

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS

**CONTROLES DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS NUTRIENTES INORGÁNICOS
DISUELTOS EN LAS ZONAS DE PERDIDO Y COATZACOALCOS, GOLFO
DE MÉXICO**

T E S I S

**QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE**

MAESTRA EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA

PRESENTA

JENNIFER LARISSA SMITH SAIZA

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO. ENERO DE 2023

Resumen

La disponibilidad de los nutrientes, incluyendo el nitrato (NO_3), el fosfato (PO_4^{3-}), y el ácido silícico (H_4SiO_4), controla la producción primaria de los océanos y, por lo tanto, desempeña un papel clave en la conformación de las redes tróficas marinas y determina la capacidad del océano para secuestrar dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera. El objetivo de este estudio fue evaluar el papel que juegan los remolinos de mesoescala y las masas de agua en la distribución vertical del nitrato + nitrito (NN), el PO_4^{3-} , y el H_4SiO_4 , en las regiones de Perdido y Coatzacoalcos, localizadas al suroeste del Golfo de México. Se analizaron los nutrientes en muestras discretas recolectadas en los primeros 500 m de la columna de agua durante tres campañas oceanográficas denominadas Malla Fina (MF), realizadas en marzo de 2016 (campaña MF1), septiembre-octubre de 2016 (campaña MF2) y mayo-junio de 2018 (campaña MF3). Para la identificación de las masas de agua y de la influencia de los remolinos de mesoescala en cada estación de muestreo se analizaron datos de temperatura conservativa (CT), salinidad absoluta (S_A) y oxígeno disuelto obtenidos con un CTD. Las estaciones se clasificaron como estaciones bajo influencia ciclónica (CE), anticiclónica (AE) o sin influencia de remolinos (NE) a partir de imágenes satelitales de la altura del nivel del mar (incluyendo las corrientes geostróficas) y la profundidad de la isoterma de 20 °C. Para cada grupo de estaciones se obtuvieron los perfiles promedio y también se calculó la concentración integrada de NN, PO_4^{3-} y H_4SiO_4 en la capa eufótica.

Las masas de agua presentes en las dos regiones durante campañas son el remanente del Agua Superficial del Caribe (CSWr), el Agua Común del Golfo (GCW) y el Agua Central del Atlántico Tropical (TACW). El perfil promedio, representado con diagramas de cajas y bigotes, en el que se incluyen los datos de ambas regiones y las tres campañas, indica que las concentraciones de NN y PO_4^{3-} en los primeros 50 m de profundidad son permanentemente bajas y se encuentran cercanas al límite de detección, con una mediana por debajo de $0.10 \mu\text{mol kg}^{-1}$ y $0.04 \mu\text{mol kg}^{-1}$, respectivamente; en contraste, el H_4SiO_4 presenta valores relativamente altos en los primeros 10 m, con una mediana de $2.4 \mu\text{mol kg}^{-1}$. En el máximo de fluorescencia (correspondiente al máximo profundo de clorofila), que se localiza entre 50 y 90 m, la media de concentraciones es $0.03 \mu\text{mol kg}^{-1}$ para PO_4^{3-} y $0.7 \mu\text{mol kg}^{-1}$ para NN, en tanto que el H_4SiO_4 presenta concentraciones menores que en la superficie ($1.79 \mu\text{mol kg}^{-1}$). La mayor variabilidad en las concentraciones de nutrientes en los perfiles promedio se encuentra en las muestras recolectadas entre 90 y 150 m, intervalo de profundidad donde se ubica la parte superior de la nutriclina que es intensamente afectada por los remolinos de mesoescala. A su vez, la concentración en las muestras recolectadas en el mínimo de O_2 , correspondiente al núcleo del TACW, presenta menor variabilidad ya que estas se recolectaron en una misma isopícnica ($\sim 27.1 \text{ kg m}^{-3}$), lo que minimiza el efecto de remolinos de mesoescala; la mediana para PO_4^{3-} , NN y H_4SiO_4 es de 1.6, 26 y $13 \mu\text{mol kg}^{-1}$, respectivamente. A 500 m

se presentan las concentraciones más altas para los tres nutrientes, aunque los valores no alcanzan los valores máximos reportados para el GdM, que en el caso de NN y PO_4^{3-} suele observarse entre 600 y 800 m.

No se observa una tendencia regional ni temporal en la distribución/concentración de nutrientes en el sureste del GdM ya que la principal fuente de variabilidad son las estructuras de mesoescala. La presencia de dichas estructuras induce un fuerte contraste en la disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica, observándose en las tres campañas un stock mayor en las aguas CE (mediana de NN = 168 mmol m^{-2}) en comparación con las aguas NE (mediana = 44 mmol m^{-2}) y notoriamente en contraste con estaciones AE (mediana = 8 mmol m^{-2}). A diferencia de estudios previos en el GdM, en este estudio se observaron perfiles “anómalos” de nutrientes, es decir, los perfiles aparentemente no correspondían al tipo de remolino presente durante el muestreo. La interpretación del efecto de los remolinos de mesoescala en la distribución vertical de los nutrientes en el GdM requiere no solo conocer el tipo de remolino en el que se realizó el muestreo, sino también de la historia (etapa del ciclo de vida) del remolino.

Palabras claves

Golfo de México, Perdido, Coatzacoalcos, Nutrientes inorgánicos disueltos, Remolinos de mesoescala, Masas de agua.

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA

CONTROLES DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS NUTRIENTES
INORGÁNICOS DISUELTOS EN LAS ZONAS DE PERDIDO Y
COATZACOALCOS, GOLFO DE MÉXICO

TESIS


QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA

JENNIFER LARISSA SMITH SAIZA


Aprobada por:



Dr. Víctor Froylán Camacho Ibar
Director de Tesis



Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa
Sinodal



Dr. Guillermo Alberto Samperio Ramos
Sinodal

Asunto: Voto aprobatorio sobre trabajo
de tesis de grado de Maestría

Dra. Ivone Giffard Mena
Coordinadora de Investigación y
Posgrado, F.C.M.
Presente

Estimada Dra. Giffard:

Me dirijo a usted en mi calidad de **Director de tesis** encargado de revisar la tesis de Maestría presentada por la estudiante **Jennifer Larissa Smith Saiza** como parte de los requisitos para obtener el grado de **Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera**.

Tras llevar a cabo una revisión minuciosa y exhaustiva del trabajo mencionado, es mi deber informarle que he emitido mi **Voto Aprobatorio** sobre la tesis titulada:


CONTROLES DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS NUTRIENTES INORGÁNICOS DISUELTOS EN LAS ZONAS DE PERDIDO Y COATZACOALCOS, GOLFO DE MÉXICO

He realizado esta revisión con el compromiso de asegurar que el trabajo cumple con los estándares de calidad y excelencia académica requeridos por nuestro programa de posgrado. Después de un análisis detenido, he llegado a la conclusión de que el trabajo de tesis satisface plenamente estos criterios y representa una contribución valiosa al campo de la Oceanografía Costera.

El trabajo exhibe una sólida base teórica, una metodología rigurosa y una presentación coherente de los hallazgos. Las referencias bibliográficas están actualizadas y pertinentes, y las figuras y tablas son claras y respaldan eficazmente los argumentos del texto. La sección de conclusiones proporciona un resumen sólido de los resultados y sus implicaciones, las referencias y citas están actualizadas y son pertinentes.

Ensenada, B. C., a 12 de enero de 2024

Atentamente,



Dr. Victor Froylan Camacho Ibar
Director de tesis

c.c.p. Expediente

Asunto: Voto aprobatorio sobre trabajo
de tesis de grado de Maestría

Dra. Ivone Giffard Mena
Coordinadora de Investigación y
Posgrado, F.C.M.
Presente

Estimada Dra. Giffard:

Me dirijo a usted en mi calidad de **Sinodal** encargado de revisar la tesis de Maestría presentada por la estudiante **Jennifer Larissa Smith Saiza** como parte de los requisitos para obtener el grado de **Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera**.

Tras llevar a cabo una revisión minuciosa y exhaustiva del trabajo mencionado, es mi deber informarle que he emitido mi **Voto Aprobatorio** sobre la tesis titulada:

CONTROLES DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS NUTRIENTES INORGANICOS DISUELTOS EN LAS ZONAS DE PERDIDO Y COATZACOALCOS, GOLFO DE MEXICO

He realizado esta revisión con el compromiso de asegurar que el trabajo cumple con los estándares de calidad y excelencia académica requeridos por nuestro programa de posgrado. Después de un análisis detenido, he llegado a la conclusión de que el trabajo de tesis satisface plenamente estos criterios y representa una contribución valiosa al campo de la Oceanografía Costera.

El trabajo exhibe una sólida base teórica, una metodología rigurosa y una presentación coherente de los hallazgos. Las referencias bibliográficas están actualizadas y pertinentes, y las figuras y tablas son claras y respaldan eficazmente los argumentos del texto. La sección de conclusiones proporciona un resumen sólido de los resultados y sus implicaciones, la referencias y citas están actualizadas y son pertinentes.

Ensenada, B. C., a 12 de enero de 2024

Atentamente,



Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa
Sinodal

c.c.p. Expediente

Asunto: Voto aprobatorio sobre trabajo
de tesis de grado de Maestría

Dra. Ivone Giffard Mena
Coordinadora de Investigación y
Posgrado, F.C.M.
Presente

Estimada Dra. Giffard:

Me dirijo a usted en mi calidad de **Sinodal** encargado de revisar la tesis de Maestría presentada por la estudiante **Jennifer Larissa Smith Saiza** como parte de los requisitos para obtener el grado de **Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera**.

Tras llevar a cabo una revisión minuciosa y exhaustiva del trabajo mencionado, es mi deber informarle que he emitido mi **Voto Aprobatorio** sobre la tesis titulada:


CONTROLES DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS NUTRIENTES INORGÁNICOS DISUELTOS EN LAS ZONAS DE PERDIDO Y COATZACOALCOS, GOLFO DE MÉXICO

He realizado esta revisión con el compromiso de asegurar que el trabajo cumple con los estándares de calidad y excelencia académica requeridos por nuestro programa de posgrado. Después de un análisis detenido, he llegado a la conclusión de que el trabajo de tesis satisface plenamente estos criterios y representa una contribución valiosa al campo de la Oceanografía Costera.

El trabajo exhibe una sólida base teórica, una metodología rigurosa y una presentación coherente de los hallazgos. Las referencias bibliográficas están actualizadas y pertinentes, y las figuras y tablas son claras y respaldan eficazmente los argumentos del texto. La sección de conclusiones proporciona un resumen sólido de los resultados y sus implicaciones, la referencias y citas están actualizadas y son pertinentes.

Ensenada, B. C., a 12 de enero de 2024

Atentamente,



Dr. Guillermo Alberto Samperio Ramos
Sinodal

c.c.p. Expediente

Agradecimientos

A mis padres: Leticia Isabel Saiza y Eduardo Smith Guerra por su amor, confianza y apoyo.

A mi director de tesis el Dr. Víctor F. Camacho Ibar por su tiempo, conocimiento y paciencia.

A mis sinodales Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa y Dr. Guillermo Alberto Samperio Ramos por sus consejos y comentarios sobre mi trabajo.

A la Dra. Anaí Novoa, a la Dra. María Del Carmen Ávila López y a la Dra. Karina Del Carmen Lugo Ibarra por inspirarme y motivarme a cumplir mis sueños.

A Joaquín Torres Vazquez y Santiago Gonzáles Medinilla por su apoyo y enseñanzas de vida.

A mi hermana Sheridan Leticia Smith Saiza porque siempre ha sido un gran ejemplo a seguir.

A mis primas: Alejandra, Brianda, Claudia, Jacqueline y Samantha por su compañía y cariño.

A C.R.I. por el gran amor que siento por mí misma.

A cada persona con quien coincidí, que fueron y siguen siendo mis maestros en este camino.

Al CONACyT por el apoyo económico otorgado durante el posgrado.

Al Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM) que realizó el proyecto.

Índice

1. Introducción	1
2. Hipótesis	6
3. Objetivos	6
3.1 Objetivo general	6
3.2 Objetivos específicos.....	7
4. Área de estudio	7
5. Metodología	9
5.1 Colecta de muestras	9
5.2 Análisis de muestras	9
5.3 Clasificación de estaciones	10
5.4 Cálculo de la concentración integrada.....	11
6. Resultados	12
6.1 Identificación de las masas de agua presentes en el occidente del Golfo de México durante las campañas Malla Fina.....	12
6.2 Clasificación de las estaciones con base en la influencia de los remolinos de mesoescala.....	17
6.3 Concentración de los nutrientes en Perdido y Coatzacoalcos durante las tres campañas Malla Fina	23
6.4 Perfiles promedio de los remolinos de mesoescala en las regiones de Perdido y Coatzacoalcos, Golfo de México	28
6.5 Diagramas de cajas y bigotes de la concentración integrada de fosfato, NN y H ₄ SiO ₄ y su relación con los remolinos de mesoescala	36
7. Discusiones	40
7.1 Caracterización biogeoquímica de las masas de agua	41
7.2 Clasificación de las estaciones por remolinos de mesoescala.....	42
7.3 Perfiles promedio de NN, PO ₄ ³⁻ y H ₄ SiO ₄	44
7.4 Efecto de los remolinos de mesoescala en la concentración integrada de NN, PO ₄ ³⁻ y H ₄ SiO ₄	49
7.4.1 Concentración integrada de nutrientes entre 10 y 100 m	49
7.4.2 Concentración integrada de nutrientes en los remolinos biogeoquímicamente anómalos.....	55
8. Conclusiones	59
Referencias	62

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de estaciones por efecto de remolinos de mesoescala; CE remolinos ciclónicos, AE remolinos anticiclónicos y NE agua sin efecto de remolinos.	23
---	-----------

Índice de figuras

Figura 1. Localización de las estaciones que se muestrearon en la región occidental del Golfo de México para las tres campañas Malla Fina.	8
Figura 2. Diagramas de temperatura conservativa (Θ), salinidad absoluta (S_A) y oxígeno (O_2) de las masas de agua presentes en las regiones de Perdido (a) y Coatzacoalcos (b), Golfo de México. Se utilizaron las tres campañas Malla Fina (marzo 2016, septiembre 2016 y junio 2018). La línea negra punteada muestra los intervalos de la clasificación de Portela et al. (2018), y la línea rosa continua denota los intervalos propuestos en la clasificación de Cervantes-Díaz et al. (2021).	13
Figura 3. Diagramas de temperatura conservativa (Θ), salinidad absoluta (S_A) y oxígeno (O_2) de las masas de agua presentes en las zonas de Perdido (a, b y c) y Coatzacoalcos (d, e y f), Golfo de México para las tres campañas Malla Fina (marzo 2016, septiembre 2016 y junio 2018, respectivamente).	15
Figura 4. Anomalía del nivel del mar (SLA, cm) para las tres campañas Malla Fina; marzo (a), septiembre-octubre (b) y mayo-junio (c) en las regiones de Perdido y Coatzacoalcos, Golfo de México. Imágenes satelitales proporcionada por el Dr. Jorge A. Velásquez Aristizábal.	19
Figura 5. La profundidad de la isoterma de 14° y 20 °C para las tres campañas Malla Fina; marzo (MF1), septiembre-octubre (MF2) y mayo-junio (MF3) en las regiones de Perdido y Coatzacoalcos, Golfo de México.	20
Figura 6. Diagramas de cajas y bigotes de PO_4^{3-} , NN y H_4SiO_4 para las tres campañas Malla Fina en la región de Perdido, Golfo de México.	25
Figura 7. Diagramas de cajas y bigotes de PO_4^{3-} , NN y H_4SiO_4 para las tres campañas Malla Fina en la región de Coatzacoalcos, Golfo de México.	26
Figura 8. Diagramas de cajas y bigotes de PO_4^{3-} , NN y H_4SiO_4 durante las tres campañas Malla Fina en las regiones de Perdido y Coatzacoalcos, Golfo de México.	28
Figura 9. Perfiles promedio de las estaciones que se encuentran en los CE presentes en el occidente del Golfo de México de (a) PO_4^{3-} , (b) NN, (c) H_4SiO_4	30
Figura 10. Perfiles promedio de las estaciones que se encuentran en los AE presentes en el occidente del Golfo de México de (a) PO_4^{3-} , (b) NN, (c) H_4SiO_4	31
Figura 11. Perfiles promedio de las estaciones que se encuentran en las aguas sin influencia de remolinos en el occidente del Golfo de México de (a) PO_4^{3-} , (b) NN, (c) H_4SiO_4	33
Figura 12. Perfiles promedio de las estaciones que se encuentran en los remolinos C4 y A3 presentes en el occidente del Golfo de México de (a) PO_4^{3-} , (b) NN, (c) H_4SiO_4	34
Figura 13. Perfiles promedio de los remolinos de mesoescala presentes en el occidente del Golfo de México; (a) PO_4^{3-} , (b) NN, (c) H_4SiO_4	36

Figura 14. Concentración integrada de PO_4^{3-} (mmol m^{-2}), NN (mmol m^{-2}) y H_4SiO_4 (mmol m^{-2}) en tres intervalos de profundidad (10-50, 10-100 y 10-150 m).....	38
Figura 15. Concentración integrada de PO_4^{3-} , NN y H_4SiO_4 entre 10 y 100 m (mmol m^{-2}) de perfiles interpolados con el método PCHIP. Las barras azul, verde y naranja corresponden a los ciclones (CE), no remolinos (NE) y anticiclones (AE), respectivamente. En el eje Y de lado derecho la profundidad del máximo de fluorescencia (puntos verdes).....	39
Figura 16. Relación entre la concentración integrada de NN (10-100 m) y (a) la profundidad de la isoterma de 20 °C y (b) la profundidad del máximo de fluorescencia para las campañas Malla Fina. Los puntos rojos no se consideraron para el cálculo de la ecuación de regresión y el valor R^2	49

1. Introducción

Los nutrientes son importantes para la productividad en el océano, su absorción por el fitoplancton y exportación impulsan sus ciclos biogeoquímicos y determinan la cantidad de carbono que se transporta por la columna de agua hasta el océano profundo (Turner 2015). Los principales nutrientes que limitan el crecimiento del fitoplancton son el nitrógeno (N), fósforo (P), hierro (Fe) y silicio (Si) (Bristow et al. 2017). En el océano abierto, el crecimiento del fitoplancton se apoya principalmente del reciclaje de nutrientes en aguas más profundas y produce su biomasa con una relación estequiométrica C: N: P de alrededor de 106: 16: 1, conocida como la relación de Redfield (Redfield 1958). También el fitoplancton forma la base de la red alimentaria marina y es responsable de aproximadamente la mitad de la fijación global de dióxido de carbono (CO₂) (Field et al. 1998).

El Golfo de México (GdM) es una cuenca oceánica semicerrada y está influenciado por las Corrientes de Frontera occidentales de los grandes giros del Océano Atlántico Norte (Schmitz & McCartney 1993; Müller-Karger et al. 2015; Rudnick et al. 2015). Las Corrientes del Caribe y Yucatán importan masas de agua con diferentes propiedades físicas y biogeoquímicas a través del Canal de Yucatán mediante la Circulación Meridional del Atlántico (Candela et al. 2019; Portela et al. 2018; Valencia-Gasti et al. 2022). El agua del Mar Caribe ingresa al interior del GdM por la Corriente de Lazo (LC) y es transportada a la región oriental del GdM por remolinos anticiclónicos (AE) que tienen ~ 200 – 300

km de diámetro. Estos remolinos de la LC (LCE) se desprenden de esta corriente cada 4 a 18 meses (Sturges y Leben 2000), siendo más frecuente que se produzca esta liberación durante el verano e invierno (Chang y Oey. 2012). Las concentraciones de nitrato, PO_4^{3-} y otros nutrientes esenciales en las aguas superficiales de LC suelen encontrarse por debajo del límite de detección analítica ($<0,05 \mu\text{M}$; Biggs y Ressler 2001; Lee-Sánchez et al. 2022), y se consideran oligotróficas dado su aislamiento de las aguas eutróficas de la costa y plataforma continental (Biggs y Ressler 2001; Heileman y Rabalais, 2009; Damien et al. 2018; Martínez-López y Zavala-Hidalgo 2009).

