita con base en datos físicos y biogeoquímicos adquiridos durante 17 misiones de Seagliders realizadas entre mayo 2016 y septiembre 2019 por el GMOG. Estas observaciones permitieron presentar un perfil promedio (típico) de $[O_2]$ en el interior de remolinos de mesoescala y describir diversos mecanismos que modulan su variabilidad espacial y temporal.

Un mecanismo de especial interés es la formación del máximo subsuperficial de oxígeno disuelto (~50m) en primavera/verano, ya que se produce a nivel de toda la cuenca del GoM; y en todas las regiones oligotróficas (Richardson y Bendtsen, 2017). El máximo subsuperficial es observado en remolinos anticiclónicos de mesoescala (figuras 9a y d; figuras 20a, c, y e) y en remolinos ciclónicos como el ciclón de Campeche (figura 20a). Sin embargo, la magnitud del máximo puede variar entre los remolinos ciclónicos y anticiclónicos. La $[O_2]$ en el máximo subsuperficial del remolino de Campeche (figura 21a) puede alcanzar $>6 \text{ ml l}^{-1}$, mientras que en los anticiclónicos del oeste del GoM (figuras 9a y d; figuras 20a, c, y e) presentan $[O_2]_{max} \ni [4-4.5] \text{ ml l}^{-1}$, a pesar de formarse en la misma estación del año; finales de primavera y verano. La saturación de oxígeno disuelto en el ciclón de Campeche alcanza 120% (figura 21c) mientras que en los remolinos anticiclónicos no supera el 80% indicando un exceso de $[O_2]$ en el remolino de Campeche directamente asociado a una producción de oxígeno por fotosíntesis. De acuerdo con Reid & Shulenberger (1981), la capa subsuperficial que se forma con elevada $[O_2]$ y con tasas de saturación de 120% o más se localiza por debajo de la productividad primaria superficial y por encima del máximo profundo de clorofila-a. El máximo subsuperficial es originado por producción biológica de oxígeno es un proceso exclusivo que sucede en el interior de remolinos ciclónicos, lo que nos sugiere que los núcleos de este tipo de remolinos son más productivos que los núcleos de los anticiclones. Los remolinos anticiclónicos también presentan un máximo subsuperficial, pero a diferencia de los remolinos ciclónicos, el agua superficial está subsaturada ($<100\%$) lo que descarta la idea de actividad biológica superficial en el núcleo de los mismos, y sugiere un mecanismo más bien termodinámico. El claro ejemplo es el remolino Poseidón, el cual fue monitoreado durante un año de su ciclo de vida (ver figuras 9 y 17). En verano, las altas temperaturas reducen las concentraciones de oxígeno disuelto en la capa de mezcla somera y al mismo tiempo se estratifica la columna de agua formando una capa de altos gradientes verticales de densidad, causando que las concentraciones debajo de esta termoclina estacional no puedan escaparse hacia la atmósfera. Para los remolinos anticiclónicos, este máximo subsuperficial es causado por efectos de solubilidad del oxígeno disuelto en la capa de mezcla (ver figura 17). En nuestro estudio no contamos con datos cuantitativos de productividad primaria, sin embargo, la ausencia de clorofila-a superficial en el núcleo del

Poseidón (no mostrado) y la disminución de la solubilidad en concordancia con el aumento de temperatura a finales de primavera y verano sugiere que la formación del máximo subsuperficial de oxígeno disuelto es el resultado de un proceso termodinámico.