A medida que los anticiclones se acercan a la plataforma continental, en el oeste del Golfo, se producen interacciones con la topografía de la cuenca (i.e., pendiente del talud continental) y con otros remolinos preexistentes, incluidos restos de LCE más antiguos. A lo largo del límite occidental se pueden generar pares de ciclón-anticiclón y en ocasiones algunos remolinos anticiclónicos quedan atrapados entre remolinos ciclónicos (CE) (Vidal et al. 1982; Vidal et al. 1994). Por ejemplo, Biggs et al. (1996) observaron la interacción de un CE en el oeste del Golfo, que resultó en la división de un anticiclón en dos partes. Además, los LCE presentes en la cuenca se pueden encontrar en diferentes etapas de vida ya sea intensificación, maduración o disipación (Velásquez-Aristizábal et al. 2022). Una vez que los LCE alcanzan la plataforma occidental del GdM y se desintegran (Hamilton et al. 1999), se genera una modificación del agua dentro del GdM (Vidal et al. 1994) entre la superficie y

~1000 m de profundidad (Herring 2010). Por otro lado, se ha demostrado la existencia de ciclones en la cuenca central y al noroeste del Golfo que no están directamente relacionados con los remolinos de LC (Hamilton et al. 1992). Además, una estructura ciclónica se desarrolla recurrentemente en la Bahía de Campeche en la región sur del GdM (Pérez-Brunius et al. 2013).

El levantamiento y la profundización de las isopícnas en CE y AE, respectivamente, modifican la distribución vertical de los nutrientes inorgánicos dentro de la columna de agua (McGillicuddy y Robinson 1997; Huang y Xu 2018; Sarma et al. 2018; Hernández-Hernández et al. 2020; Chen et al. 2021), afectando la productividad primaria y la estructura de la comunidad de fitoplancton (Benitez-Nelson y McGillicuddy 2008; Williams et al. 2015; McGillicuddy 2016). Por lo tanto, la presencia de remolinos ciclónicos y anticiclónicos en el GdM genera variabilidad física y biogeoquímica dentro de la columna de agua (Jouanno et al. 2016).

En los estudios realizados por Biggs (1992) y Biggs y Müller-Karger (1994) se evaluaron los primeros 150 m de la columna de agua en la región occidental del GdM. Ambos estudios mostraron que las aguas de un LCE estaban agotadas en nitrato ($< 0.1 \mu\text{mol kg}^{-1}$), en comparación con las aguas que se encuentran en las periferias de estos remolinos. También estudiaron pares de CE y AE y observaron que las concentraciones de nitrato en los CE a 100 m de profundidad excedían los $11 \mu\text{mol kg}^{-1}$, mientras que en AE observaron concentraciones de nitrato más

bajas ($< 0.7 \mu\text{mol kg}^{-1}$) y en ocasiones indetectables a dicha profundidad (Biggs, 1992; Biggs y Müller-Karger 1994).

En el Golfo de México, se han encontrado grandes diferencias en las concentraciones de NN en la zona eufótica superior entre las estaciones que se encuentran bajo influencia de remolinos ciclónicos y anticiclónicos. En la profundidad del máximo fluorescencia (~ 50 a 100 m), la concentración de NN se encuentra cercana al límite de detección, y la profundidad de la nitraclina limita la distribución vertical y las entradas de NN a la zona eufótica (Pasqueron de Fommervault et al. 2017). En la base de la zona eufótica y la zona mesopelágica superior (~ 100 a 200 m) la actividad de la comunidad microbiana heterotrófica es particularmente intensa, dando lugar a una intensa regeneración de nutrientes por la respiración de la materia orgánica (Biddanda y Benner 1997). Lee et al. (2022) reportaron recientemente una concentración media de NN entre 0 y 50 m de $\sim 0.03 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (cercana al límite de detección, independientemente de la presencia o ausencia de remolinos), y la profundidad de la nitraclina ($0.5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de NN) se localizó cercana a la isopicna $\sigma_0 \sim 25,0 \text{ kg m}^{-3}$. También se observó que en el núcleo de los LCE recién desprendidos, la nitraclina puede alcanzar los 150 m alrededor de la isopicna de $\sim 24,1 \text{ kg m}^{-3}$, y a medida que los LCE se desplazan hacia el oeste del golfo, la profundidad de la nitraclina disminuye, pudiendo observarse hasta ~ 97 m en los núcleos de LCE cercanos al talud continental. También se ha demostrado que en el GdM los remolinos de mesoescala modulan el stock de nitrógeno inorgánico en los primeros 200 m,

observándose fuertes contrastes en dicho stock entre CE y AE (Lee-Sánchez et al. 2022; Velásquez-Aristizábal et al. 2022).

La región sur del GdM recibe importantes portes de agua dulce por los escurrimientos del río Coatzacoalcos y del sistema Grijalva-Usumacinta, generalmente entre verano y otoño. Esta agua dulce se extiende más allá de la plataforma continental, debido a los transportes producidos por las corrientes perpendiculares a la costa. Esta circulación resulta de gran importancia pues se transportan aguas ricas en nutrientes que favorecen el crecimiento del fitoplancton y el transporte de aguas más productivas hacia el interior de la cuenca (Linacre et al. 2021).

El presente estudio se realizó en el marco del proyecto denominado “Implementación de redes de observación oceanográficas (físicas, geoquímicas y ecológicas) con el fin de generar escenarios ante posibles contingencias relacionadas a la exploración y producción de hidrocarburos en las aguas profundas del Golfo de México”. El proyecto fue financiado por el Fondo SENER-Hidrocarburos a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), y fue realizado por el Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM). Este proyecto incluyó las campañas Malla Fina cuyo objetivo fue realizar estudios de procesos relacionados con la producción orgánica primaria en las regiones de Perdido y Coatzacoalcos en el sur del Golfo de México. Por tal motivo, las campañas incluyeron la evaluación del papel que juegan los remolinos de mesoescala en la distribución espacial y temporal de

nitrate + nitrite (NN), phosphate (PO_4^{3-}), silicic acid (H_4SiO_4). The results of this study provide valuable information for the understanding of the physical and biogeochemical processes that control the availability of nutrients and, consequently, primary production, in the euphotic zone of oligotrophic regions dominated by mesoscale eddies.

2. Hipótesis

The spatial distribution of dissolved inorganic nutrients in the first 500 m of the water column of the Perdido and Coatzacoalcos regions, in the southwest of the Gulf of Mexico (SGdM), is strongly modulated by the influence of mesoscale eddies. It is expected that stations under the influence of cyclonic eddies will have a higher nutrient content in the euphotic zone (0-150 m) compared to stations without eddy influence and stations influenced by anticyclonic structures.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluate the spatial and temporal distribution of nutrient concentrations (NN, PO_4^{3-} and H_4SiO_4) of samples obtained in three fine-mesh campaigns in the Perdido and Coatzacoalcos, Gulf of Mexico and its relationship with water masses and mesoscale eddies.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar las masas de agua presentes en la región occidental del Golfo de México.
- Comparar la disponibilidad de los nutrientes entre las tres campañas Malla Fina (marzo y septiembre-octubre, 2016, y mayo-junio, 2018).
- Clasificar las estaciones con base en la influencia de los remolinos de mesoescala.
- Explicar la distribución vertical de los nutrientes y su relación con las estructuras de mesoescala en las zonas de Perdido y Coatzacoalcos.

4. Área de estudio

Las regiones de Perdido ($\sim 25^{\circ}53'$ N a $25^{\circ}38'$ N y $94^{\circ}40'$ W a $96^{\circ}15'$ W) y Coatzacoalcos ($\sim 18^{\circ}52'$ N a $20^{\circ}44'$ N y $93^{\circ}18'$ O a $94^{\circ}45'$ O) se localizan en el occidente de la sección central y meridional del Golfo de México (Figura 1). En cada región se realizaron dos transectos perpendiculares a la costa sobre el talud continental. En Perdido la profundidad del fondo en la estación más somera (B5) fue de 565 m y la de la estación más profunda (A4) fue de ~ 3600 m. En Coatzacoalcos, localizada en la Bahía de Campeche, la profundidad del fondo en las estaciones más someras (D15 y D16) fue ~ 690 m, mientras que la más profunda (C14) fue de 3200 m seguida de C13 con 1880 m. El SGdM se caracteriza por la baja concentración de nutrientes y clorofila en aguas alejadas de la costa (Linacre et al. 2021), sin embargo, la plataforma continental recibe

aportes de nutrientes por escurrimientos desde el continente y por surgencias estacionales, haciéndolas altamente productivas (Martínez-López y Zavala-Hidalgo 2009). En la Bahía de Campeche se pueden presentar flujos de materiales (agua dulce, clorofila y nutrientes) desde la plataforma continental hacia afuera de la costa por la convergencia estacional de corrientes paralelas a la costa (Martínez-López y Zavala-Hidalgo 2009) así como por la interacción entre remolinos de mesoescala (Guerrero et al. 2020), señales que pueden ocasionalmente evidenciarse mediante diagramas T-S y por imágenes satelitales de clorofila (Linacre et al. 2021).

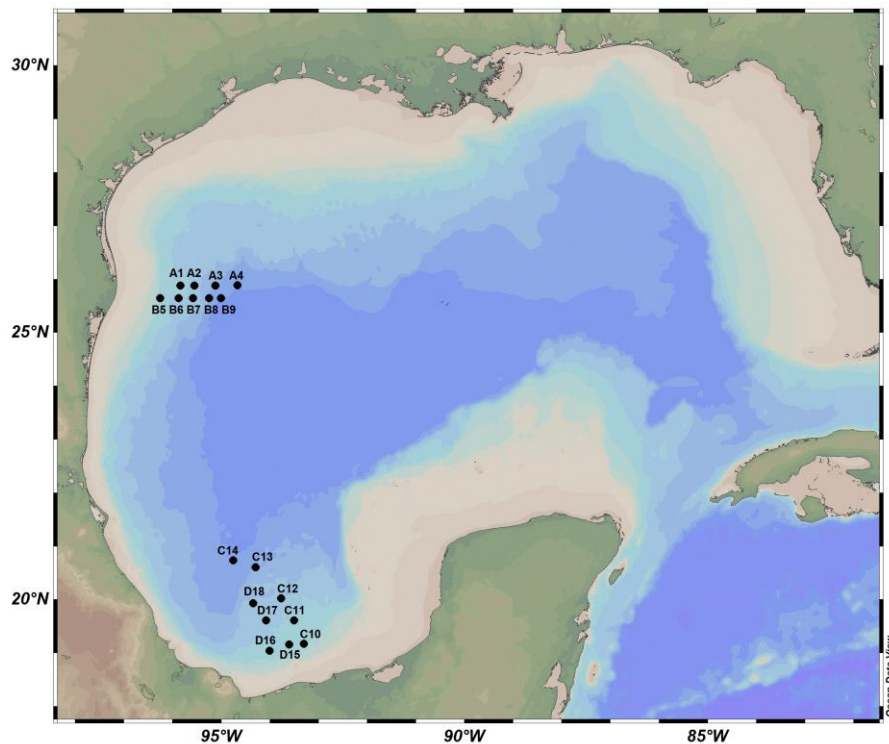


Figura 1. Localización de las estaciones que se muestrearon en la región occidental del Golfo de México para las tres campañas Malla Fina.

5. Metodología

5.1 Colecta de muestras

Los datos hidrográficos y las muestras discretas se obtuvieron a bordo del R/V Justo Sierra (Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM) durante tres campañas oceanográficas denominadas Malla Fina en las regiones de Perdido y Coatzacoalcos. Las campañas se realizaron en marzo de 2016 (campaña MF1, finales de invierno), septiembre-octubre de 2016 (campaña MF2, finales de verano), mayo-junio de 2018 (campaña MF3, primavera).

Se utilizó un CTD Seabird 9 Plus (Sea-Bird Scientific, Bellevue, EE. UU.) equipado con sensores de conductividad, temperatura, oxígeno disuelto (OD; SBE43), presión y fluorescencia (Seapoint-SCF) acoplado a una roseta equipada con doce botellas Niskin de 10 L. Se recolectaron muestras de agua de mar a 12 profundidades nominales (100 %, 50 %, 30 %, 20 %, 1 % de luz, máximo de fluorescencia, 100, 150, 200, mínimo de oxígeno disuelto y 500 m) para el análisis de nutrientes inorgánicos disueltos. Las muestras se filtraron inmediatamente con filtros GF/F previamente calcinados y se almacenaron congeladas hasta su posterior análisis en el laboratorio.

5.2 Análisis de muestras

Se realizó el análisis de los nutrientes con un analizador automatizado de flujo continuo, segmentado con burbujas, modelo AA3-HR (Seal Analytical, Fareham, Reino Unido). El análisis se basa en los protocolos recomendados por el

fabricante del equipo, los cuáles, a su vez, se basan en los métodos desarrollados por Murphy y Riley (1962), Armstrong et al. (1967) y Grasshoff et al. (1983), para fosfato (PO_4^{3-}), nitrato más nitrito ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) y ácido silícico (H_4SiO_4), respectivamente. Para el control de calidad de los análisis se siguió el Manual de Hidrografía Repetida GO-SHIP (Hydes et al. 2010), donde se describen un protocolo para determinaciones de nutrientes inorgánicos disueltos en agua de mar que sean comparables con bases de datos internacionales. Se evaluó la exactitud y precisión de las mediciones utilizando materiales de referencia con concentraciones certificadas, desarrollados por The General Environmental Technos Co., Ltd. (Kanso Technos), Japan (Aoyama y Hydes, 2010).

De las mediciones del CTD se utilizaron datos de oxígeno disuelto medidos por el sensor correspondiente, y fueron corregidos mediante una calibración utilizando el método micro-Winkler. Se obtuvo la salinidad práctica mediante un sensor de conductividad y esta se convirtió a salinidad absoluta S_A , y la temperatura *in situ* se convirtió a temperatura conservativa (Θ , °C), utilizando la ecuación termodinámica TEOS-10 para el agua de mar (Pawlowicz, 2013). Finalmente, se asignaron etiquetas de calidad a los datos y solo se utilizaron en los análisis los datos considerados de buena calidad.

5.3 Clasificación de estaciones

Los parámetros que se utilizaron para determinar si las estaciones estuvieron influenciadas por remolinos ciclónicos (CE), remolinos anticiclónicos (AE) o estuvieron sin influencia de remolinos (NE) fueron la anomalía de la altura del

nivel del mar (SLA; Bunge et al. 2002; Hamilton et al. 2018; Linacre et al. 2019; Pasqueron De Fommervault et al. 2017) y la profundidad de la isoterma de 20 °C (Velásquez-Aristizábal et al. 2022). En el caso de la SLA la clasificación de las estaciones se hizo con un análisis visual de las imágenes satelitales, que incluyeron las corrientes geostróficas, las cuales indican el sentido de rotación de los remolinos. En el caso de la profundidad de la isoterma de 20 °C, de acuerdo en la clasificación de Velásquez-Aristizábal et al. (2022), las estaciones con valores < 100 m tienen influencia de CE, 110-150 m de NE y 150-200 m en están bajo influencia de AE.

5.4 Cálculo de la concentración integrada

Las concentraciones integradas (con unidades de mmol m^{-2}) de NN, PO_4^{3-} y H_4SiO_4 se calcularon en 3 intervalos de integración: 10-50 m, correspondiente a la zona eufótica superior, 10-100 m, correspondiente a la zona eufótica superior e intermedia (50-100 m), el rango de profundidad en el que comúnmente se observan la nitraclina y el máximo profundo de clorofila (DCM) en el golfo (Biggs y Müller-Karger, 1994; Linacre et al. 2019), y 100-150 m, que incluye a la zona eufótica inferior , donde se observan porcentajes de irradiancia superficial entre 0.83% y 0.1% (Linacre et al. 2019).

6. Resultados

6.1 Identificación de las masas de agua presentes en el occidente del Golfo de México durante las campañas Malla Fina

En nuestro estudio se identificaron las masas de agua presentes en el occidente del Golfo de México utilizando la clasificación de Portela et al. (2018), donde se utilizan las variables hidrográficas para delimitar los intervalos de las masas de agua. Además, se complementó la clasificación con la identificación de Cervantes-Díaz et al. (2021), donde se amplían los intervalos y se agregan datos biogeoquímicos para definir los límites de las masas de agua presentes en la capa superior de la columna de agua en el Golfo de México.

Para identificar las masas de agua se realizó un análisis de los diagramas de temperatura conservativa vs. salinidad absoluta (Θ - S_A), incluyendo oxígeno (O_2) disuelto como variable complementaria, para cada una de las tres campañas Malla Fina (Figura 2). Fueron tres masas de agua las más dominantes en los primeros 500 m de la columna de agua en las dos zonas: el remanente del Agua Superficial del Caribe (CSWr), el Agua Común del Golfo (GCW) y el Agua Central del Atlántico Tropical (TACWn). Cabe señalar que en la campaña MF3 en la región de Coahuila se observó la señal del Agua Subtropical Subsuperficial del Atlántico Norte (NASUW).

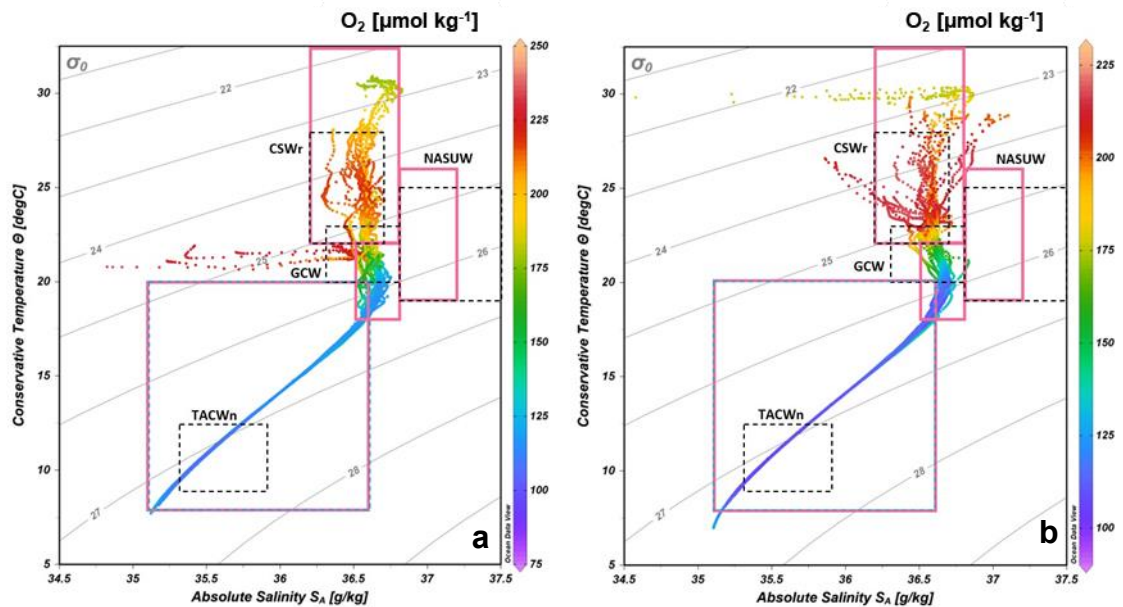


Figura 2. Diagramas de temperatura conservativa (Θ), salinidad absoluta (S_A) y oxígeno (O_2) de las masas de agua presentes en las regiones de Perdido (a) y Coatzacoalcos (b), Golfo de México. Se utilizaron las tres campañas Malla Fina (marzo 2016, septiembre 2016 y junio 2018). La línea negra punteada muestra los intervalos de la clasificación de Portela et al. (2018), y la línea rosa continua denota los intervalos propuestos en la clasificación de Cervantes-Díaz et al. (2021).

Utilizando la base de datos de las tres campañas Malla Fina se construyó un diagrama Θ - S_A de la región de Perdido (Figura 2a). Los valores más altos de Θ fueron de ~ 30 °C, y una salinidad de ~ 36.83 g/kg alrededor de la isopícnica de 23 kg m^3 , lo que refleja el proceso de evaporación en la superficie del mar. También se observa estratificación desde los 17 °C hasta 28 °C, con valores altos de O_2 que oscilan entre 215 y $225 \mu\text{mol kg}^{-1}$; característica del CSW. Por debajo del límite inferior de salinidad del GCW se presentan cuatro estaciones que llegan a valores de $S_A < 35.5$ g/kg, lo que indica aporte de agua dulce proveniente de la

plataforma continental. Por el contrario, no se observan $S_A > 36.8$ g/kg. Todas las estaciones, para las tres campañas, muestran homogeneidad en el diagrama Θ - S_A a partir de la isopícnica de 26.5 kg/m^3 hasta 27.5 kg/m^3 , un intervalo de densidad donde también se observaron los valores mínimos de O_2 , lo que indica la presencia del TACW.

Al igual que en Perdido, en la región de Coatzacoalcos (Figura 2b) se observan valores máximos de Θ de ~ 30 °C alrededor de la isopícnica de 23 kg/m^3 , sin embargo, esta región presenta una mayor variabilidad en la S_A , con valores > 36.8 g/kg que sugieren una mayor evaporación probablemente debida a un mayor tiempo de residencia del agua en la zona. En contraste con Perdido, en Coatzacoalcos se presentaron valores de S_A por debajo de 36.2 g/kg a diferentes densidades, lo cual refleja aportes de agua dulce de la plataforma en diferentes épocas del año. Estos valores de S_A se encuentran en el intervalo para el CSW en la reclasificación propuesta por Cervantes-Díaz et al. (2021). En Coatzacoalcos se observa en la estación D16 con S_A dentro del intervalo de la NASUW. Las variables hidrográficas por debajo de la isopícnica de 26 kg m^3 muestran homogeneidad en todas las estaciones para las tres campañas, con $S_A < 36.5$ y valores mínimos de $O_2 < 125 \mu\text{mol kg}^{-1}$, características de la TACW.

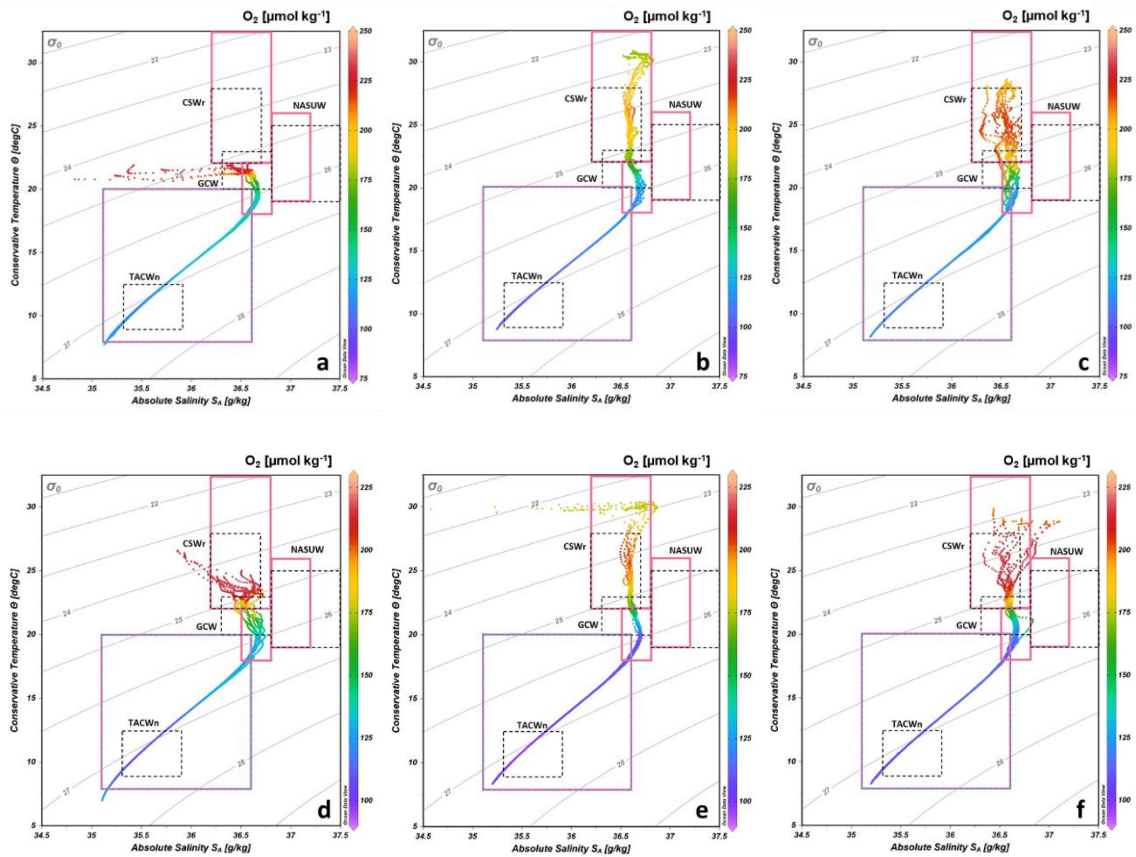


Figura 3. Diagramas de temperatura conservativa (Θ), salinidad absoluta (S_A) y oxígeno (O_2) de las masas de agua presentes en las zonas de Perdido (a, b y c) y Coatzacoalcos (d, e y f), Golfo de México para las tres campañas Malla Fina (marzo 2016, septiembre 2016 y junio 2018, respectivamente).

Para describir con detalle la variabilidad espacial y temporal de la hidrografía se realizaron diagramas Θ - S_A - O_2 para cada campaña en cada zona. Durante el invierno (MF1), en la región de Perdido (Figura 3a) los valores de Θ más altos fueron alrededor de 21 °C, con valores de S_A por debajo de 36.5 g/kg que reflejan el aporte de agua dulce desde la plataforma continental. Al no ser detectada la CSW en el diagrama dentro de los intervalos de las clasificaciones utilizadas,

pero al observarse que los diagramas presentan valores de O_2 de $\sim 220 \mu\text{mol kg}^{-1}$ entre las densidades de 24.5 y 25.5 kg/m^3 , se sugiere una mezcla invernal en la columna de agua. En esta región, los valores más altos de S_A se encuentran alrededor de 36.8 g/kg con una $\Theta \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$. La variabilidad de las estaciones por debajo de la isopícnica de 26 kg/m^3 es homogénea, con $\Theta < 17 \text{ }^\circ\text{C}$ y valores de $O_2 < 135 \mu\text{mol kg}^{-1}$, valores característicos de la TACW. En Coatzacoalcos, los valores máximos de Θ detectados durante el invierno se encuentran alrededor de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y se observan valores de $S_A < 36.5 \text{ g/kg}$, lo que refleja tanto aportes de agua dulce desde la plataforma continental como el efecto de la mezcla invernal. Entre intervalos de S_A y Θ para el GCW se observa un valor de O_2 de $\sim 150 \mu\text{mol kg}^{-1}$. En el caso del TACWn se observan valores mínimos de O_2 entre 90 y $110 \mu\text{mol kg}^{-1}$ alrededor de la isopícnica de 27.1 kg/m^3 .

En la campaña MF2 para Perdido y Coatzacoalcos (Figura 3b y 3e, respectivamente) se observa que por encima de la isopícnica de 25.3 kg/m^3 las estaciones se encuentran en el intervalo descrito por Cervantes Díaz et al. (2021) para la CSWr, con valores de $\Theta > 22 \text{ }^\circ\text{C}$ y S_A en un intervalo de 36.2 a 36.8 g/kg . En Coatzacoalcos (Figura 3e) entre las isopícnicas de 23 y 24 kg m^3 se presentan los valores máximos de S_A (36.9 g/kg), mientras que entre las isopícnicas de 22 y 23 kg m^3 se observa una pluma con valores de S_A que disminuyen drásticamente desde 36.6 g/kg hasta valores mínimos de $\sim 35.5 \text{ g/kg}$), como consecuencia de la descarga de ríos en una zona con importantes tasas de evaporación.

En la campaña MF3 en la región de Perdido (Figura 3c), se presenta el CSWr ubicada en un intervalo de isopícnas de 23.5 a 25 kg m³ (correspondiente a un intervalo de profundidad de 30 a 100 m), con valores de O₂ entre 175 y 217 μmol kg⁻¹), una S_A menor a 36.82 g/kg y una Θ promedio de 25 °C. En esta región, el GCW muestra valores altos de S_A alrededor de 36.75 g/kg, Θ entre 19 y 22.5 °C y con valores de O₂ > 117 μmol kg⁻¹. En Coatzacoalcos (Figura 3f) sobre la isopícnica de 24.7 kg m³ las estaciones se muestran más dispersas y con valores máximos de S_A (> 36.8 g/kg), y se puede observar que la mayoría de las estaciones se encuentran entre el límite inferior de S_A < 36.8 g/kg de la NASUW y el límite mayor del GCW (> 36.8 g/kg). El TACWn se comporta similar en todas las estaciones, con un O₂ ~ 110 μmol kg⁻¹ (corresponde a una profundidad mayor de 350 m).

6.2 Clasificación de las estaciones con base en la influencia de los remolinos de mesoescala

Mientras que en los CE se genera una elevación de las isopícnas y un hundimiento de la superficie del mar, por el contrario, en los AE se eleva la superficie del mar y se genera un hundimiento de las isopícnas (Alfaro-Castillo et al. 2013). Se utilizó la clasificación de Velásquez-Aristizábal et al. (2022) para complementar la identificación de las estaciones bajo influencia de remolinos de mesoescala. Esta clasificación se basa en variables hidrográficas denominadas Best Fit Variables (BFV), que incluyen la profundidad de la isoterma de 20 °C y la profundidad de la isopícnica de 26 kg m³.

En la región de Perdido para la campaña MF1 el hundimiento de la superficie del mar indica la presencia de un remolino ciclónico afectando todas las estaciones con excepción de la B5 (Figura 4a). La estación A4, con un valor de SLA cercano a -10 cm, se encuentra en la periferia del CE, mientras que las estaciones A1, A2, A3, B6, B7 y B9 se encuentran dentro del núcleo con valores de ~ -18 cm. En la región de Coatzacoalcos se puede observar la posible presencia de dos remolinos de mesoescala. Las estaciones C13 y C14 presentan una SLA ~ 12 cm por efecto de un AE, y en la periferia del mismo remolino se encuentra la estación D18. Cerca de la costa de Bahía Campeche hay un hundimiento de la superficie del mar (-5 cm), característica de un CE en donde encuentran el resto de las estaciones (Figura 4a). Cabe mencionar que la clasificación establecida por Velásquez-Aristizábal et al. (2022) para la profundidad de la isoterma de 20 °C se basó en datos obtenidos de cruceros oceanográficos realizados en verano, por lo que, de acuerdo con los mismos autores sus intervalos podrían no ser aplicables en campañas de invierno. Ya que MF1 se realizó en invierno, la identificación de remolinos en esta campaña se basó en el análisis de la profundidad de la isoterma de 20 °C, y ocasionalmente usando como referencia la profundidad de la isoterma de 14 °C (Biggs y Müller-Karger, 1994) (Figura 5a).

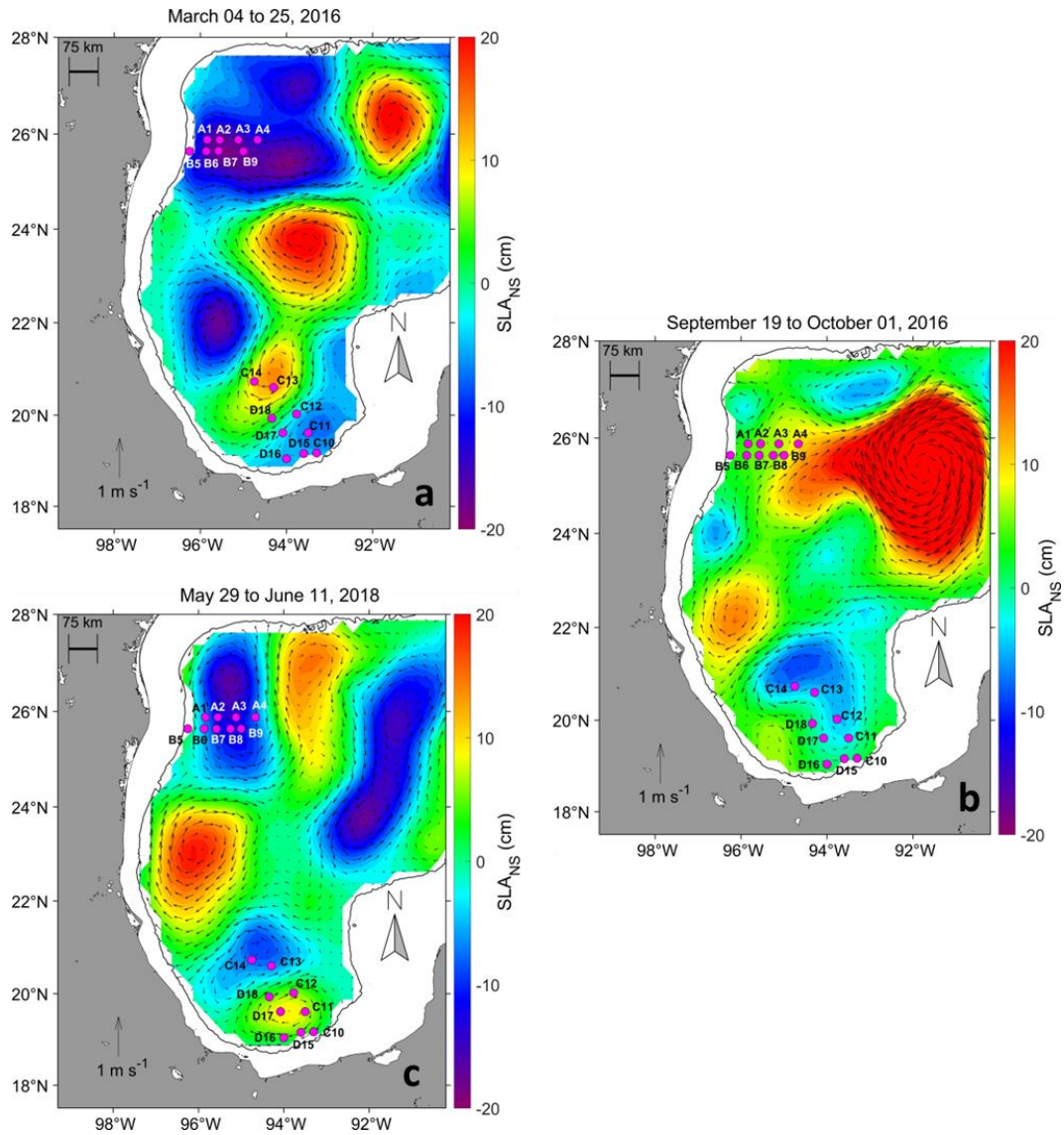


Figura 4. Anomalia del nivel del mar (SLA, cm) para las tres campañas Malla Fina; marzo (a), septiembre-octubre (b) y mayo-junio (c) en las regiones de Perdido y Coatzacoalcos, Golfo de México. Imágenes satelitales proporcionada por el Dr. Jorge A. Velásquez Aristizábal.

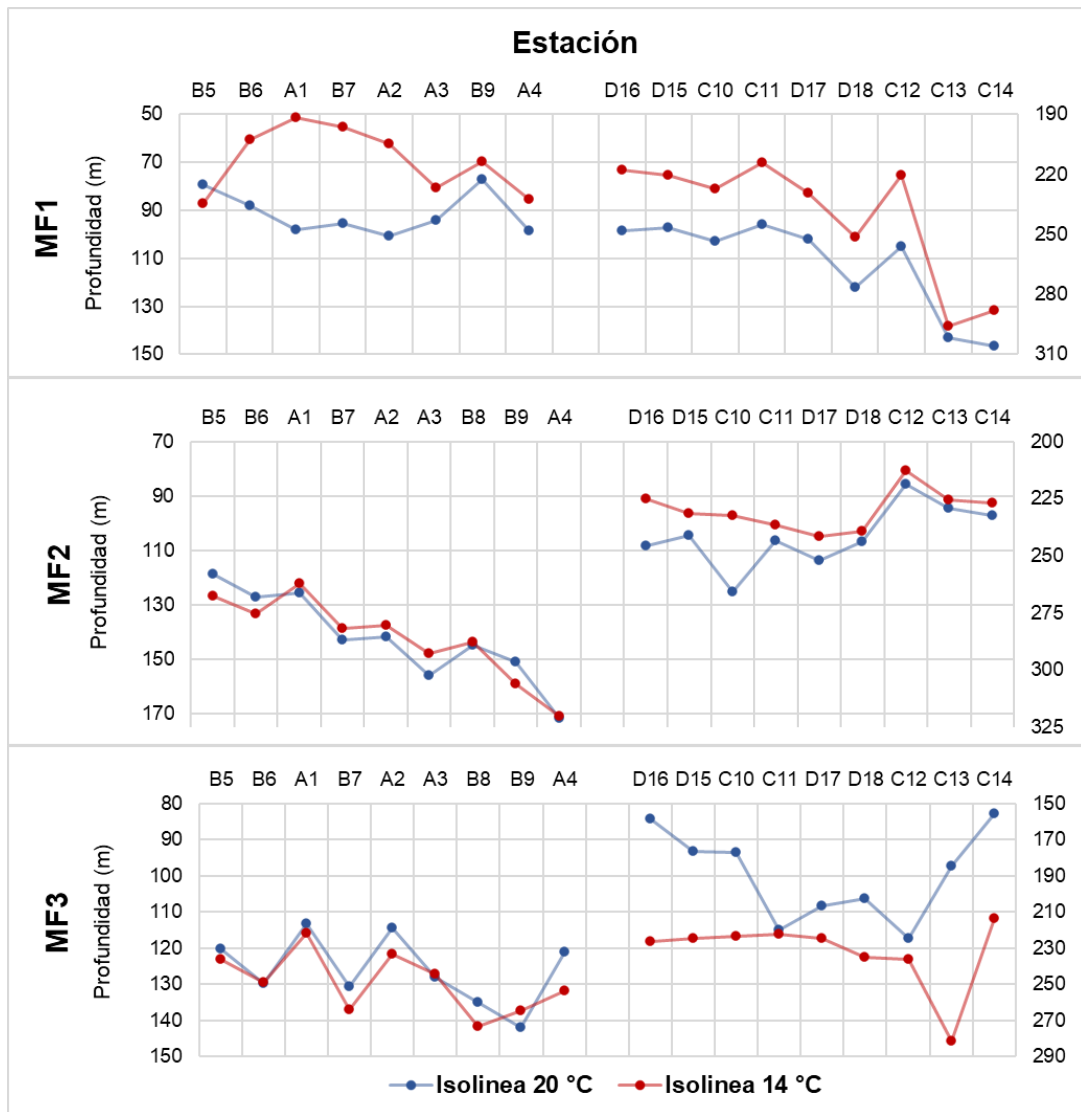


Figura 5. La profundidad de la isoterma de 14° y 20 °C para las tres campañas Malla Fina; marzo (MF1), septiembre-octubre (MF2) y mayo-junio (MF3) en las regiones de Perdido y Coatzacoalcos, Golfo de México.