La distribución vertical (en profundidad) de oxígeno disuelto en remolinos ciclónicos y anticiclónicos es significativamente diferente; igualmente entre anticiclónicos jóvenes y maduros. Los resultados muestran una estructura vertical promedio de $[O_2]$ con el máximo subsuperficial de primavera/verano en los primeros 100m, un descenso de la $[O_2]$ hasta alcanzar la ZMO (entre los 200-500 m), y un incremento de la $[O_2]$ hacia la base del remolino a los ~ 1000 m de profundidad. Los remolinos ciclónicos promedio tienen mayor $[O_2]$ en los primeros 100m, menor entre los 100-200m, y de nuevo aumentan su $[O_2]$ desde los 200m hasta los 1000m de profundidad; con una ZMO más somera que los remolinos anticiclónicos promedio (figura 11). En promedio, la $[O_2]$ en términos de la densidad en los ciclones es mayor que en anticiclones en casi toda la columna de agua. Sin embargo, estadísticamente el perfil vertical de densidad- $[O_2]$ en ciclones y anticiclones es similar por debajo de la isopícnica de 25 kg m^{-3} con las características principales del perfil vertical de $[O_2]$ localizadas sobre las mismas isopícnicas (oxiclina, ZMO, y máximo profundo). Estos resultados indican que, en términos de la profundidad, el perfil vertical de $[O_2]$ promedio presenta mayores $[O_2]$ en ciclones que en anticiclones en gran medida debido a la diferencia estructural del campo de densidad en ciclones y anticiclones con isopícnicas elevadas y hundidas, respectivamente. Con los datos que disponemos, concluimos que los ciclones en general contienen mayores concentraciones que los anticiclones. Puesto que la base de datos de GMOG contiene muchas observaciones en la bahía de Campeche, se sugiere que en esa región las concentraciones de oxígeno en la columna de agua son más elevadas que la región central del Golfo de México. La base de datos de Portela apoya esta idea ya que los perfiles verticales promedios con mayor $[O_2]$ se localizan en la bahía de Campeche (cuadrantes verdes y magenta en la Fig.5) donde típicamente encontramos el ciclón de Campeche. Nótese que dichos perfiles promedios se parecen al perfil promedio en el interior del ciclón compuesto (Fig.11). Se propone que en el interior de ciclones del Golfo de México y, particularmente en la bahía de Campeche, deben existir efectos particulares de advección, mezcla, y procesos biogeoquímicos que oxigenan y/o disminuyen el consumo de oxígeno en los primeros 1000m de columna de agua respecto remolinos anticiclónicos (zona central del Golfo de México).

Existen otros estudios donde muestrean con gliders la hidrografía y variables biogeoquímicas dentro de remolinos de mesoescala. Uno es el de Zarokanellos y Jones (2018) que realizaron muestreos en remolinos del Mar Rojo Central durante la mezcla de invierno en 2014. En presencia de un remolino anticiclónico se observó hundimiento de isopícnicas y de isolíneas de materia orgánica, oxígeno disuelto, y clorofila-a,

mientras que en presencia de un remolino ciclónico hay un levantamiento de las mismas. La concentración máxima de O_2 fue de 5.05 ml l^{-1} desde superficie hasta los 200 m de profundidad y una ZMO de 2.7 ml l^{-1} , relativamente menor a la del GoM. Al igual que en esta disertación, Zarokanellos y Jones (2018) describen una homogeneización de la $[O_2]$ en la capa superficial en invierno, y una reducción de la $[O_2]$ en la capa de mezcla de los remolinos, asociada al incremento de temperatura por incorporación de una masa de agua cálida (descenso de la $[O_2]$ de saturación), restratificación, y subsecuente formación del máximo subsuperficial de $[O_2]$ por debajo de la capa de altos gradientes verticales de densidad.

Otro estudio relevante es el de Sarma et al. (2018). Los autores monitorearon remolinos anticiclónicos y ciclónicos del Golfo de Bengala, pero a más detalle. La $[O_2]$ fue de 4.5 ml l^{-1} a los 40 m de profundidad y en la ZMO de 0.11 ml l^{-1} . Aun cuando en este estudio se menciona la presencia de un débil máximo subsuperficial de $[O_2]$, no mencionan el proceso de su formación. Ellos se enfocan más en cómo afecta la intensidad de los remolinos a la ZMO, la cual se extiende desde 100 hasta los 190 m en el Golfo de Bengala. En cuanto a los remolinos del GoM, la ZMO puede llegar a alcanzar profundidades de 400-500 m. Esto sugiere que los remolinos anticiclónicos del GoM son muy intensos, hundan las isopícnas provocando la suministración de aguas relativamente altas en oxígeno disuelto y así mismo modificando la ZMO propia de un océano en reposo (si no existiera el remolino = isopícnas planas); evitando la formación de aguas bajas en concentraciones de oxígeno disuelto. En los remolinos ciclónicos del Golfo de Bengala, al igual que en el GoM, la ZMO es más somera (isolíneas de $[O_2]$ levantadas) y por ello dominan las concentraciones más pobres de oxígeno por debajo de la termoclina y hasta la profundidad de mínima $[O_2]$.