La campaña MF2 (Figura 5b) fue realizada a finales del verano del 2016. En la zona de Perdido, en las estaciones A3, A4 y B9 se observa un levantamiento de la superficie del mar de ~ 10 cm y una profundidad de la isoterma de 20 °C > 150 m indicando la presencia de un AE. El resto de las estaciones, con excepción de

la B5, se encuentran a una altura de la superficie del mar con valores positivos y la profundidad de la isoterma de 20° C en un intervalo de 110-150 m características correspondientes a NE (Figura 5b).

En la zona de Coatzacoalcos se observa la presencia de un CE en las estaciones más alejadas de la costa (C12, C13 y C14), con SLA que varían de -2 a -8 cm y con profundidad de la isoterma de 20 °C con valores <110 m, características de un CE. Las estaciones C11 y D18 se encuentran afectadas por el núcleo del remolino, ambas presentan una profundidad de 106 m en la isoterma de 20 °C (Figura 5b), pero la altura superficial del mar se encuentra alrededor de 0 cm. En las estaciones C10, D15 y D16 se puede observar una SLA alrededor de 0 cm, características de NE. En estas estaciones, la isoterma de 20 °C se ubica a menos de 110 m de profundidad, en el intervalo para CE. Sin embargo, ya que estas tres estaciones se encuentran en la parte superior del talud (el fondo se encuentra entre 650 y 730 m), posiblemente presenten un efecto de fondo que puede levantar las isotermas e inducir la presencia de un CE cuando la zona se encuentra sin influencia de remolinos (Figura 5b).

Durante la campaña MF3, en la zona de Perdido, con excepción de la estación B5, todas las estaciones se encuentran en un CE donde la SLA tiene un intervalo de -5 a -20 cm, encontrándose las estaciones A2 y A3 afectadas por el núcleo del remolino (Figura 5c). A pesar de que los vectores de velocidad de las corrientes geostróficas confirman que esta zona está influenciada por una circulación ciclónica, la profundidad de la isoterma de 20 °C se ubicó entre 110 y

140 m de profundidad, (Figura 5c) lo que corresponde a un NE en la clasificación de Velásquez-Aristizábal et al. (2022). Esto podría deberse a que el remolino se encuentra en la etapa de vida de un CE en decadencia (ver discusión). En Coatzacoalcos se observa la presencia de dos remolinos de mesoescala (Figura 4c). Las estaciones C13 y C14 presentan un hundimiento de la SLA de -8 cm, mientras que la isoterma de 20 °C para ambas estaciones es menor a 100 m, característica de un CE. También se observa un levantamiento de la SLA por efecto de un AE cerca la costa de ~10 cm en las estaciones C11, C12 y D17, sin embargo, estas estaciones presentan valores entre 110-150 m de profundidad en la isoterma de 20 °C (Figura 5c), correspondiente a NE. Esto podría deberse a que el remolino de mesoescala se encuentra en la etapa de vida de un AE en decadencia. Aparentemente, las estaciones C10, D15 y D16 ubicadas en la parte superior del talud presentan un efecto de fondo, lo cual podría estar levantando las isotermas y asimilar el efecto de un CE. Estas estaciones, junto con la estación D18, presentan una SLA de alrededor de 0 cm, característica de NE.

Tabla 1. Clasificación de estaciones por efecto de remolinos de mesoescala; CE remolinos ciclónicos, AE remolinos anticiclónicos y NE agua sin efecto de remolinos.

	MF01				MF02				MF03			
	Estaciones	Iso 14°	Iso 20°	SLA (cm)	Estaciones	Iso 14°	Iso 20°	SLA (cm)	Estaciones	Iso 14°	Iso 20°	SLA (cm)
CE	A1	191.66	97.94	-17					A1	221.81	113.23	-4
	A2	204.56	100.58	-18					A2	233.34	114.56	-5
	A3	226.91	94.01	-17					A3	244.26	128.12	-5
	A4	232.35	98.33	-15					A4	253.63	121.17	-4
	B6	202.58	88.08	-17					B6	249.22	129.95	-4
	B7	196.21	95.36	-18					B7	264.11	130.68	-5
	B9	213.50	77.07	-18					B8	273.69	135.08	-5
									B9	264.82	142.03	-4
	Perdido	AE				A3	292.88	155.92	6			
					A4	320.34	171.81	9				
					B9	305.78	150.96	7				
					A1	262.12	125.73	4				
					A2	280.38	141.64	4				
					B6	275.50	127.13	4				
					B7	281.97	143.02	4				
					B8	287.92	144.70	5				
Coatzacoalcos	C10	227.49	102.94	-4	C12	212.58	85.46	-2	C13	281.41	97.52	-5
	C11	214.01	95.88	-7	C13	225.48	94.39	-4	C14	213.57	82.81	-5
	C12	220.53	104.87	-4	C14	226.72	97.07	8				
	D15	220.54	97.38	-7								
	D16	217.96	98.38	-7								
	D17	229.47	101.98	-3								
	AE	C13	295.96	143.07	11				C11	222.52	114.95	9
		C14	288.01	146.63	11				C12	236.41	117.25	8
									C17	224.50	108.31	9
	D18	251.30	122.21	4	C10	232.45	125.20	4	C10	223.52	93.71	4
				C11	236.42	106.55	3	D15	224.51	93.41	4	
				D15	231.46	104.34	4	D16	226.50	84.23	4	
				D16	225.00	108.31	3	D18	235.42	106.32	2	
				D18	239.39	106.83	4					

6.3 Concentración de los nutrientes en Perdido y Coatzacoalcos durante las tres campañas Malla Fina

Para sintetizar la información de la distribución vertical de los nutrientes obtenida en este estudio, la información de los perfiles de concentración se presenta en forma de diagramas de cajas y bigotes en los que se agregaron los datos por intervalos de profundidad. En los perfiles de nutrientes en ambas regiones durante las tres campañas MF (Figura 6 y 7) se puede observar que las concentraciones de PO_4^{3-} y NN en los primeros 50 m de profundidad se encuentran cercanas al límite de detección, con una media por debajo de $0.04 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en PO_4^{3-} , $0.1 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en NN y $3.8 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en H_4SiO_4 , con los valores más altos observados en MF1 (Figura 6a y 7a). En el máximo de fluorescencia (max_fl), que alcanzó los 50 m y se profundizó hasta los 90 m en ambas regiones,

se presenta una media de $0.07 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en fosfato, $1.7 \mu\text{mol/kg}$ en NN y $2.27 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en H_4SiO_4 , observándose los valores más altos en la campaña MF2 (Figura 6b y 7b). El intervalo de profundidad en donde se observó un aumento de la concentración en MF1 fue entre 75 y 90 m, y en MF2 y MF3 entre 110 y 150 m de profundidad. A 150 m se destaca la alta variabilidad de la concentración de los nutrientes, donde MF2 y MF3 presentan un intervalo de concentración más amplio. Las concentraciones en el min_O_2 , el cual fue muestreado en la misma isopicna (27.1 kg/m^3) en todas las estaciones (y se ubicó entre 350 y 460 m de profundidad), presentaron la media más alta en MF2 y MF3, con valores de $1.6 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en PO_4^{3-} , $26 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en NN y $14 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en H_4SiO_4 (Figura 6g, 7e y 6f, respectivamente). En las tres campañas, a 500 m se encuentran los valores más altos en los tres nutrientes, con una media alrededor de $1.81 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en PO_4^{3-} , $29 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en NN y $18 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en H_4SiO_4 .

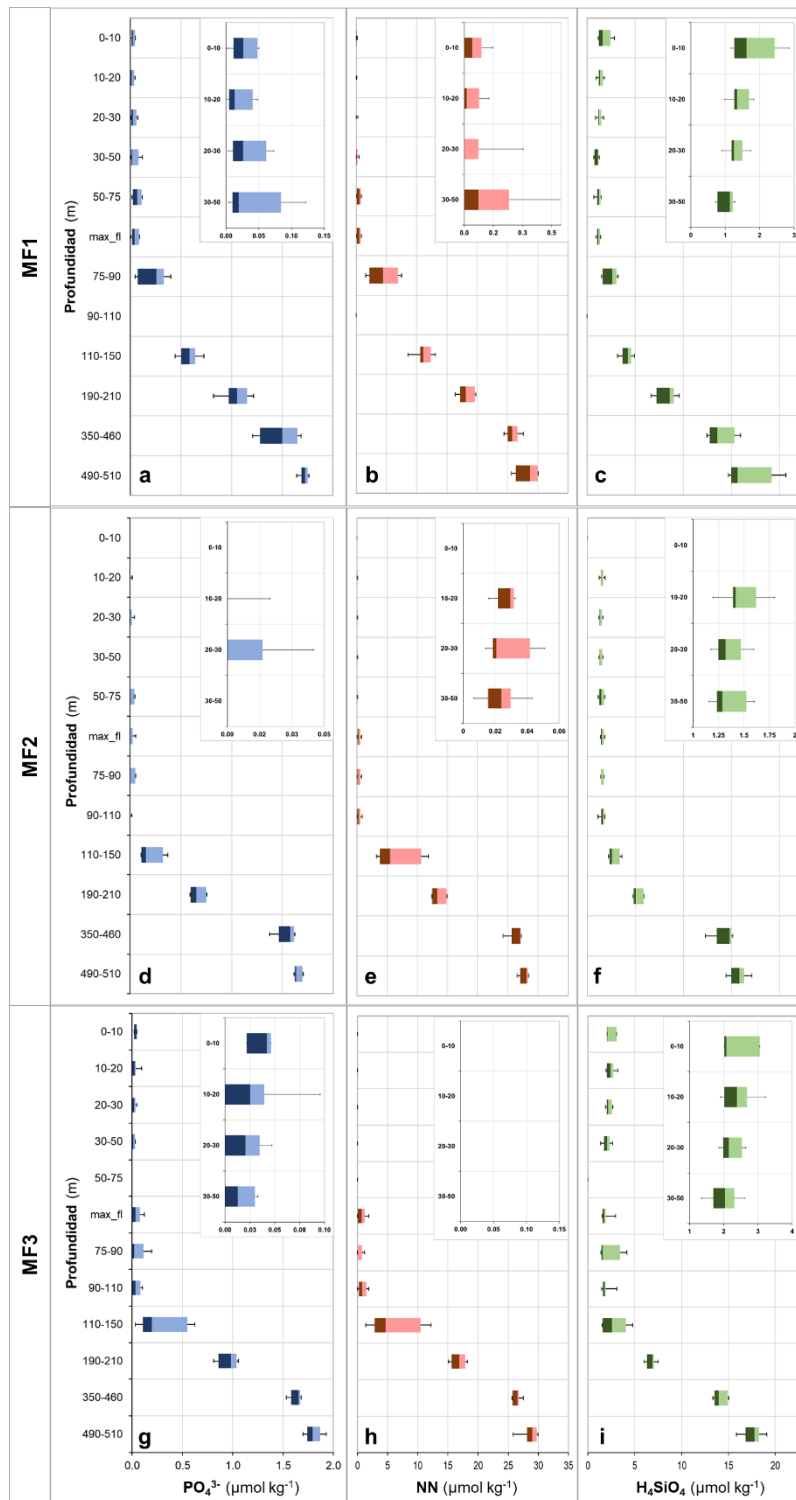


Figura 6. Diagramas de cajas y bigotes de PO_4^{3-} , NN y H_4SiO_4 para las tres campañas Malla Fina en la región de Perdido, Golfo de México.

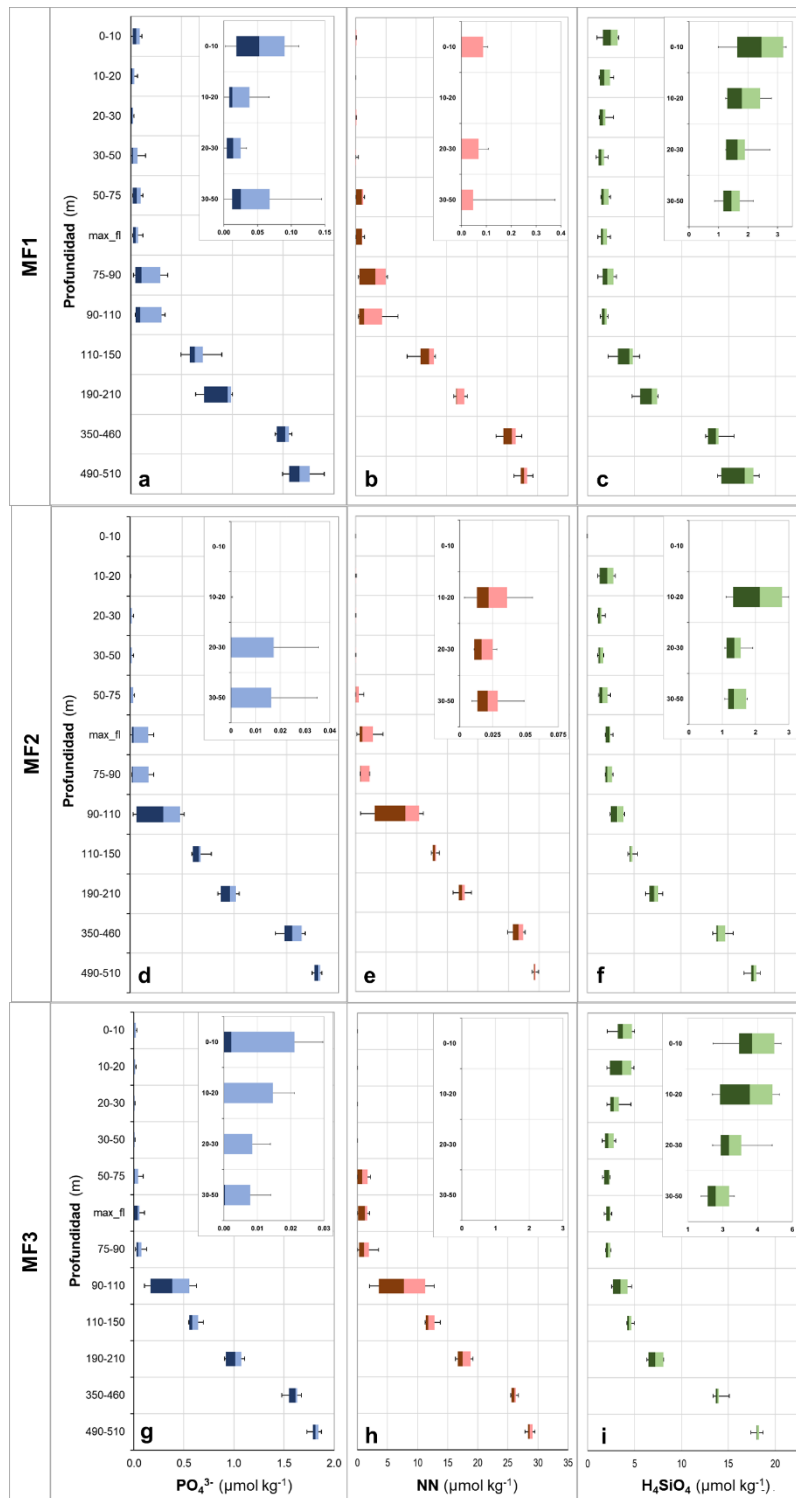


Figura 7. Diagramas de cajas y bigotes de PO_4^{3-} , NN y H_4SiO_4 para las tres campañas Malla Fina en la región de Coatzacoalcos, Golfo de México.

Para presentar un resumen de la distribución vertical de los nutrientes en la zona de estudio, en la Figura 8 se muestran los diagramas de cajas y bigotes en los que se incluyeron los datos de las tres campañas y las dos regiones.

Se puede observar que las concentraciones en los primeros 50 m de profundidad se encuentran cercanas al límite de detección en PO_4^{3-} y NN, mientras que en H_4SiO_4 hay concentraciones más altas en los primeros 10 m (mediana de $2.4 \mu\text{mol kg}^{-1}$) que disminuyen con la profundidad hasta un valor de $\sim 1.3 \mu\text{mol kg}^{-1}$ entre 30 y 50 m. El DCM se encuentra entre 50 y 90 m con una mediana de $0.03 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en PO_4^{3-} , 0.7 en NN, y $1.79 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de H_4SiO_4 . El crecimiento más acelerado de la mediana para NN y PO_4 inicia en el intervalo de 90-110, mientras que el incremento para el H_4SiO_4 es menos acentuado. Los datos de 110-150 m correspondieron mayoritariamente a muestras recolectadas a 150 m, por lo que su mediana representa la concentración “típica” de la base de la zona eufótica (PO_4^{3-} : $0.6 \mu\text{mol kg}^{-1}$, NN: $12 \mu\text{mol kg}^{-1}$ y H_4SiO_4 : $4 \mu\text{mol kg}^{-1}$). Los datos de las muestras recolectadas en el mínimo de O_2 son menos variables que en el resto de las profundidades. Esto se debe a que dichas muestras no se recolectaron en una profundidad fija sino a lo largo de una misma isopicna ($\sim 27.1 \text{ kg m}^{-3}$), por lo que se minimiza el efecto de remolinos de mesoescala. La mediana para el mínimo de O_2 es de $1.6 \mu\text{mol kg}^{-1}$ para PO_4^{3-} , $26 \mu\text{mol kg}^{-1}$ para NN y $13 \mu\text{mol kg}^{-1}$ para H_4SiO_4 .

A 500 m se observó una mediana de $1.76 \mu\text{mol kg}^{-1}$ para fosfato, $28 \mu\text{mol kg}^{-1}$ para NN y $17 \mu\text{mol kg}^{-1}$ para H_4SiO_4 . La concentración de NN en esta profundidad

es un poco menor pero cercana a la reportada para el máximo de NN en el GdM que, de acuerdo con Lee-Sánchez et al. (2022), se localiza entre 600 y 800 m.

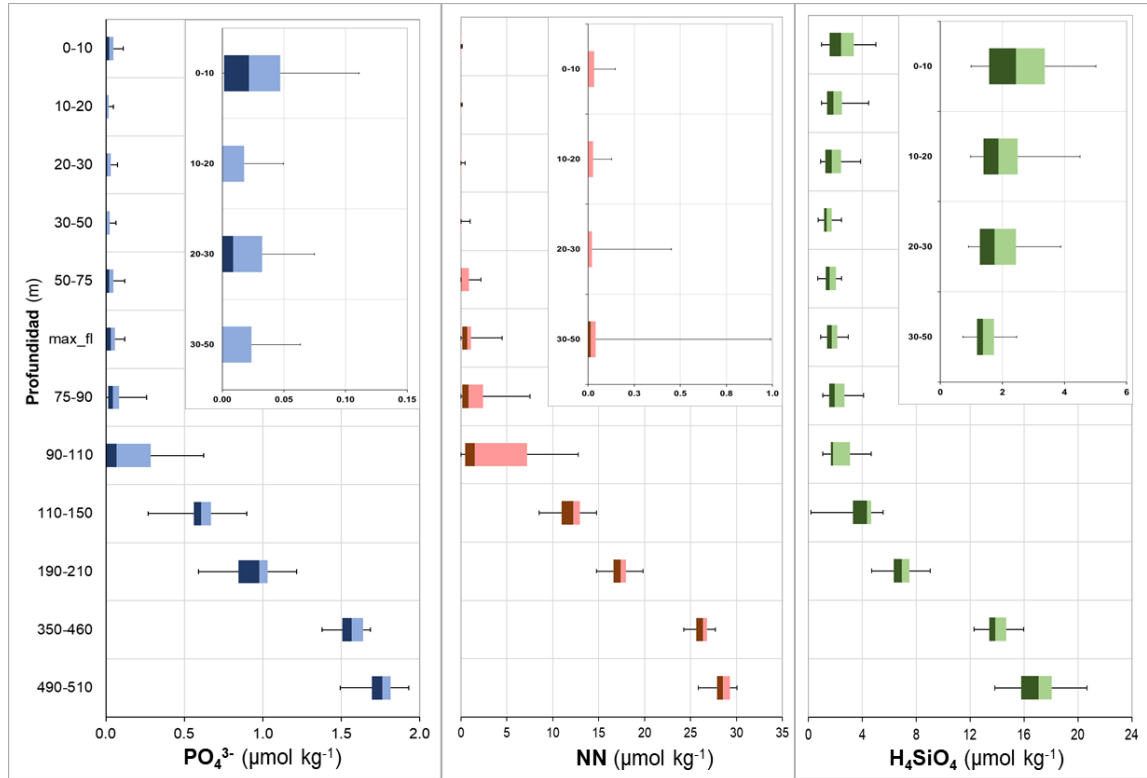


Figura 8. Diagramas de cajas y bigotes de PO_4^{3-} , NN y H_4SiO_4 durante las tres campañas Malla Fina en las regiones de Perdido y Coatzacoalcos, Golfo de México.