Así como los remolinos anticiclónicos estudiados por Sarma et al. (2018), los remolinos anticiclónicos del GoM también son importantes con respecto a la oxigenación subsuperficial que producen. En el GoM, los remolinos anticiclónicos jóvenes como, por ejemplo, Poseidón, muestran un mayor contenido en oxígeno disuelto en la sub-superficie que se pueden extender desde los 100m hasta los 400m de profundidad (figuras 10a y b). Sin embargo, remolinos maduros muestran anomalías positivas de $[O_2]$ más reducidas y contenidas en los primeros 200m de profundidad (figuras 10c y d). La erosión de la anomalía positiva de altas $[O_2]$ en RCL se observa claramente en la evolución de los perfiles promedios de $[O_2]$ (figura 8) y en las secciones verticales de anomalías de $[O_2]$ de Poseidón durante 1 año de su ciclo de vida (figura 10). La ZMO es cada vez más somera y el mínimo de oxígeno es más pronunciado. En resumen, a medida que el remolino va perdiendo intensidad, las aguas sub-superficiales (~100 m) ricas en oxígeno se mezclan con aguas de los alrededores (más pobres en oxígeno) disminuyendo significativamente la $[O_2]$ en el interior de remolinos del oeste del GoM (RCL maduros).

Así mismo, los procesos biogeoquímicos como la respiración y la degradación de materia orgánica pueden ser sumideros de oxígeno disuelto durante la propagación de los RCL. La región del oeste del GoM le llaman “eddy graveyard” (Biggs, 1992) que es donde los remolinos liberados por la CL interactúan con la topografía, con otros remolinos y se disipan (Vukovich et al., 1979; Vukovich y Crissman, 1986; Vukovich y Hamilton, 1989). Aunque recientes cálculos de la evolución temporal del contenido de calor y sal en RCL sugieren que 2/3 del decaimiento de los RCL sucede antes de alcanzar la región del “eddy graveyard” (Meunier et al., 2020), al final de la vida de los RCL las isopícnas ascienden debido a un bombeo de remolino positivo por decaimiento (Klein y Lapeyre, 2009).

Existen diferentes fuentes de variabilidad de la distribución vertical promedio de la $[O_2]$ en remolinos de mesoescala del GoM: (i) remolinos intratermoclinos, (ii) evidencia del Agua del Mar de Sargazo de 18°C (18SSW), y (iii) *layering*/subducción. De acuerdo con Meunier et al. (2018), dentro de los remolinos anticiclónicos de la CL se encuentran remolinos intratermoclinos submesoescalares que, presumiblemente, exportan altas concentraciones de oxígeno disuelto hacia la termoclina. Estos remolinos son parcelas de agua relativamente enriquecidas en oxígeno dentro de la ZMO. Por otro lado, el 18SSW se caracteriza por un máximo de oxígeno de 3.5 ml l^{-1} (Jochens et al., 2005; Portela et al., 2018) típicamente encontrado en aguas de la CL en el este del GoM. Morrison et al. (1983) encontraron este máximo de oxígeno disuelto, el cual parece erosionarse a medida que las aguas se mezclan en el Golfo occidental. Finalmente, en misiones donde se cruzó un RCL intenso (joven) se observaron filamentos ricos en $[O_2]$ que se extienden hasta casi 200m de profundidad. El origen de estas capas es incierto. Un posible mecanismo puede ser la formación de capas compensadas termohalinamente en la periferia de los remolinos o *layering*. Meunier et al. (2019) encuentran capas de temperatura y salinidad de larga escala horizontal ($>100 \text{ km}$) y baja escala vertical (2-60 m) en las zonas de alto corte vertical del remolino Poseidón, i.e., en la periferia. Esas capas son formadas por la diferencia de velocidad a diferentes niveles verticales (corte vertical), que provoca el estiramiento diferencial de las anomalías de temperatura y salinidad de la periferia del remolino a lo largo de las líneas de función de corriente. Las capas ricas en $[O_2]$ en las periferias de Poseidón coinciden con las regiones donde se observaron las capas submesoescalares de temperatura y salinidad. Otra posibilidad es la subducción de aguas ricas en oxígeno en la periferia de los remolinos (Omand et al., 2015). Observaciones con glider y simulaciones numéricas de alta resolución muestran subducción de carbono orgánico en la periferia de los remolinos incrementado la eficiencia de la bomba biológica al hundir carbono orgánico disuelto y partículas que no precipitarían de otra forma.

La subducción está asociada a procesos de frontogénesis en la periferia de los remolinos que provoca el hundimiento de filamentos ricos en carbono orgánico particulado con escalas de 1-10km en el lado denso del remolino.

Los remolinos ciclónicos muestreados en el oeste del GoM durante las misiones de glider son remolinos formados localmente y también remolinos ciclónicos locales fusionados con otros remolinos ciclónicos procedentes del sistema de la CL, i.e. los LCFE. Los LCFE son generalmente más pequeños que los RCL y se congregan alrededor de la Corriente de Lazo (Paluszkiwicz et al., 1983 y Vukovich, 1986; Hamilton, 2007; Le Henaff et al., 2012; Rudnick et al., 2015; Donohue et al., 2016; Sheinbaum et al., 2016). Aun siendo remolinos ciclónicos, no todos son productivos y presentan exceso de oxígeno disuelto por fotosíntesis en la capa eufótica a comparación del ciclón de Campeche. Además de su importancia en transporte horizontal de diversas propiedades oceánicas procedentes de la zona de afloramiento costera de Campeche y Yucatán, como la SUW, también lo es en aspectos biológicos (Díaz-Flores et al., 2017). La mayor productividad en el interior de remolinos ciclónicos puede ser debida a (i) bombeo de remolino que eleva la nutriclina en el centro de ciclones (“eddy-pumping”; Klein y Lapeyre, 2009) y (ii) advección horizontal desde afloramientos costeros y vertical de nutrientes y fitoplancton (Gaube et al., 2014; Gaube y McGillicuddy Jr., 2017). En concreto, en la bahía de Campeche se observa recurrentemente la incorporación de filamentos de agua de la plataforma de Campeche y Yucatán cargados de materia orgánica y clorofila-a superficial que avanzan en espiral siguiendo un patrón de corrientes ciclónicas hacia el núcleo del remolino ciclónico de Campeche (comunicación personal E. Pallàs-Sanz). El mismo fenómeno ocurre en el remolino ciclónico del noroeste del GoM (utilizado como caso de estudio) que incorpora aguas de afloramiento de la plataforma oeste de Texas.

Salas-De-León y Monreal-Gómez (2004) estudiaron un ciclón y anticiclón sobre el Cañón de Campeche utilizando datos hidrográficos y de altura dinámica. Ellos utilizaron la variable de saturación de oxígeno disuelto como indicador para encontrar regiones de alta probabilidad de tener alta actividad biológica. Dentro del remolino anticiclónico encontraron tasas de saturación alrededor de los 80-90%, lo cual se asemeja a los valores que nosotros presentamos para los remolinos anticiclónicos de nuestro estudio (i.e. figuras 9 y 15). Similarmente a nuestros resultados, dentro del ciclón de Campeche encuentran saturación de [O₂] entre 130-150%, y concluyen que existe una mayor actividad biológica.