6.4 Perfiles promedio de los remolinos de mesoescala en las regiones de Perdido y Coatzacoalcos, Golfo de México

En este estudio se identificaron los remolinos de mesoescala presentes en dos regiones del occidente del Golfo de México y para cada remolino se calculó un perfil promedio; los perfiles para cada tipo de estructura se presentan en la Figura 9. En esta figura se observa un comportamiento parecido en cuatro de los cinco

CE identificados en el estudio, mientras que el remolino CE-4 presentó una distribución anómala que se describe y discute por separado. En los perfiles de NN y PO_4^{3-} para las cuatro estructuras ciclónicas CE-1, CE-2, CE-3 y CE-5 se observa cómo la concentración en profundidades someras (0-50 m) se encuentra muy cercana a $0 \mu\text{mol kg}^{-1}$, mientras que para el H_4SiO_4 es de alrededor de $2 \mu\text{mol kg}^{-1}$. Aunque a partir de 50 m el NN y el PO_4^{3-} incrementan, marcando el inicio de la nitraclina y la fosfaclina, es a partir de alrededor de 70 m que las concentraciones aumentan drásticamente con la profundidad. El PO_4^{3-} (Figura 9a) en estos cuatro CE, presenta un valor $\sim 0.5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ a una profundidad de 100 m, a partir de la cual se observa un incremento hasta los 500 m, donde la media es de $\sim 1.7 \mu\text{mol kg}^{-1}$. De igual manera, en los perfiles de NN (Figura 9b) la nutriclina inicia a una profundidad de 45 m y a 100 m de profundidad los perfiles promedio tienen un valor alrededor de $9 \mu\text{mol kg}^{-1}$. Igual que el PO_4^{3-} , la concentración de NN aumenta con la profundidad hasta observarse un valor de $\sim 28.5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ a 500 m. En las muestras de la superficie de los CE los perfiles promedio de H_4SiO_4 (Figura 9c) presentan un valor $\sim 2.5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ que disminuye hasta un mínimo alrededor de los 70 m, y de ahí aumenta gradualmente, aunque de forma menos intensa que para el NN y el PO_4^{3-} , hasta los 500 m donde se presenta una media $\sim 17 \mu\text{mol kg}^{-1}$.

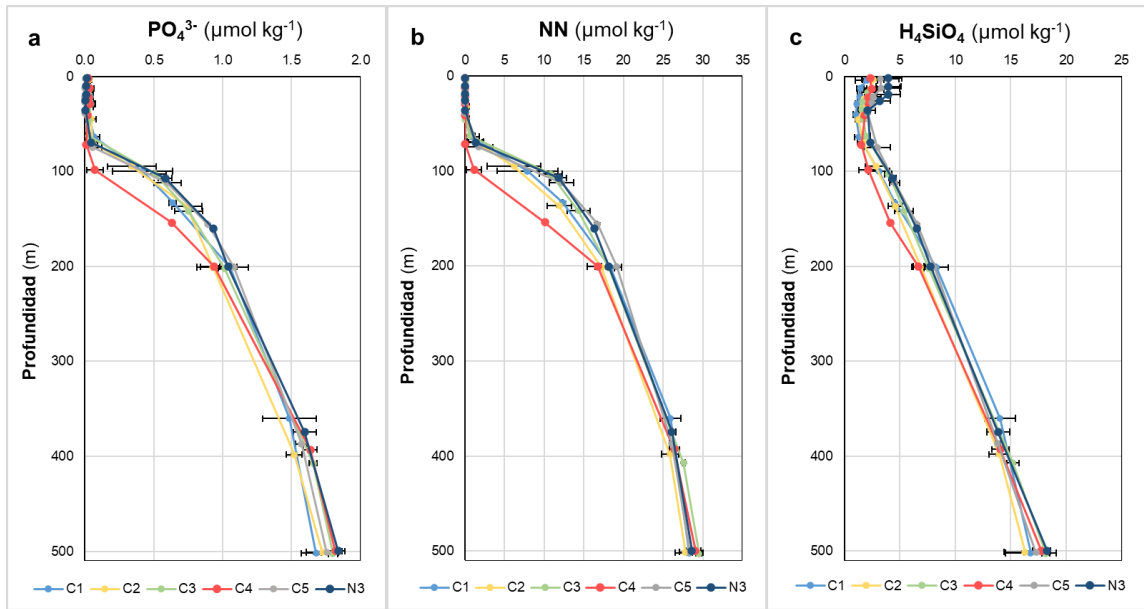


Figura 9. Perfiles promedio de las estaciones que se encuentran en los CE presentes en el occidente del Golfo de México de (a) PO_4^{3-} , (b) NN, (c) H_4SiO_4 .

Los perfiles promedio de las tres estructuras con circulación anticiclónica se muestran en la Figura 10, donde se puede observar que los remolinos AE-1 y AE-2 presentan un comportamiento similar al esperado para este tipo de estructuras de acuerdo con lo reportado en estudios previos para el golfo incluyendo (Lee et al. 2022 y Biggs y Müller-Karger 1994). En contraste, el remolino AE-3 presenta un comportamiento “anómalo” que se describe y discute por separado. En los perfiles AE se puede observar que para el PO_4^{3-} y el NN las concentraciones se encuentran por debajo de límite de detección o cercanos al cero desde la superficie hasta 100 m de profundidad, mientras que en la misma capa el H_4SiO_4 presenta valores relativamente homogéneos de alrededor de 1.5 $\mu\text{mol kg}^{-1}$. La fosfaclina (Figura 10) se presenta a una profundidad de 100 m,

después hay un ligero aumento hasta los 150 m, a una profundidad de 200 m se observa una media de $0.6 \mu\text{mol kg}^{-1}$, y a 500 m la concentración es de $\sim 1.5 \mu\text{mol kg}^{-1}$. La nitraclina en los AE (Figura 10b) también se observa a 100 m de profundidad, a 200 m la concentración presenta a una media de $12.7 \mu\text{mol kg}^{-1}$ e incrementa hasta $27 \mu\text{mol kg}^{-1}$ a 500 m de profundidad. En los perfiles promedio del H_4SiO_4 (Figura 10c) se observa un valor $\sim 2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en las muestras de la superficie que disminuyen poco en comparación con los CE y se hacen homogéneos desde 35 m hasta 100 m, donde inicia la silicacлина, y a partir de ahí aumenta gradualmente hasta los 500 m, donde presentan un valor de $\sim 15 \mu\text{mol kg}^{-1}$.

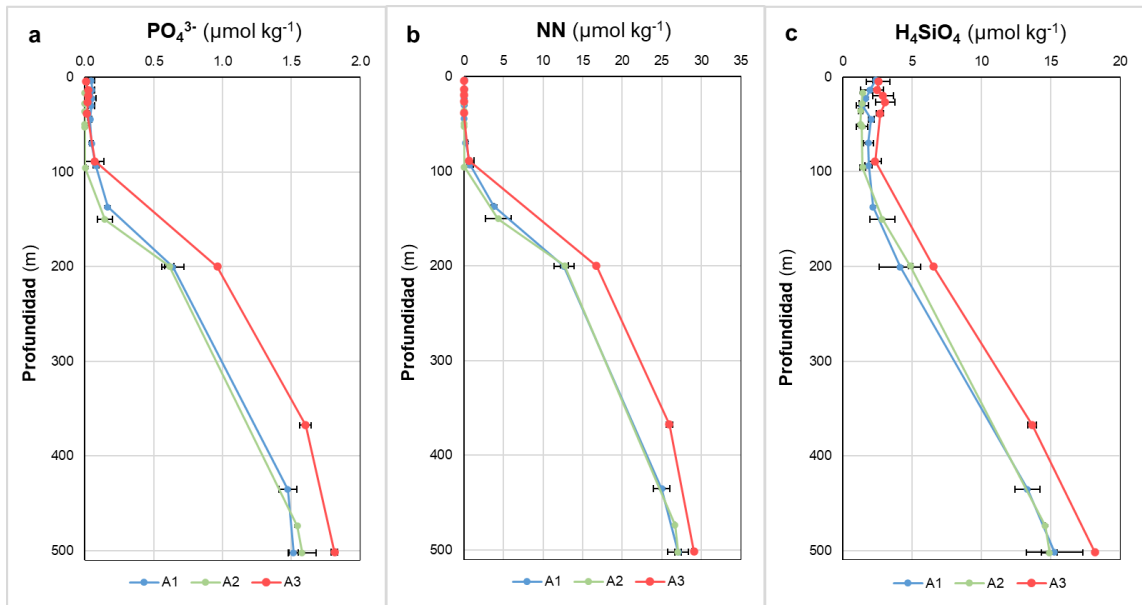


Figura 10. Perfiles promedio de las estaciones que se encuentran en los AE presentes en el occidente del Golfo de México de (a) PO_4^{3-} , (b) NN, (c) H_4SiO_4 .

De los tres grupos de estaciones sin aparente efecto de remolinos de mesoescala, el grupo NE-3 presentó perfiles promedio de nutrientes similares al de los remolinos ciclónicos más “intensos” (Figura 9 y 11). Más adelante, cuando se agregan los datos para la síntesis de los resultados por tipo de estructura, los datos de NE-3 se agruparon con los de los CE. Por su parte, como se esperaría para estaciones sin influencia de remolinos, los perfiles de los grupos NE-1 y NE-2 (Figura 11) fueron intermedios entre los CE y los AE (ver Velásquez-Aristizábal et al. 2022). Al igual que en el agua del interior de las estructuras de mesoescala, en la zona eufótica superior del agua sin remolinos, las concentraciones del PO_4^{3-} y NN se encuentran por debajo del límite de detección, hasta una profundidad entre 50 y 100 m dependiendo del grupo, mientras que las concentraciones del H_4SiO_4 muestran un mínimo subsuperficial. A 100 m el PO_4^{3-} en NE-1 y NE-2 (Figura 11a) presenta una concentración $\sim 0.05 \mu\text{mol kg}^{-1}$, y en contraste NE-3 presenta un valor diez veces mayor. Por debajo de los 100 m la diferencia en la concentración de PO_4^{3-} (y NN) entre NE-1, NE-2 y NE-3 disminuye con la profundidad, hasta obtener un valor similar ($\sim 1.7 \mu\text{mol kg}^{-1}$) a los 500 m. En los perfiles de NN (Figura 11b) se observan a 100 m valores entre 2 y $4 \mu\text{mol kg}^{-1}$ para los grupos NE-1 y NE-2, mientras que NE-3 presenta valores de $10 \mu\text{mol kg}^{-1}$. En los 500 m los tres grupos presentan valores similares de NN alrededor de $28 \mu\text{mol kg}^{-1}$.

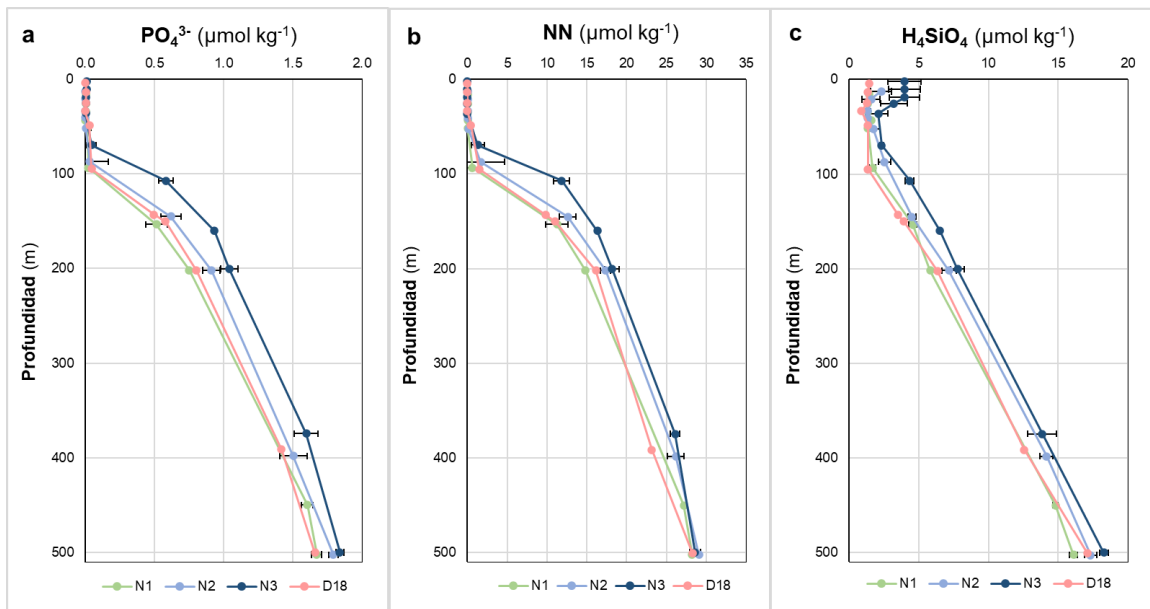


Figura 11. Perfiles promedio de las estaciones que se encuentran en las aguas sin influencia de remolinos en el occidente del Golfo de México de (a) PO_4^{3-} , (b) NN, (c) H_4SiO_4 .

Los perfiles promedio de los nutrientes de los remolinos CE-4 y el AE-3 no coinciden con los de la categoría asignada, son similares entre sí, y se parecen a los perfiles de las estaciones sin influencia de remolinos (Figura 12). Cerca de la superficie los valores de PO_4^{3-} y de NN están por debajo del límite de detección, y por debajo de las nutriclinas las concentraciones son parecidas a los de NE-1 y NE-2. En las discusiones se ofrece una explicación de por qué estando bien clasificadas estas estructuras, en función de su sentido de rotación, son biogeoquímicamente tan parecidas entre sí y tienen características de NE.

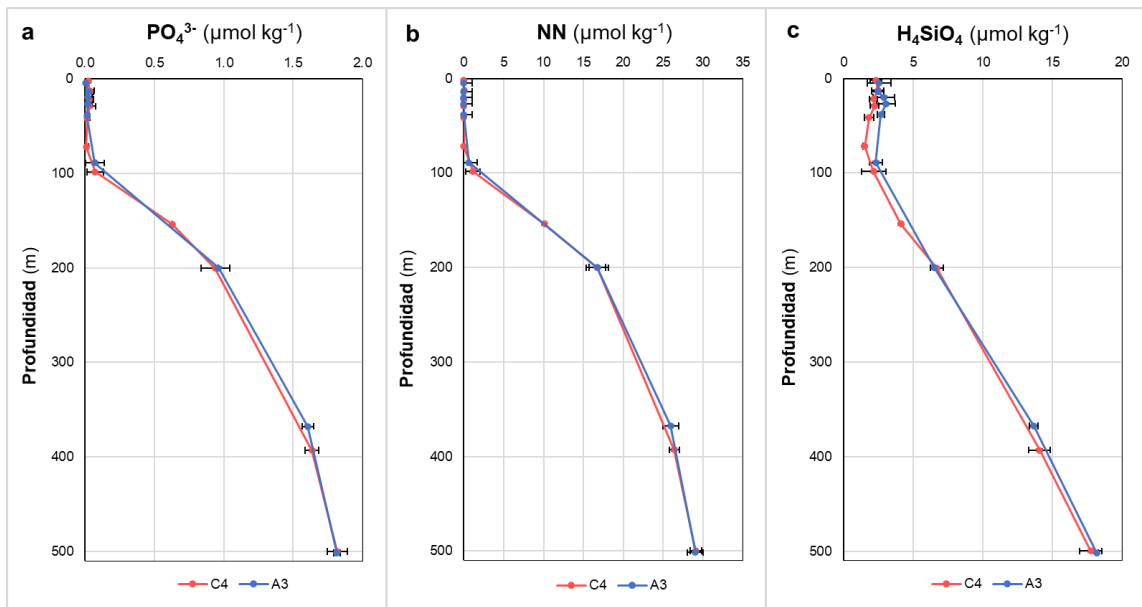


Figura 12. Perfiles promedio de las estaciones que se encuentran en los remolinos C4 y A3 presentes en el occidente del Golfo de México de (a) PO_4^{3-} , (b) NN, (c) H_4SiO_4 .

Para sintetizar la información de los perfiles de nutrientes por tipo de estructura de mesoescala, se generó un solo perfil promedio de cada nutriente para cada tipo de estructura (Figura 13). Para hacer notar la peculiaridad de los perfiles de los grupos CE-4 y AE-3, se generó un solo perfil promedio para estas dos estructuras. Resulta evidente del contraste cómo, independientemente de la estructura, los primeros 50 m están desabastecidos de NN mientras que, si bien el promedio indica que las concentraciones de PO_4^{3-} son cercanas a cero, las barras de error indican que en algunas muestras se observan concentraciones medibles pero bajas de este nutriente. Uno de los rasgos evidentes en esta figura es el hecho que a 100 m de profundidad el NN y el PO_4^{3-} únicamente están notoriamente enriquecidos en las estructuras ciclónicas (~ 10 y $0.5 \mu\text{mol kg}^{-1}$, respectivamente) mientras que en AE e incluso NE permanecen relativamente

bajas (< 2 y $< 0.1 \mu\text{mol kg}^{-1}$, respectivamente). El mayor contraste entre las estructuras se observa principalmente con el NN y el PO_4^{3-} a 150 m. La mayor diferencia en la concentración de nutrientes entre los tres tipos de estructuras se observa a 150 m, aunque a 200 m el contraste es todavía claro. Mientras que a lo largo de los perfiles las concentraciones en los AE se mantienen comparativamente bajas, las concentraciones en los NE tienden a asemejarse a los de los CE hasta converger a 500 m. En el caso del H_4SiO_4 , son aparentemente menos contrastantes los perfiles entre estructuras y se observa que el perfil AE tiene los valores más bajos y el CE los valores más altos. Para los perfiles promedio de CE-4 y AE-4, es de notar que, si bien se asemejan a los de los NE en los primeros 150 m, con la profundidad las concentraciones tienden hacia las de los perfiles de los CE e incluso las exceden a los 500 m.

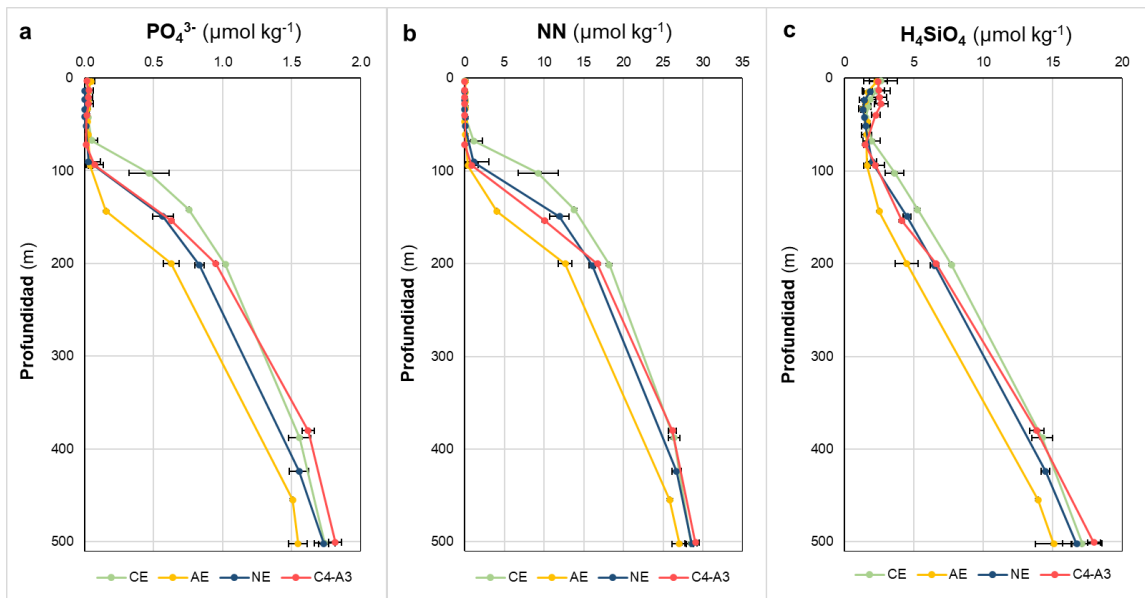


Figura 13. Perfiles promedio de los remolinos de mesoescala presentes en el occidente del Golfo de México; (a) PO_4^{3-} , (b) NN, (c) H_4SiO_4 .