Capítulo 5. Conclusiones finales

En este trabajo se logró investigar los distintos factores que modulan la distribución vertical del oxígeno disuelto dentro de remolinos de mesoescala. Las conclusiones más importantes se listan a continuación:

(1) Existen dos procesos estacionales que dominan en los primeros 100-200 m de la columna de agua independientemente si estamos dentro de un remolino (cyclónico o anticiclónico) o fuera de él. El primero es la formación de un máximo subsuperficial de $[O_2]$ a finales de primavera y verano debido a efectos termodinámicos y biológicos. Temperatura y oxígeno tienen comportamientos opuestos en la capa de mezcla lo que explica la formación del máximo subsuperficial de oxígeno disuelto tras la mezcla invernal y el calentamiento de primavera/verano. En el caso del ciclón de Campeche la actividad biológica incrementó la $[O_2]$ por fotosíntesis formando máximo subsuperficial más intenso respecto los remolinos anticiclónicos que se presentan como “desiertos biológicos” en superficie y en sus núcleos. El segundo proceso estacional es la mezcla convectiva de invierno. En invierno la columna de agua presenta una concentración homogénea de oxígeno disuelto en los primeros 150-200 m de profundidad, que representa la profundidad de la base de la capa de mezcla de invierno. El máximo subsuperficial producido en primavera/verano se mezcla en esta temporada y se desvanece. Este proceso estacional ocurre en remolinos anticiclónicos y ciclónicos, con la única diferencia que la capa de mezcla de los anticiclones es más profunda que la de los ciclones.

(2) Los remolinos anticiclónicos y ciclónicos modifican la ZMO del GoM. Estadísticamente, la diferencia en $[O_2]$ dentro de ciclones y anticiclones se debe a la diferencia estructural de dichos remolinos con isopincas levantadas (hundidas) en remolinos ciclónicos (anticiclónicos). En promedio, los remolinos ciclónicos están más oxigenados que los anticiclónicos. La $[O_2]$ en el interior de remolinos es altamente dependiente de su región de generación con el subsecuente atrapamiento de aguas de dicha región y su transporte hacia el oeste del GoM. Particularmente la región con circulación ciclónica de la bahía de Campeche muestra aguas más oxigenadas que las aguas que contienen los anticiclones de la región central del GoM.

(3) Los RCL jóvenes contienen masas de agua de origen Caribeño con una mayor concentración de oxígeno disuelto, hundiendo la ZMO hasta 500m; los remolinos anticiclónicos maduros pierden intensidad y la oxigenación subsuperficial es menor en extensión y magnitud. Las anomalías de $[O_2]$ en anticiclones jóvenes puede alcanzar 1 ml l^{-1} mientras que en maduros no supera los 0.5 ml l^{-1} . Los remolinos ciclónicos elevan las isolíneas de oxígeno disuelto con bajas concentraciones y su ZMO es más somera que un remolino anticiclónico. Es por ello que los remolinos anticiclónicos jóvenes son importantes exportadores

de oxígeno disuelto a las aguas intermedias del GoM mientras que los remolinos ciclónicos son importantes en la oxigenación de aguas superficiales (0-100 m) y por debajo de la ZMO, por lo que estos últimos (en promedio) contienen mayores concentraciones de oxígeno disuelto respecto niveles de profundidad a comparación de los anticiclones.

(4) El remolino de Campeche presenta aguas sobresaturadas en superficie (>120%) lo que sugiere una mayor productividad biológica por procesos de fotosíntesis. Además de la mezcla de invierno, la descarga de ríos y lagunas cercanas a Campeche y la advección horizontal ciclónica de nutrientes y materia orgánica hacia el interior de la bahía de Campeche pueda ser otra de las probables causas de que el remolino de Campeche tenga mayores tasas de productividad en invierno-primavera (inferidas a través de la %SAT; Reid y Shulenberger, 1981), y presente mayores concentraciones de oxígeno disuelto en superficie que un remolino ciclónico típico del oeste del GoM.

(5) La variabilidad del perfil promedio de $[O_2]$ en el interior de remolinos anticiclónicos es modificada por dos procesos dinámicos: (i) remolinos intratermoclinos ricos en oxígeno insertados en la termoclina de los RCL (Meunier et al., 2018) y (ii) filamentos ricos en oxígeno que se forman en las periferias de los remolinos debido a *layering* (Meunier et al., 2019) o que subducen en la periferia de los remolinos por frontogénesis (Omand et al., 2015).

La distribución vertical de oxígeno disuelto en el GoM es compleja y presenta variabilidad espacial y temporal debida a procesos termodinámicos, de mezcla invernal, y ciertamente modulada por remolinos de mesoescala y estructuras de submesoescala (remolinos intratermoclinos y filamentos). El rol de estos procesos de modificación de la $[O_2]$ en la distribución espacial y temporal de las comunidades biológicas es un tema de estudio futuro y puede tener un gran impacto social debido a su posible efecto en las actividades pesqueras en el GoM.

Finalmente notar que es de gran importancia seguir estudiando porqué el ciclón de Campeche presenta aguas supersaturadas y mayor actividad biológica; así como la variabilidad de la ZMO en el oeste del GoM. El porcentaje de saturación de oxígeno disuelto se utilizó como indicador para determinar si el proceso termodinámico o productividad biológica producía el máximo sub-superficial de oxígeno disuelto, sin embargo, es un “proxy” y no un indicador directo para determinar inequívocamente productividad. Es de gran necesidad la realización de muestreos utilizando como factor principal la concentración de nutrientes. La mayor productividad esperada en ciclones, y específicamente en el ciclón de Campeche, favorece la transferencia de energía hacia niveles tróficos superiores lo que beneficia a las zonas pesqueras de la

región. Estas investigaciones futuras junto con los resultados presentados en esta disertación son fundamentales para definir regiones favorables para las pesquerías lo que tiene una gran repercusión socioeconómica y son una importante aportación al conocimiento de la evolución del oxígeno disuelto en ambos tipos de remolinos en el GoM.

Literatura citada

- Benson, B.B., y Krause, D. (1984). The concentration and isotopic fractionation of oxygen dissolved in fresh water and seawater in equilibrium with the atmosphere. *Limnology and Oceanography*. **29(3)**: 620-632.
- Boyer, J. N., Christian, R. R., y Stanley, D. W. (1993). Patterns of phytoplankton primary productivity in the Neuse River estuary, North Carolina, USA. *Marine Ecology Progress series*. **97(3)**: 287-297.
- Brokaw R. J., Subrahmanyam, B., Trott, C. B., y Chaineau A. (2020). Eddy surface characteristics and vertical structure in the Gulf of Mexico from satellite observations and model simulations. *Journal of Geophysical Research*. **125**.
- Candela, J., Sheinbaum, J., Ochoa, J., Badan, A., y Leben, R. (2002). The potential vorticity flux through the Yucatan Channel and the Loop Current in the Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters*. **29(22)**: 2059.
- Cervantes-Díaz, G.Y., Hernández-Ayón, J.M., Zirino, A., Herzka, S.Z., Camacho-Ibar, V., Montes, I., Sudre, J., y Delgado, J.A. (2019). A new characterization of the upper waters of the Central Gulf of Mexico based of water mass hydrographic and biochemical characteristics. *Journal Biogeosciences*.
- Chaigneau, A., Eldin, G., y Dewitte, B. (2009). Eddy activity in the four major upwelling systems from satellite altimetry (1992–2007). *Prog. Oceanography*. 117–123.
- Cisneros-Castillo, S. (2021). Observaciones de la estructura vertical del Ciclón de Campeche a partir de datos de gliders. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 56 pp.
- Cochrane, J.D. (1972). Separation of an anticyclone and subsequent developments in the Loop Current. *Contributios on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico* (L. R. A. Capurro y J. L. Reid, Eds.). **2**:91-106.
- Damien, P., Pasqueron de Fommervault, O., Sheinbaum, J., Jouanno, J., Camacho-Ibar, V. F., y Duteil, O. (2018). Partitioning of the open waters of the Gulf of Mexico based on the seasonal and interannual variability of chlorophyll concentration. *Journal of Geophysical Research*. **123**: 2592–2614.
- Díaz-Flores, M. A., Salas-De-León, D. A., y Monreal-Gómez, M. A. (2017). Origen y evolución del giro ciclónico de la Bahía de Campeche, Golfo de México. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. **52(2)**: 441-450.
- Elliott, B. A. (1982). Anticyclonic rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*. **12**: 1292-1308.