6.5 Diagramas de cajas y bigotes de la concentración integrada de fosfato, NN y H_4SiO_4 y su relación con los remolinos de mesoescala

Las concentraciones integradas de PO_4^{3-} , NN y H_4SiO_4 , reflejan si las estaciones estuvieron bajo la influencia de remolinos de mesoescala en el momento del muestreo, y permiten estimar el potencial de productividad de una estación determinada a partir de las reservas de los nutrientes disponibles para los productores primarios.

La concentración integrada de PO_4^{3-} , NN y H_4SiO_4 entre 10 y 100 m refleja el stock de nutrientes disponible para la comunidad fitoplanctónica en el máximo profundo de clorofila. En las tres campañas MF este stock fue mayor en las aguas CE en comparación con las aguas NE o AE. Las CE presentaron una mediana

de NN de 168 mmol m^2 , notablemente superior a la mediana para las aguas NE (44 mmol m^2), y a las AE, donde el stock fue de 8 mmol m^2 (Figura 14b). El stock de PO_4^{3-} (Figura 14a) presentó una mediana de 9.4 mmol m^2 en las aguas de CE, 1.6 mmol m^2 en las NE y 0.02 mmol m^2 en AE (cabe aclarar que en el caso de AE el valor de la mediana fue muy diferente al valor promedio de 1.9 mmol m^2 ; $n=5$). El stock de H_4SiO_4 (Figura 14c) presentó una mediana de 172 mmol m^2 en CE, 153 mmol m^2 en NE y de 128 mmol m^2 en AE.

El cálculo de la concentración de NN integrada a 150 m (Figura 14h) es particularmente útil, ya que representa el stock de NN en toda la zona iluminada que está potencialmente disponible para la producción primaria y permite comparaciones con otras regiones oligotróficas. Durante las campañas Malla Fina, los valores de la mediana para el stock de NN entre 10 y 150 m en las estaciones CE, NE y AE fueron de 627, 514 y 149 mmol m^2 , para PO_4^{3-} fueron de 41, 25 y 7 mmol m^2 y para el H_4SiO_4 fueron de 381, 343 y 224 mmol m^2 , respectivamente. Cabe reseñar que entre los valores más altos de la concentración integrada de NN y H_4SiO_4 a 150 m se encuentran estaciones sin influencia de remolinos, NE (Figura 14h y 14i).

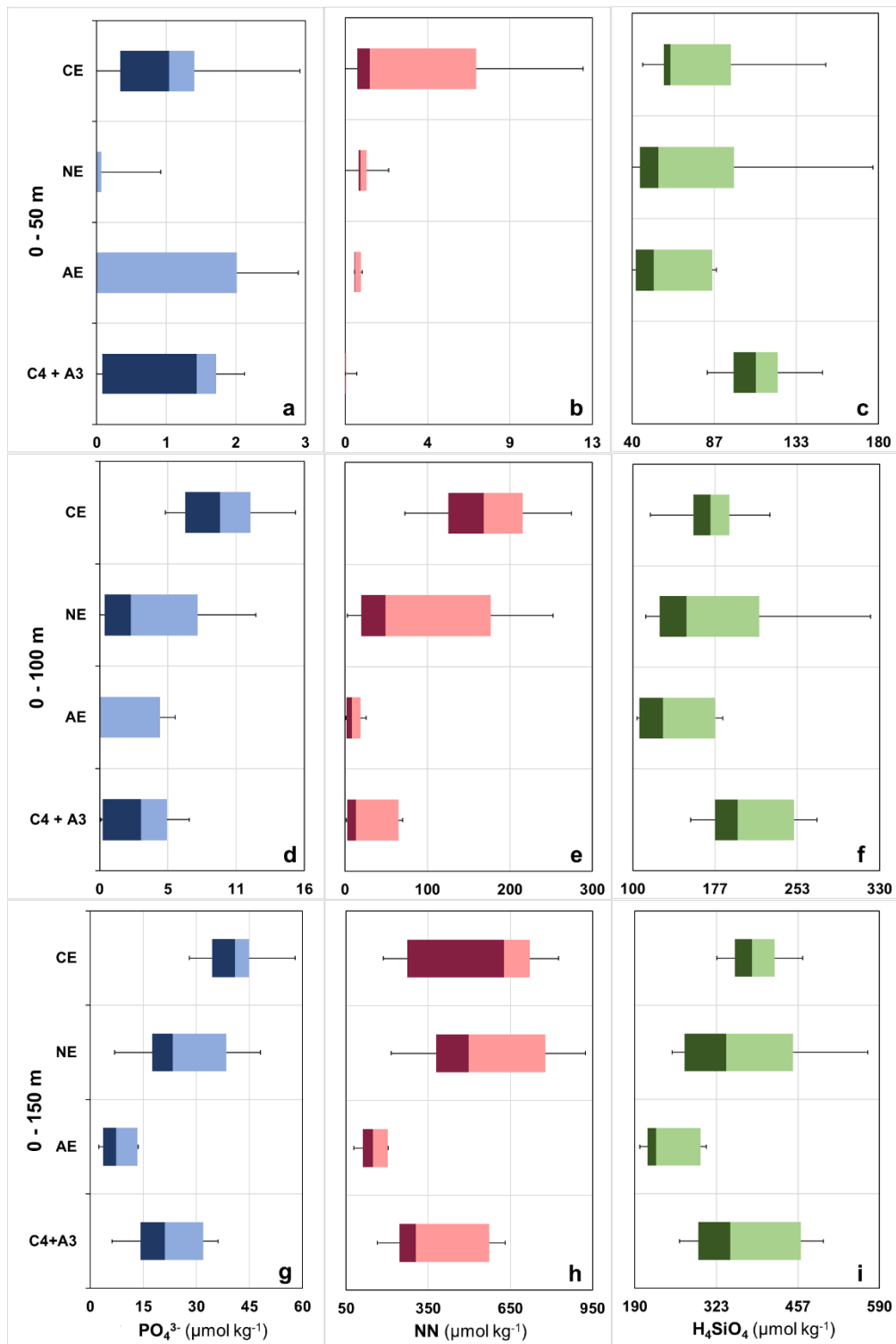


Figura 14. Concentración integrada de PO_4^{3-} ($mmol m^{-2}$), NN ($mmol m^{-2}$) y H_4SiO_4 ($mmol m^{-2}$) en tres intervalos de profundidad (10-50, 10-100 y 10-150 m).

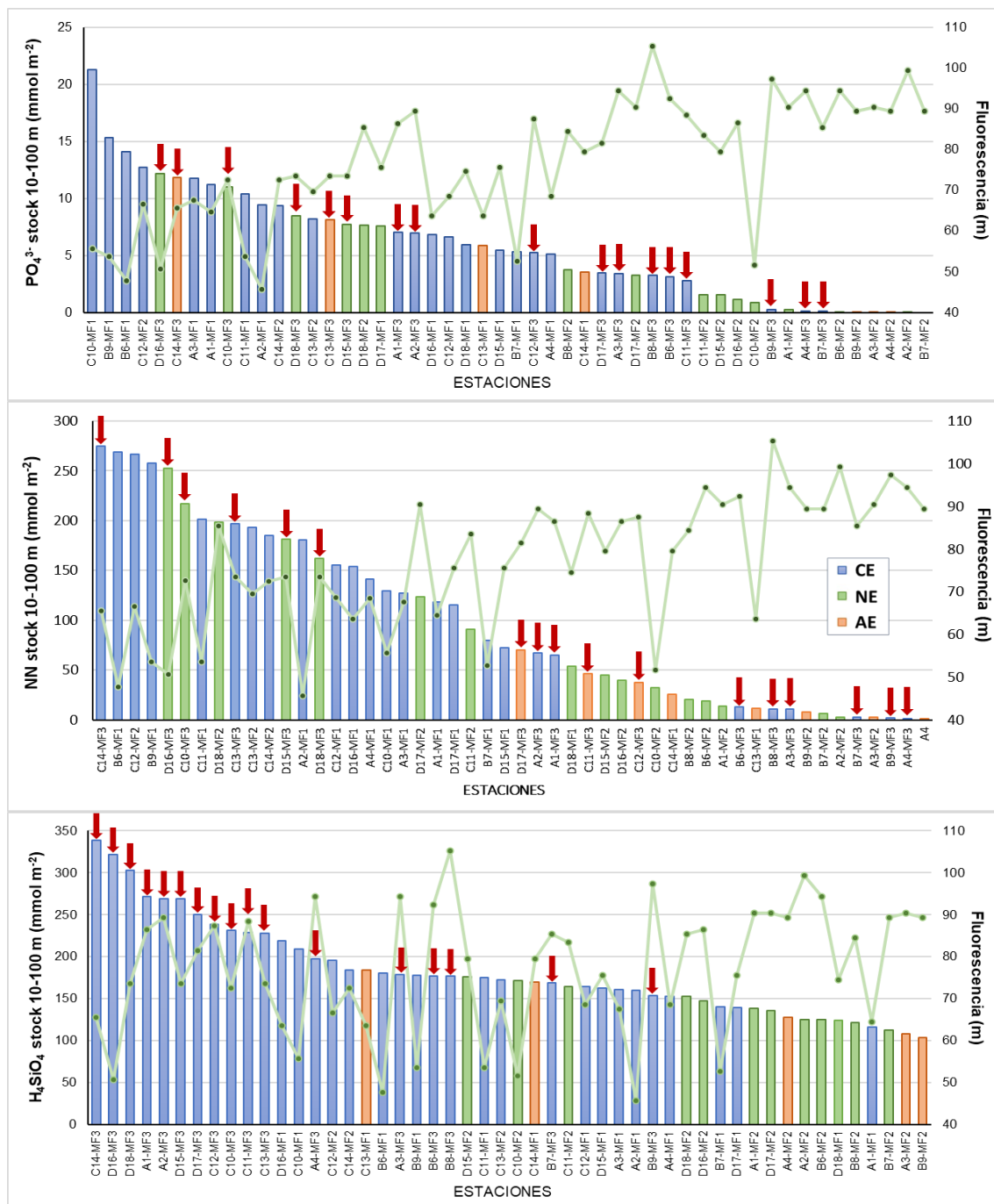


Figura 15. Concentración integrada de PO_4^{3-} , NN y H_4SiO_4 entre 10 y 100 m ($mmol\ m^{-2}$) de perfiles interpolados con el método PCHIP. Las barras azul, verde y naranja corresponden a los ciclones (CE), no remolinos (NE) y anticiclones (AE), respectivamente. En el eje Y de lado derecho la profundidad del máximo de fluorescencia (puntos verdes).

7. Discusiones

Los nutrientes inorgánicos disueltos juegan un papel importante en el control de la estructura de las comunidades fitoplanctónicas, la producción primaria de los océanos y, por lo tanto, en la conformación de las redes tróficas marinas (Field et al. 1998). El contenido de los nutrientes y la proporción entre ellos (su estequiometría), también modulan la eficiencia de la bomba biológica y la importancia de los océanos como sumideros de carbono antropogénico (Turner 2015). En este estudio, se describe por primera vez la distribución vertical de los macronutrientes inorgánicos nitrato, PO_4^{3-} y H_4SiO_4 , en los primeros 500 m de la columna de agua en las regiones de Perdido y Coatzacoalcos, Golfo de México. Para comprender dicha distribución, en esta sección primero se describe el contexto oceanográfico en el que se realizó cada campaña mediante la identificación de las masas de agua y remolinos de mesoescala que influenciaron. Posteriormente, se explora la posible variabilidad en la distribución de los nutrientes, asociada con diferencias oceanográficas entre las dos regiones, y la variabilidad temporal en escala estacional. Y a continuación, ya que la distribución espacial de los nutrientes en la zona de estudio está fuertemente modulada por los remolinos de mesoescala, la discusión se enfoca en los contrastes entre las aguas sin influencia de remolinos, las aguas con influencia de remolinos ciclónicos y las aguas impactadas por remolinos anticiclónicos. Finalmente, se evalúa el contenido (stock) de nutrientes en la zona eufótica, particularmente.

7.1 Caracterización biogeoquímica de las masas de agua

En los primeros 500 m de la columna de agua en las regiones de Perdido y Coatzacoalcos se presentan el CSW, el GCW y la TACW, aunque NASUW solo puede detectarse ocasionalmente. De acuerdo con la clasificación de masas de agua de Cervantes-Díaz et al. (2022) las tres masas de agua se presentaron en las tres campañas Malla Fina en la región de Coatzacoalcos, mientras que en la región de Perdido la CSW estaría ausente durante el invierno. Sin embargo, en el $\theta-S_A$ de esta campaña se observan datos con salinidades < 36.3 g/kg y temperaturas < 22 °C que corresponden a aguas superficiales con influencia de agua dulce y que podrían representar una mezcla de CSW fría con agua procedente de ríos. En este estudio el CSW estuvo caracterizada por concentraciones relativamente altas de OD (entre 159 a 215 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) y concentraciones bajas de nitrato (< 1.47 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) y PO_4^{3-} (< 0.14 $\mu\text{mol kg}^{-1}$), en tanto que el H_4SiO_4 mostró concentraciones ligeramente más altas en esta capa superior (0.9 – 5.0 $\mu\text{mol/kg}^{-1}$) que el GCW. En el caso del GCW, cuya posición corresponde a aguas en el límite superior de la nutriclina, el OD varió entre 121 y 216 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, el nitrato entre 0.02 y 9.87 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, el PO_4^{3-} entre 0.02 y 0.6 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, y el H_4SiO_4 entre 0.7 y 4.8 $\mu\text{mol kg}^{-1}$. En todo el intervalo de la TACW se presentaron concentraciones de OD entre 96 y 127 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, de NN entre 9 y 29 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, de PO_4^{3-} entre 0.47 y 1.92 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, y de H_4SiO_4 entre 2.5 y 17.8 $\mu\text{mol kg}^{-1}$. Para el caso del núcleo de la TACW, los valores en el mínimo de oxígeno oscilaron entre 96 y 110 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, con concentraciones de NN entre

22.85 - 28.34 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, de PO_4^{3-} entre 1.21 - 1.78 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, y H_4SiO_4 entre 12.28 - 17.1 $\mu\text{mol kg}^{-1}$.

Los valores de NN en las diferentes masas de agua se encuentran en los intervalos descritos por Cervantes-Díaz et al. (2021). Cabe mencionar, que en nuestro estudio se presenta por primera vez una caracterización de las masas de agua en términos de PO_4^{3-} y H_4SiO_4 en las regiones de Perdido y Coatzacoalcos. Otro rasgo que caracteriza las masas de agua es la presencia del máximo subsuperficial del oxígeno a finales de verano (MF2) con un valor entre 220 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ (Figura 3).

7.2 Clasificación de las estaciones por remolinos de mesoescala

La influencia de los remolinos de mesoescala ciclónicos y anticiclónicos en las estaciones de muestreo de Perdido y Coatzacoalcos es claramente visible durante las tres campañas oceanográficas. Biggs y Müller-Karger (1994) encontraron que la posición de la isoterma de 14°C varía estacionalmente, y de un año a otro, y que esta variabilidad está relacionada con factores como la temperatura superficial del mar y la circulación oceánica. Además, se relaciona con la variabilidad en la mezcla de las masas de agua. Por otro lado, en el estudio de Velásquez-Aristizábal et al. (2022) se seleccionó la profundidad de la isoterma de 20 °C como indicador de la presencia de remolinos ya que esta isoterma marca el inicio de la termoclina y puede influir en la distribución vertical de los nutrientes. Por lo tanto, en este estudio se consideran como indicadores de la

presencia de remolinos la profundidad de ambas isothermas. En las campañas MF1 y MF2, la clasificación de las estaciones basada en los intervalos de la profundidad de la isoterma de 20 °C de CE (< 110 m), NE (110-150 m) y AE (150-200 m), correspondió con la clasificación basada en la SLA. Sin embargo, para MF3, las estaciones tienen profundidades diferentes a las estructuras presentes en cada región, con excepción de las estaciones C13 y C14, que muestran las características de la estructura de mesoescala presente.

En cuanto a las imágenes satelitales de la SLA, MF1 y MF2 coinciden con la clasificación de las isothermas, observándose hundimiento en la superficie del mar en las estaciones con presencia de remolinos ciclónicos, y un levantamiento de la superficie en las estaciones con presencia de AE. En las tres campañas la estación B5 se excluyó de la clasificación ya que la profundidad del fondo es de alrededor de 650 m, por lo que la interacción con el talud genera un efecto en la profundidad de las isothermas y en la elevación del nivel del mar. También, algunas estaciones que se encuentran en la “frontera” entre dos remolinos, como en el caso de la estación D18 de la campaña MF1, su clasificación puede ser problemática. En el caso de MF3, las estaciones en general fueron difíciles de clasificar, con excepción de la C13 y C14, debido a que no corresponde la clasificación basada en la altimetría con la clasificación hidrográfica. Se observa una SLA alrededor de -15 cm en todas las estaciones de Perdido, sin embargo, la profundidad de la isoterma de 20 °C se encuentra entre 110 a 142 m, característica de NE. De igual manera, en Coatzacoalcos se observa un remolino

anticiclónico afectando las estaciones C11, C12 y D17, mientras que la isoterma de 20 °C se presenta entre 108 a 117 m, profundidades en el intervalo de NE. En este caso, la aparente inconsistencia entre la altimetría y la hidrografía probablemente es debida al tiempo de residencia del remolino de mesoescala y al mecanismo de Eddy-Trapping con el que se generó el agua en el interior del remolino en la Bahía Campeche durante el muestreo (Villegas-Mendoza et al. 2023).

7.3 Perfiles promedio de NN, PO₄³⁻ y H₄SiO₄

La concentración del NN y PO₄³⁻ en los primeros 50 m de la superficie en ambas regiones se encuentra cercana al límite de detección, con una media de ~ 0.01 μmol kg⁻¹ y 0.02 μmol kg⁻¹, respectivamente, aún con influencia de los remolinos de mesoescala. Williams et al. (2015), quienes estudiaron los efectos de los remolinos de mesoescala en la capa superior < 30 m en el norte del Golfo de México, reportaron una concentración media de NN de ~ 0.03 μmol kg⁻¹, similar al valor observado en nuestro estudio y al reportado por Lee-Sánchez et al. (2022) para la región profunda del sur del Golfo de México. En contraste con el NN y el PO₄³⁻, el H₄SiO₄ no se encuentra agotado, presentando una media ~ 2 μmol kg⁻¹. Ya que este nutriente presenta en general una distribución vertical diferente a la de NN y fósforo, dicha distribución se discute por separado al final de esta sección.