- Fratantoni, P. S., Lee, T. N., Podesta, G. P., y Muller-Karger, F. (1998). The influence of the Loop Current perturbations on the formation and evolution of Tortugas eddies in the Southern Straits of Florida. *Journal of Geophysical Research*. **103(11)**: 24759-24779.
- Garcia, H.E., y Gordon, L.I. (1992). Oxygen solubility in seawater: Better fitting equations. *Limnology and Oceanography*. **37(6)**: 1307-1312.
- Gaube, P., McGillicuddy Jr., D. J., Chelton, D. B., Behrenfeld, M. J., y Strutton, P. G. (2014). Regional variations in the influence of mesoscale eddies on near-surface chlorophyll. *Journal of Geophysical Research*. **119**: 8195-8220.
- Gaube, P., y McGillicuddy Jr., D. J. (2017). The influence of Gulf Stream eddies and meanders on near-surface chlorophyll. *Deep Sea Research Part I.- Oceanographic Research Papers*. **122**:1-16.
- Hamilton, P. (1992). Lower continental slope cyclonic eddies in the central Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*. **97(2)**: 2185-2200.
- Hamilton, P. (2007). Eddy statistics from Lagrangian drifters and hydrography for the northern Gulf of Mexico slope. *Journal of Geophysical Research*. **112**:C09002.
- Herzka, S., Herguera, J. C., Licea, A., Sheinbaum, J., Ferreira, V. (2014). Fase III para el monitoreo ambiental en aguas profundas del Golfo de México en respuesta al derrame petrolero asociado a la plataforma DeepWater Horizon. SEMARNAT.
- Jochens, A., Bender, L., DiMarco, S., Morse, J., Kennicutt, M., Howard, M., y Nowlin, W. D. (2005). Understanding the Processes that Maintain the Oxygen Levels in the Deep Gulf of Mexico. Synthesis Report. U. S. Department of the Interior. Minerals Management Service Gulf of Mexico OCS Region. 120p
- Klein, P., y Lapeyre, G. (2009). The oceanic vertical pump induced by mesoscale and submesoscale turbulence. *Annual Review of Marine Sciences*. **1**:351-375.
- McDougall, T.J., y Barker, M. (2011). Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox. 28pp.
- Meunier, T., Tenreiro, M., Pallàs-Sanz, E., Ochoa, J., Ruiz-Angulo, A., Portela, E., Cusí, S., Damien, P., y Carton, X. (2018). Intrathermocline eddies embedded within an anticyclonic vortex ring. *Geophysical Research Letters*. **45**: 7624-7633.
- Meunier, T., Pallàs-Sanz, E., Tenreiro, M., Ochoa, J., Ruiz-Angulo, A., y Buckingham, C. (2019). Observations of Layering under a Warm-Core Ring in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*. **49(12)**: 3145-3162.
- Meunier, T., Sheinbaum, J., Pallàs-Sanz, E., Tenreiro, M., Ochoa, J., Ruiz-Angulo, A., Carton, X., y de Marez, C. (2020). Heat content anomaly and decay of Warm-Core rings: the case of the Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters*.

- Millero, F. J. (2013). *Chemical Oceanography*. Cuarta edición. CRC Press Inc. Boca Raton, Florida. 571 pp.
- Morrison J. M., y Nowlin, W. D. (1977). Repeated nutrient, oxygen, and density sections through the Loop Current. *Journal Marine Research*. **35(1)**: 105-128.
- Morrison J. M., Merrell Jr., W. J., Key, R. M., y Key, T. C. (1983). Property distributions and deep chemicals measurements within the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*. **88(4)**: 2601-2608.
- Oey, L. Y., Lee, H. C. y Schmitz Jr., W. (2003). Effects of winds and Caribbean eddies on the frequency of Loop Current eddy shedding: A numerical model study. *Journal of Geophysical Research*. **108**: 3324.
- Omand, M. M., D'Asaro, E. A., Lee, C. M., Perry, M. J., Briggs, N., Cetinic, I., y Mahadevan, A. (2015). *Science*. **348(6231)**: 222-225.
- Paluszkiwicz, T., Atkinson, L. P., Posmentier, E. S., y McClain, C. R. (1983). Observations of a Loop Current frontal eddy intrusion onto the West Florida Shelf. *Journal of Geophysical Research*. **88(14)**: 9639-9651.
- Pasqueron de Fommervault, O., Pérez-Brunius, P., Damien, P., y Sheinbaum, J. (2017). Temporal variability of chlorophyll distribution in the Gulf of Mexico: bio-optical data from profiling boats. *Biogeosciences*.
- Portela, E., Tenreiro, M., Pallàs-Sanz, E., Meunier, T., Ruiz-Angulo, A., Sosa-Gutiérrez, R., y Cusí, S. (2018). Hydrography of the Central and Western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*. **123**: 5134–5149.
- Reid, J., y Shulenberger, E. (1981). The Pacific shallow oxygen maximum, deep chlorophyll maximum, and primary production, reconsidered. *Deep-Sea Research*. **28(9)**: 901-919.
- Salas-de-León, D. A., y Monreal-Gómez, M. A. (2004). Anticyclonic-cyclonic eddies and their impact on near-surface chlorophyll stocks and oxygen supersaturation over the Campeche Canyon, Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*. **109**:C05012.
- Sarma, V. V. S. S., Jagadeesan, L., Dalabehera, H. B., Rao, D. N., Kumar, G. S., Durgadevi, D. S., Yadav, K., Behera, S., y Priya, M. M. R. (2018). Role of eddies on intensity of oxygen minimum zone in the Bay of Bengal. *Continental Shelf Research*. **168**:48-53.
- Sheinbaum, J., Candela, J., Badan, A., y Ochoa, J. (2002). Flow structure and transport in the Yucatan Channel. *Geophysical Research Letters*. **29(3)**: 1–6
- Sosa-Gutiérrez, E. R. (2020). Erosión del máximo salino sub-superficial de los remolinos anticiclónicos de la Corriente de Lazo en base a simulaciones numéricas y datos obtenidos a partir de planeadores submarinos. Tesis de Doctorado en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 61 pp.

- Sturges, W., y Leben, R. (2000). Frequency of ring separations from the Loop Current in the Gulf of Mexico: A revised estimate. *Journal of Physical Oceanography*. **30**: 1814-1819.
- Vidal, V. M., Vidal, F. V., Hernández, A. F., Meza, E., y Zambrano, L. (1994). Winter water mass distributions in the Western Gulf of Mexico affected by a colliding anticyclonic ring. *Journal of Oceanography*. **50**: 559-588.
- Vukovich, F. M., Crissman, B. W., Bushnell, M., y King, W. J. (1979). Some aspects of the oceanography of the Gulf of Mexico using satellite and in situ data. *Journal of Geophysical Research*. **84(12)**: 7749-7768.
- Vukovich, F. M., y Maul, G. A. (1985). Cyclonic eddies in the Eastern Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*. **15(1)**: 105-117.
- Vukovich, F. M. y Crissman, B. W. (1986). Aspects of warm rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*. **91(2)**: 2645-2660.
- Vukovich, F. M. y Hamilton, P. (1989). New atlas of front locations in the Gulf of Mexico. In. Proc. 10th Annual Gulf of Mexico Information Transfer Meeting. OCS study. Miner. Manag. Serv. US Dep. Of the Interior. New Orleans, La. USA. 169-168.
- Zarokanellos, N. D., y Jones, B. H. (2018). Winter mixing, mesoscale eddies and eastern boundary current: Engines for biogeochemical variability of the central Red Sea during winter/early spring period. *Biogeosciences*.
- Zavala-Hidalgo, J., Morey, S. L., y O'Brien, J. J. (2003). Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *Journal of Geophysical Research*. **108(12)**: 3389.