Debajo de la capa de mezcla superior agotada en nutrientes se hace presente la nutriclina en las tres campañas y ambas regiones. En los casos más extremos, la nutriclina fue tan somera como 24 m (la nitraclina de la estación D17 durante MF1) y tan profunda como 111 m (la silicacлина en la estación A3 de MF2). No se presenta un patrón claro en la profundidad de la nutriclina, ni entre regiones ni entre campañas, ya que, aparentemente, es la presencia de los remolinos de mesoescala la que determina la diferencia entre campañas y regiones. Por ejemplo, la presencia de remolinos ciclónicos (CE-1 en Perdido y CE-2 en Coatzacoalcos) durante MF1 induce que la nitraclina se localice entre 36 y 91 m. A su vez, en MF1 la nutriclina se profundiza en Coatzacoalcos debido a la presencia de AE-1. En MF2 se observa un patrón opuesto entre regiones ya que en Perdido está el AE-2 que profundiza la nutriclina, y en Coatzacoalcos está presente el CE-3 que eleva la nutriclina.

Lee-Sánchez et al. (2022) describen como los vientos fríos del norte del continente americano, que soplan sobre el Golfo de México principalmente en invierno, disminuyen la temperatura de la superficie del océano y promueven la mezcla invernal al profundizar la capa de mezcla y erosionar el máximo de salinidad subsuperficial. En contraste, durante el verano se genera una capa de mezcla cálida y somera, generando una estratificación. En comparación con Lee et al. (2022), en el invierno, las nutriclinas durante la campaña MF1 se presentaron en aguas de mayor densidad hasta 25.5 kg m^3 , esto se debió a la presencia del remolino CE-1 que fue particularmente intenso y transportó a la

capa superior aguas densas en las que se agotaron los nutrientes, las cuales corresponden al GCW de acuerdo con Cervantes-Díaz et al. (2021).

Lee-Sánchez et al. (2022) sugieren que la combinación de mayor disponibilidad de luz y el enriquecimiento con NN en la zona eufótica intermedia, inducida por la actividad de CE tanto en invierno como verano, podría estimular la producción de la comunidad fitoplanctónica alrededor del DFM. En este estudio el max_fl se encuentra a una profundidad entre 46 y 105 m, por lo que para explorar los datos de nutrientes en este intervalo de profundidad se graficaron los datos en profundidades de 50 a 75 y de 75 a 90 m. Esta separación permite conocer la distribución de los nutrientes en la columna de agua y el efecto de los remolinos de mesoescala. Así, en presencia de un CE, el max_fl tiende a ser más somero y en presencia de un AE el max_fl se profundiza. Por ejemplo, en la campaña MF2, en la región de Perdido la concentración de NN en max_fl presenta una media de $\sim 0.25 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en aguas AE y NE, sin embargo, se observó que en Coatzacoalcos la concentración fue mayor a $1.09 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en CE y NE.

Cuando se consideran todos los datos, incluyendo las dos regiones y las tres campañas (Figura 8), se observa que entre 90 y 110 m hay mayor variabilidad en la concentración de NN y fosfato. Esta variabilidad se debe principalmente a la variabilidad en la influencia de los remolinos de mesoescala entre los muestreos. Por ejemplo, en el caso de Coatzacoalcos en MF1 cuando las estaciones estuvieron influenciadas tanto por remolinos CE, AE y aguas NE, la concentración de NN presentó una mediana de $\sim 1.42 \mu\text{mol kg}^{-1}$ y el PO_4^{3-} de

0.09 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ (Figura 7a). En contraste, en MF2 cuando las estaciones estuvieron influenciadas por un CE y NE, la concentración de NN presentó una mediana de $\sim 8.12 \mu\text{mol kg}^{-1}$ y el PO_4^{3-} de $0.32 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (Figura 7b). En este intervalo de profundidad en algunos casos se observaron concentraciones cercanas al límite de detección debido a la profundización de las nutriclinas por la presencia de los remolinos anticiclónicos. Por esta razón en los casos de MF2 y MF3, en la región de Perdido la mayor variabilidad se encontró en el intervalo de profundidad de 110 a 150 debido a la presencia del AE-2 y CE-4 que se comportó como un anticiclón (Figura 6b y 6c).

En el min_{O_2} se presentó una menor variabilidad de la concentración de nutrientes a pesar de que este mínimo se presentó a lo largo de un rango amplio de profundidad (entre 350 y 460). El estrecho intervalo de concentraciones observado se debe a que estas muestras se tomaron en la profundidad en la que se encontraba el mínimo de oxígeno en la columna de agua, es decir, en una isopicna constante de $\sim 27.08 \text{ kg m}^{-3}$. Se esperaría observar una mayor concentración de nutrientes en la TACW de Coatzacoalcos en comparación con Perdido, ya que las aguas en esta capa, como lo indica la concentración de oxígeno disuelto, son “más viejas” y están más respiradas. Sin embargo, no se observa una diferencia clara entre regiones. La concentración de NN para las muestras integradas de ambas zonas presentó una mediana de $\sim 26.32 \mu\text{mol kg}^{-1}$ y PO_4^{3-} de $1.56 \mu\text{mol kg}^{-1}$. Por debajo de la TACW, conforme aumenta la

profundidad la concentración de NN y PO_4^{3-} aumenta, observándose medianas ~ $28.53 \mu\text{mol kg}^{-1}$ y $1.76 \mu\text{mol kg}^{-1}$, respectivamente a 500 m.

En contraste con el NN y el PO_4^{3-} , para el H_4SiO_4 se observó una concentración máxima en el estrato de 0 a 10 m (~ $2.4 \mu\text{mol kg}^{-1}$), disminuyendo hasta observarse valores mínimos principalmente entre 30 y 50 m, aunque en algunos perfiles el mínimo se observó alrededor del max_fl. El máximo superficial de H_4SiO_4 en la superficie de las regiones de estudio indica que este nutriente no se agota por consumo biológico. Hay evidencias de aportes de ríos en diagramas TS y en graficas de la relación del H_4SiO_4 con salinidad en nuestro estudio, donde se pueden observar plumas con salinidades por debajo de 36.5 g/kg hasta valores de 35 g/kg con concentraciones de H_4SiO_4 entre 1.38 y $4.48 \mu\text{mol kg}^{-1}$. El mínimo alrededor del max_fl refleja el consumo neto de H_4SiO_4 en esa capa. Aunque se esperaría que los principales consumidores de H_4SiO_4 en el mar fueran las diatomeas, en el Golfo de México las diatomeas son aparentemente escasas en el max_fl. Recientemente se reportó que, si bien las diatomeas son escasas en esta capa, las rhizarias son aparentemente abundantes (Sidón et al. 2023). Las rhizarias son un grupo de organismos protistas silicificadores que en la última década han sido asociadas con el consumo del H_4SiO_4 y su exportación hacia el fondo de los océanos (Llopis Monferrer et al. 2022). El inicio de la silicacлина se presentó a una profundidad de 190 m con una mediana de $6.93 \mu\text{mol kg}^{-1}$ y continuó incrementando linealmente derivado de la disolución del

ópalo biogénico hasta llegar a una mediana de $17.08 \mu\text{mol kg}^{-1}$ a 500 m (Figura 7c).

7.4 Efecto de los remolinos de mesoescala en la concentración integrada de NN, PO₄³⁻ y H₄SiO₄

7.4.1 Concentración integrada de nutrientes entre 10 y 100 m

El stock de nutrientes contenido entre 10 y 100 m representa los nutrientes disponibles para los productores primarios en la capa eufótica superior (0-50m) y la capa eufótica intermedia (50-100 m). Es importante mencionar que la mayoría de este stock está contenido en la capa eufótica intermedia donde se localizó el valor máximo de fluorescencia en 48 del total de 50 estaciones (Figura 14).

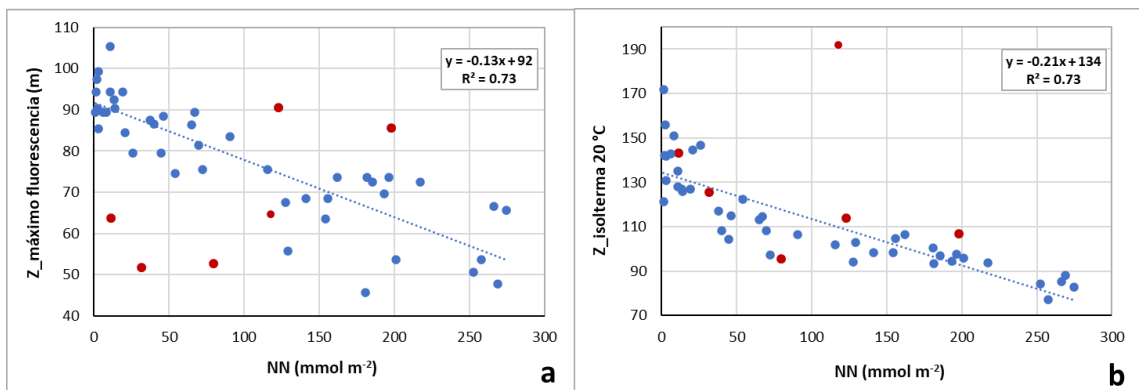


Figura 16. Relación entre la concentración integrada de NN (10-100 m) y (a) la profundidad de la isoterma de 20 °C y (b) la profundidad del máximo de fluorescencia para las campañas Malla Fina. Los puntos rojos no se consideraron para el cálculo de la ecuación de regresión y el valor R^2 .

Durante las tres campañas, el valor de la mediana de la concentración integrada para NN, PO_4^{3-} y H_4SiO_4 fue mayor en CE con relación a NE y notoriamente en relación con AE (Figura 14). Por ejemplo, las cuatro estaciones CE con stock de NN más alto presentaron valores entre 257 y 274 mmol m^{-2} , mientras que de las estaciones con menor stock de NN (excluyendo las estaciones del remolino CE-4) seis presentaron valores $< 12 \text{ mmol m}^{-2}$, de las cuales cuatro fueron anticiclónicas. Debido al efecto de los remolinos, en una misma campaña, estaciones contiguas de la Bahía de Campeche presentaron diferencias notorias en el stock de NN. Por ejemplo, la estación C12 localizada en el borde del remolino CE-2 presentó un stock de 155 mmol m^{-2} , mientras que la C13 localizada en el núcleo de AE-1 presentó una concentración integrada de 11 mmol m^{-2} . Las diferencias entre los stocks de CE y AE se deben al levantamiento y hundimiento de las isopícnas en la columna de agua (McGuillicuddy 2016).

Cabe destacar que es difícil asignar una clasificación a las estaciones cuando estas se encuentran en el límite entre estructuras, como se observa en el grupo que clasificamos como NE-3, ubicado en Coatzacoalcos durante la campaña MF2. Se asignó esta clasificación a las estaciones C10, C11, D15, D16, D17 y D18, con base en el análisis visual del mapa de SLA, y de la profundidad de la isoterma de 20 °C. Sin embargo, este grupo incluyó estaciones adyacentes al talud continental (C10, D15 y D16) con concentraciones integradas de 32 a 40 mmol m^{-2} . Este grupo también incluyó estaciones más alejadas del talud (C11, D17 y D18) y más cercanas al núcleo de CE-3, las cuales presentaron

concentraciones integradas entre 90 y 198 mmol m⁻². Aunque se esperaría que estaciones con una profundidad similar de la isoterma de 20 °C presentaran stocks similares de nutrientes, nuestros resultados fueron contrastantes entre la estación D15 con 104 m de profundidad y 44 mmol m⁻² y la estación D18 con 106 m de profundidad y 198 mmol m⁻² de NN. Es probable que la diferencia se deba a que la estación más cercana al talud refleja un mayor consumo de nutrientes como lo sugieren imágenes satelitales de clorofila para esta campaña (Linacre et al. 2021). Adicionalmente es posible que la estación D18 pudo haber estado influenciada por el remolino CE-3 al momento del muestreo (25 y 27 de septiembre, y 01 de octubre) mientras que la imagen SLA aquí presentada representa el promedio para el periodo del muestreo (19 de septiembre a 01 de octubre, 2016; Velásquez-Aristizábal comunicación personal). Esta hipótesis se basa en la observación de las estaciones del núcleo del remolino que presentaron un stock entre 185 y 266 mmol m⁻² de NN.

Como sugiere la relación de la profundidad de la isoterma de 20 °C con la concentración integrada de NN (Figura 16a), las diferencias en el stock de NN se podrían deber a diferencias en la ubicación de las estaciones con respecto al núcleo del remolino y/o la etapa en el ciclo de vida en el que se encuentran dichos remolinos. Aunque podría esperarse que las estaciones de Coatzacoalcos presentaran un mayor contenido de nutrientes, ya que las aguas de la Bahía de Campeche están más “respiradas” (i.e. tienen un menor contenido de oxígeno) (Jochens y DiMarco, 2008; Cervantes-Díaz et al. 2022), nuestros resultados

indican que el contenido de nutrientes depende, principalmente, de la presencia de las estructuras de mesoescala. El stock de nutrientes entre 10 y 150 m incluye la zona eufótica inferior (100-150 m), donde Villegas-Mendoza et al. (2022) reportaron que la actividad microbiana y, por lo tanto, la respiración de la comunidad es particularmente intensa en las regiones de Perdido y Coatzacoalcos. También, en este intervalo de profundidad en la mayoría de las estaciones se presentó la base de la oxiclina, cuya concentración de OD puede reflejar que tan “respirada” se encuentra la parcela de agua. Durante la campaña MF1 en la región de Perdido, cuyas estaciones estuvieron bajo la influencia de CE-1, se observó un mayor stock de nutrientes entre 10 y 150 m (mediana= 707, 41 y 377 mmol m⁻² para NN, PO₄³⁻ y H₄SiO₄, respectivamente) que en la región de Coatzacoalcos, influenciada por AE-1 y CE-2 (mediana= 616, 33 y 339 mmol m⁻² para NN, PO₄³⁻ y H₄SiO₄, respectivamente); sin embargo, la mediana de la concentración de oxígeno en la base de la oxiclina fue similar en ambas regiones (133 y 131 μmol kg⁻¹, respectivamente). En contraste, en MF2, si se observó un mayor stock de nutrientes en las estaciones de Coatzacoalcos (excluyendo las tres más cercanas al talud) con una mediana de 789, 38 y 389 mmol m⁻² para NN, PO₄³⁻ y H₄SiO₄, respectivamente, en comparación con Perdido (mediana= 237, 9 y 251 mmol m⁻² para NN, PO₄³⁻ y H₄SiO₄, respectivamente). En Coatzacoalcos, las estaciones presentaron una mediana de la concentración de oxígeno disuelto en la base de la oxiclina de 114 μmol kg⁻¹ y estuvieron bajo la influencia de CE-3 y NE-2, mientras que en Perdido el contenido de OD fue de 119 μmol kg⁻¹ y estuvo influenciada por AE-2 y NE-1. Cabe aclarar que al realizar

una comparación en el stock de nutrientes entre los remolinos ciclónicos CE-1 de Perdido y CE-3 de Coatzacoalcos pareciera presentarse un efecto regional ya que CE-3 mostró un menor contenido de OD y un mayor stock de nutrientes, aunque la diferencia fue más notoria en el stock de NN que en los stocks de PO_4^{3-} y H_4SiO_4 .

Uno de los efectos más importantes de los remolinos de mesoescala es acercar o alejar los nutrientes a las comunidades fitoplanctónicas, de tal manera que en los remolinos ciclónicos estas comunidades presentan un mayor abasto de estos nutrientes mientras que en los remolinos anticiclónicos la disponibilidad de nutrientes puede disminuir notablemente. Como se mencionó anteriormente, el stock de NN entre 10 y 100 m en algunas estaciones superó los 250 mmol m^{-2} en zonas influenciadas por CE, mientras que en algunas estaciones influenciadas por AE fue menor a 12 mmol m^{-2} y tan bajo como 1 mmol m^{-2} . En nuestra zona de estudio el stock integrado entre 10 y 100 m tiene mayor influencia en las comunidades fitoplanctónicas localizadas entre 50 y 100, lo que incluye las comunidades en el máximo profundo de clorofila. La posición de este máximo, si bien es determinada por la disponibilidad de luz y la disponibilidad de nutrientes (Sigma & Hain 2012), esto último está claramente influenciado por los remolinos de mesoescala, que elevan o hundén la nitraclina. Nuestros datos muestran una asociación ($R^2 = 0.73$) entre la profundidad del máximo de fluorescencia y el stock de NN (Figura 15 y 16b), e indican que, durante nuestro estudio, en estaciones con un stock de NN mayor que 250 mmol m^{-2} la comunidad del máximo de

fluorescencia se localizó alrededor de 45 a 70 m, mientras que cuando el stock de NN fue menor que 10 mmol m^{-2} esta comunidad se localizó entre de 85 a 100 m. Si bien la evaluación del impacto de las diferencias en la disponibilidad de nutrientes en estructura de la comunidad fitoplanctónica y la producción primaria en la zona de estudio están fuera del alcance de esta tesis, algunos estudios han documentado que dicho impacto puede ser importante. Por ejemplo, Linacre et al. (2015) reportaron mayores biomásas de picoeucariontes en remolinos ciclónicos en la región profunda del Golfo de México, incluyendo la Bahía de Campeche, durante el invierno. Por otro lado, Sidón et al. (2023), a partir de análisis moleculares, reportaron una gran diferencia entre la composición de comunidad microbiana eucariota de la capa de mezcla (5-10 m) y la del máximo profundo de clorofila (DCM), así como entre remolinos ciclónicos y anticiclónicos en el GdM durante el verano. Entre otros hallazgos, estos autores reportaron una baja abundancia de diatomeas tanto en la capa de mezcla como en el DCM, mientras que el picoeucarionte fotosintético *Pelagomonas sp.* fue el más abundante en ambas capas. También reportaron que la abundancia de *Pelagomonas sp.* en el DCM está correlacionada con la abundancia del nitrato, y que su éxito se debe a su adaptación a condiciones limitantes de hierro y bajas irradiancias de luz, así como a su volumen celular pequeño que le permite una mayor eficiencia en la captación de los nutrientes frente a otros grupos fitoplanctónicos. Por otro lado, también observaron que *Ostreococcus sp.* (microalga verde-clorofita), de manera similar a *Pelagomonas sp.* se correlacionó con la concentración de NN, aunque esta especie presentó altas abundancias en

el DCM particularmente en remolinos ciclónicos con una nitraclina somera. En otras palabras, es posible que esta especie sea particularmente abundante en las muestras en las que observamos un stock de NN > a 250 mmol m⁻², es decir, en aquellas muestras con alta disponibilidad de NN y alta disponibilidad de luz.

Finalmente, otro hallazgo importante en el estudio de Sidón et al. (2023) es la presencia del grupo de las rhizarias silíceas, que fue particularmente abundante (21.6 %) en el DCM. Rhizaria es un grupo de radiolarios mixótrofos no constitutivos, ampliamente diverso y con tamaños que oscilan de pocas micras hasta varios milímetros, y recientemente se ha reportado que pueden jugar un papel importante en los ciclos biogeoquímicos del carbono y el silicio (Llopis Monferrer et al. 2022). Ya que las diatomeas no son abundantes en el DCM del GdM, es posible que las rhizarias sean las responsables de que en los perfiles verticales de H₄SiO₄ observemos un mínimo en las muestras alrededor de la profundidad del máximo de fluorescencia (Figura 9c y 11c). De ser así, como se ha reportado para otras regiones oceánicas (Gutierrez-Rodriguez et al. 2019), las rhizarias también podrían estar jugando un papel importante en la bomba biológica en el Golfo de México.

7.4.2 Concentración integrada de nutrientes en los remolinos biogeoquímicamente anómalos

Una de las observaciones más interesantes en el presente estudio fue el comportamiento biogeoquímico “anómalo” en dos de los remolinos de la

campana MF3. Con base en antecedentes sobre el comportamiento biogeoquímico “general” en remolinos de mesoescala reportados para diversos ecosistemas marinos (Rii et al. 2008; Hawco et al. 2021), incluyendo el GdM (Biggs & Müller-Karger 1994; Lee-Sánchez et al. 2022; Velásquez-Aristizábal et al. 2022), la distribución vertical de los nutrientes en función del tipo de remolino de mesoescala que influenció las estaciones de muestreo debió ser similar a la observada en los CE y AE de MF1 y MF2 (Figura 9 y 10). Sin embargo, como se discutió en la sección 7.2, el remolino CE-4 que sin duda presentaba una circulación ciclónica al momento del muestreo, presentó un comportamiento hidrográfico y biogeoquímico similar al de aguas sin influencia de remolinos. Por el contrario, las estaciones en el remolino AE-3, cuya circulación era indudablemente anticiclónica durante el muestreo, hidrográficamente y biogeoquímicamente presentó un comportamiento de agua sin influencia de remolinos (Figura 13). El comportamiento atípico de estos remolinos también se refleja en las concentraciones integradas entre 10 y 100 m para CE-4 y AE-3, que presentaron valores promedio de NN (10 y 13 mmol m^{-2} , respectivamente), PO_4^{3-} (1 y 3.2 mmol m^{-2} , respectivamente), y H_4SiO_4 (200 y 198 mmol m^{-2} , respectivamente); estas concentraciones son notoriamente bajas para un CE y altas para un AE (Figura 15).

Muy probablemente el comportamiento biogeoquímico observado para CE-4 se debió a dos factores. Por un lado, este remolino fue anómalamente longevo y se muestreó aproximadamente al año de haberse formado, cuando, en promedio,

los remolinos anticiclónicos en el Golfo de México tienen un tiempo de vida de aproximadamente cuatro meses (Velásquez-Aristizábal comunicación personal). Un remolino maduro podría presentar dos escenarios: por un lado, podría generar un incremento de diatomeas que se verían rápidamente limitadas por la disponibilidad del H_4SiO_4 , dando lugar al cambio en la estructura de la comunidad fitoplanctónica, lo que lleva a un bajo pastoreo por parte del zooplancton de gran tamaño, y la remineralización conduciría a la exportación de ópalo. Por otro lado, un aporte más lento de nutrientes debido a vientos más débiles y de mayor duración, favorecería una floración de fitoplancton rico en carbono, un aumento del pastoreo de microzooplancton, dando como resultado, el aumento del carbono orgánico exportado en forma de pellets fecales a la zona mesopelágica (Rii et al. 2008). Por otro lado, a pesar que este remolino tenía circulación ciclónica, la profundidad de la isoterma de 20 °C indica que este remolino se encontraba en una etapa de decaimiento, ya que, de acuerdo con la posición de esta isoterma, las estaciones en este remolino debieron ser clasificadas como NE. Se ha descrito que los remolinos de mesoescala presentan un ciclo de vida, en el que al inicio presentan una intensificación, seguida de una etapa de maduración y finalmente una etapa de decaimiento, donde en un remolino ciclónico las isopícnas (y la nutriclina) inicialmente se elevan, después mantienen su posición, y finalmente se hunden hasta su profundidad inicial (Rii et al. 2008).

En el caso del remolino AE-3, su comportamiento biogeoquímico e hidrográfico fue aparentemente anómalo ya que se asemejó al agua sin influencia de remolino

(Figura 10, 12 y 13). Este remolino se gestó aproximadamente 15 días antes del muestreo, por lo que podría considerarse relativamente joven. Sin embargo, a diferencia de AE-1 y AE-2 que son remolinos de la Corriente de Lazo, los cuales se forman en el este del Golfo de México, AE-3 es de formación local, en la Bahía de Campeche. Es decir, AE-3 se originó con agua de la Bahía de Campeche, por lo que su composición original es muy diferente a la de los LCE, reflejando el mecanismo conocido como Eddy-Trapping (McGuillicuddy 2016). Villegas-Mendoza et al. (2022) propusieron el efecto de este mecanismo en la actividad metabólica microbiana en la estación C14, durante la campaña MF2 (septiembre del 2016), que previo al muestreo estuvo influenciada por un remolino anticiclónico que atrapó aguas superficiales enriquecidas en biomasa de la Bahía de Campeche. Al momento del muestreo, esta estación presentó un aumento de la biomasa fitoplanctónica y las tasas de respiración más altas en la campaña (Villegas-Mendoza et al. 2022). El aparente enriquecimiento con nutrientes en el remolino AE-3 podría deberse a que la zona de formación de este remolino en el sur de la Bahía de Campeche estuvo previamente influenciada por una circulación ciclónica. Probablemente las aguas afectadas por el paso de este remolino fueron atrapadas durante la formación de AE-3, resultando en mayores concentraciones de nutrientes de AE-3 en comparación con otros anticiclones de las campañas Malla Fina.

8. Conclusiones

- Las tres masas de agua presentes en los primeros 500 m de la columna de agua de las regiones de Perdido y Coatzacoalcos durante las campañas Malla Fina fueron CSW, GCW y TACW. La mayor variabilidad en las propiedades termohalinas se presentaron en la CSW, donde valores bajos de la salinidad reflejan la presencia ocasional de aportes de agua dulce y los valores altos indican evaporación asociada con alto tiempo de residencia, particularmente en la región de Coatzacoalcos. En contraste las variables termohalinas en la TACW son poco variables espacial y temporalmente. El GCW es una capa de transición, donde se localiza el inicio de la nutriclina, por lo que presenta alta variabilidad en el contenido de nutrientes.
- Los perfiles de las tres campañas indican que las concentraciones de NN y PO_4^{3-} en los primeros 50 m de profundidad son permanentemente bajas en las regiones de estudio y se encuentran cercanas al límite de detección, en contraste, el H_4SiO_4 no se agota en la superficie en incluso en los primeros 10 m presenta concentraciones más altas que a los 50 m de profundidad. Debajo de la capa de mezcla superior agotada en nutrientes se hace presente la nutriclina. En los casos más extremos, la nutriclina fue tan somera como 24 m y tan profunda como 111 m, siendo intensamente afectada esta profundidad por los remolinos de mesoescala. En el máximo de fluorescencia, que alcanzó los 50 m y se profundizó hasta los 90 m en

ambas regiones, en presencia de un CE tiende a ser más somero y en presencia de un AE se profundiza. En el min_O2, ubicado entre 350 y 460 m de profundidad, las concentraciones de nutrientes no son discerniblemente diferentes entre Perdido y Coatzacoalcos, a pesar de que hay una concentración de O2 ligeramente menor en Coatzacoalcos, reflejando el mayor tiempo de residencia del agua. A 500 m de profundidad encuentran los valores más altos en los tres nutrientes, cercano al máximo reportado entre 600 y 800 m.

- Los resultados de este estudio indican que los remolinos de mesoescala son el principal control de la variabilidad espacial y temporal en el contenido de nutrientes en las regiones de estudio. Por esta razón, no se observaron diferencias en el contenido de nutrientes que pudieran ser explicadas por la localización de la región de estudio ni con diferencias debidas a que los muestreos se realizaron en diferentes estaciones del año.
- También se observaron perfiles de nutrientes aparentemente anómalos considerando el tipo de estructura de mesoescala en la que fueron muestreados. Un remolino ciclónico (CE-4) fue anómalamente longevo y se muestreó aproximadamente al año de haberse formado, por lo que presentó concentraciones relativamente bajas para este tipo de estructuras. Un remolino anticiclónico (AE-3) presentó concentraciones de nutrientes relativamente altas debido que se formó poco antes del

muestreo, en la Bahía de Campeche, atrapando aguas (mecanismo Eddy-Trapping) previamente influenciadas por una circulación ciclónica. Estos resultados indican que es necesario conocer no solo la presencia o ausencia de los remolinos de mesoescala al momento del muestreo para comprender la distribución vertical de la concentración de los nutrientes en zonas influenciadas, sino también conocer la etapa de vida de los remolinos, así como la historia de la parcela de agua a partir de la cual se forman estas estructuras.

Referencias

Armstrong, F. A. J., Stearns, C. R., and Strickland, J. D. H. (1967). The Measurement of Upwelling and Subsequent Biological Process by Means of the Technicon Autoanalyzer® and Associated Equipment. *Deep Sea Res. Oceanogr. Abstracts*. 14 (3), 381–389. doi: 10.1016/0011-7471(67)90082-4

B. Martínez-López, J. Zavala-Hidalgo Seasonal and interannual variability of cross-shelf transport of chlorophyll in the Gulf of Mexico *J. Mar. Syst.*, 77 (2009), pp. 1-20.

Benitez-Nelson, C. R., and McGillicuddy, D. J. (2008). Mesoscale Physical– Biological– Biogeochemical Linkages in the Open Ocean: An Introduction to the Results of the E-Flux and EDDIES Programs. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 55 (10), 1133–1138. doi: 10.1016/j.dsr2.2008.03.001

Biggs, D. C. & Ressler, P. H., 2001. Distribution and abundance of phytoplankton, zooplankton, ichthyoplankton, and micronekton in the deepwater Gulf of Mexico. *Gulf of Mexico Science*, 2001(1), 7–29. <http://doi.org/10.18785/goms.1901.02>.

Biggs, D. C., G. S. Fargion, P. Hamilton, and R. R. Leben, 1996: Cleavage of a Gulf of Mexico Loop Current eddy by a deep-water cyclone. *J. Geophys. Res.*, 101, 20 629–20 641, <https://doi.org/10.1029/96JC01078>.

Biggs, D.C., 1992. Nutrients, plankton, and productivity in a warm-core ring in the Western Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.* 97, 2143–2154.

Biggs, D.C., Müller-Karger, F.E., 1994. Ship and satellite observations of chlorophyll stocks in interacting cyclone-anticyclone eddy pairs in the western Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.* 99, 7371–7384.

Bristow, L.A., Mohr, W., Ahmerkamp, S., Kuypers, M.M.M., 2017. Nutrients that limit growth in the ocean. *Curr. Biol.* 27, R474–R478. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.03.030>.

Bunge, L., Ochoa, J., Badan, A., Candela, J., and Sheinbaum, J. (2002). Deep Flows in the Yucatan Channel and Their Relation to Changes in the Loop Current Extension. *J. Geophys. Res. Ocean.* 107 (C12), 26-1-26–27. doi: 10.1029/2001JC001256

Candela, J., Ochoa, J., Sheinbaum, J., López, M., Pérez-Brunius, P., Tenreiro, M., Pallàs-Sanz, E., Athié, G., Arriaza-Oliveros, L., 2019. The flow through the Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.* 49, 1381–1401. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0189.1>.

Chang, Y.-L., and Oey, L.-Y. (2012). Why Does the Loop Current Tend to Shed More Eddies in Summer and Winter? *Geophys. Res. Lett.* 39, L050605. doi: 10.1029/2011GL050773

Chen, X., Schallenberg, C., Phillips, H., and Chase, Z. (2021). Biogeochemical Characteristics of Eddies in the East Australian Current Depend on Eddy Type, History and Location. *J. Mar. Syst.* 216, 103512. doi: 10.1016/j.jmarsys.2021.103512

Damien, P., Pasqueron de Fommervault, O., Sheinbaum, J., Jouanno, J., Camacho-Ibar, V. F., and Duteil, O. (2018). Partitioning of the open waters of the Gulf of Mexico based on the seasonal and interannual variability of chlorophyll concentration. *J. Geophys. Res. Oceans* 123, 2592–2614. doi: 10.1002/2017JC013456.

Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., and Falkowski, P.: Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components, *Science*, 281, 237–240, <https://doi.org/10.1126/science.281.5374.237>, 1998.

G.Y. Cervantes-Díaz, J.M. Hernández-Ayón, A. Zirino, et al., Understanding upper water mass dynamics in the Gulf of Mexico by linking physical and biogeochemical features, *Journal of Marine Systems* (2021), <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103647>

Grasshoff, K., Ehrhardt, M. and Kremling, K. (1983) *Methods of Seawater Analysis*. 2nd Edition, Verlag Chemie Weinheim, New York, 419 p.

Gutierrez-Rodriguez, A., Stukel, M. R., Lopes dos Santos, A., Biard, T., Scharek, R., Vaultot, D., Landry, M. R., & Not, F. (2019). High contribution of Rhizaria (Radiolaria) to vertical export in the California Current Ecosystem revealed by DNA metabarcoding. *ISME Journal*, 13(4), 964–976. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0322-7>

Hamilton P. (1992). Lower continental slope cyclonic eddies in the central Gulf of Mexico. *J. Geophysical Research: Oceans* 97 (C2), 2185–2200. doi: 10.1029/91JC01496

Hamilton, P., Leben, R., Bower, A., Furey, H., P´erez-Brunius, P., 2018. Hydrography of the Gulf of Mexico using autonomous floats. *J. Phys. Oceanogr.* 48, 773–794. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0205.1>.

Hawco, N. J., Barone, B., Church, M. J., Babcock-Adams, L., Repeta, 971 D. J., Wear, E. K., Foreman, R. K., Björkman, K. M., Bent, S., Van Mooy, B. A. S., Sheyn, U., DeLong, E. F., Acker, M., Kelly, R. L., Nelson, A., Ranieri, J., Clemente, T. M., Karl, D. M., & John, S. G. (2021). Iron Depletion in the Deep Chlorophyll Maximum: Mesoscale Eddies as Natural Iron Fertilization Experiments. *Global Biogeochemical Cycles*, 35(12), e2021GB007112. <https://doi.org/10.1029/2021GB007112>

Hayward, T.L., 1994. The shallow oxygen maximum layer and primary production production. *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 41, 559–574.

Heileman, S., and Rabalais, N. (2009). XV-50 Gulf of Mexico: LME\# 5. The UNEP Large Marine Ecosystem Report. A Perspective on the Changing Condition in LMEs of the World's Regional Seas Vol. 182 (Nairobi, Kenya: UNEP Regional Seas Report and Studies), 673–688.

Hernández-Hernández, N., Arístegui, J., Montero, M. F., Velasco-Senovilla, E., Baltar, F., Marrero-Díaz, Á, et al. (2020). Drivers of Plankton Distribution Across Mesoscale Eddies at Submesoscale Range. *Front. Mar. Sci.* 7, 667. doi: 10.3389/fmars.2020.00667

Herring, J.H., 2010. Gulf of Mexico hydrographic climatology and method of synthesizing subsurface profiles from the satellite sea surface height anomaly. US. Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Ocean Service. Coastal Survey Development Laboratory. Report 122, 63 pp.

Huang, J., and Xu, F. (2018). Observational Evidence of Subsurface Chlorophyll Response to Mesoscale Eddies in the North Pacific. *Geophys. Res. Lett.* 45 (16), 8462–8470. doi: 10.1029/2018GL078408

Hydes, D.J., Aoyama, M., Aminot, A., Bakker, K., Becker, S., Coverly, S., Daniel, A., Dickson, A.G., Grosso, O., Kerouel, R., van Ooijen, J., Sato, K., Tanhua, T., Woodward, E.M.S., Zhang, J.Z., 2010. Determination of dissolved nutrients (N, P, Si) in seawater with high precision and inter-comparability using gas-segmented continuous flow analysers. In: The GO-SHIP Repeat Hydrography Manual IOCCP Report.

J. Villegas-Mendoza, E. Gómez-Ocampo, J. Velásquez-Aristizábal, et al., Microbial metabolic activity in two basins of the Gulf of Mexico influenced by mesoscale structures, *Journal of Marine Systems*, Volume 234, 2022, 103781, ISSN 0924-7963, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2022.103781>.

Jouanno, J., Ochoa, J., Pall`as-Sanz, E., Sheinbaum, J., Andrade-Canto, F., Candela, J., Molines, J.M., 2016. Loop current frontal eddies: formation along the Campeche Bank and impact of coastally trapped waves. *J. Phys. Oceanogr.* 46, 3339–3363. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0052.1>.

L. Guerrero, J. Sheinbaum, I. Mariño-Tapia, J.J. González-Rejón, P. Pérez-Brunius Influence of mesoscale eddies on cross-shelf exchange in the western Gulf of Mexico *Cont. Shelf Res.*, 209 (2020), Article 104243, 10.1016/j.csr.2020.104243.

Lee-Sánchez, E., Camacho-Ibar, V. F., Velásquez-Aristizábal, J. A., Valencia-Gasti, J. A., and Samperio-Ramos, G. (2022). Impacts of Mesoscale Eddies on the Nitrate Distribution in the Deep-Water Region of the Gulf of Mexico. *J. Mar. Syst.* 229, 103721. doi: 10.1016/j.jmarsys.2022.103721.

Linacre, L., Durazo, R., Camacho-Ibar, V., Selph, K.E., Lara-Lara, J.R., Mirabal- Gómez, U., Bazán-Guzmán, C., Lago-Lest´on, A., Fern´andez-Martín, E.M., Sidón- Ceseña, K., 2019. Picoplankton carbon biomass assessments and distribution of *Prochlorococcus* ecotypes linked to Loop Current Eddies during summer in the southern Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res. Ocean.* 124 <https://doi.org/10.1029/2019JC015103>, 2019JC015103.

Linacre, L., Lara-Lara, R., Camacho-Ibar, V., Herguera, J.C., Bazán-Guzmán, C., Ferreira- Bartrina, V., 2015. Distribution pattern of picoplankton carbon biomass linked to mesoscale dynamics in the southern Gulf of Mexico during winter conditions. *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res.* 106, 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.09.009>.

Linacre, L., Sánchez-Robles, C., Mirabal-Gómez, U., Lara-Lara, J.R., Bazán-Guzmán, C., 2021. Cell carbon content and biomass assessments of dinoflagellates and diatoms

in the oceanic ecosystem of the southern Gulf of Mexico. PLoS One 16, e0247071. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247071>.

Llopis Monferrer N, Biard T, Sandin MM, Lombard F, Picheral M, Elineau A, Guidi L, Leynaert A, Tréguer PJ and Not F (2022) Siliceous Rhizaria abundances and diversity in the Mediterranean Sea assessed by combined imaging and metabarcoding approaches. *Front. Mar. Sci.* 9:895995. doi: 10.3389/fmars.2022.895995

Martínez-López, B., Zavala-Hidalgo, J., 2009. Seasonal and interannual variability of cross-shelf transports of chlorophyll in the Gulf of Mexico. *Journal of Marine Systems* 77 (2009), 1–20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.10.002>.

McGillicuddy, D. J. (2016). Mechanisms of Physical-Biological-Biogeochemical Interaction at the Oceanic Mesoscale. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010814-015606>.

McGillicuddy, D. J., and Robinson, A. R. (1997). Eddy-Induced Nutrient Supply and New Production in the Sargasso Sea. *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 44 (8), 1427–1450. doi: 10.1016/S0967-0637(97)00024-1

Müller-Karger, F., Smith, J., Werner, S., Chen, R., Roffer, M., Liu, Y., et al. (2015). Natural Variability of Surface Oceanographic Conditions in the Offshore Gulf of Mexico. *Prog. Oceanogr.* 134, 54–76. doi: 10.1016/j.pocean.2014.12.007.

Murphy, J.A.M.E.S., Riley, J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27, 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5).

Pasqueron De Fommervault, O., Perez-Brunius, P., Damien, P., Camacho-Ibar, V.F., Sheinbaum, J., 2017. Temporal variability of chlorophyll distribution in the Gulf of Mexico: bio-optical data from profiling floats. *Biogeosciences* 14, 5647–5662. <https://doi.org/10.5194/bg-14-5647-2017>.

Pawlowicz, J. (2013) TEOS-10 Primer: “What every oceanographer needs to know about TEOS-10”, available from https://www.teos-10.org/pubs/TEOS-10_Primer.pdf

Pérez-Brunius, P., García-Carrillo, P., Dubranna, J., et al., 2013. Direct observations of the upper layer circulation in the southern Gulf of Mexico. *Deep-Sea Res. II* 85, 182–194.

Portela, E., Tenreiro, M., Pallàs-Sanz, E., Meunier, T., Ruiz-Angulo, A., Sosa-Gutiérrez, R., & Cusí, S., 2018. Hydrography of the central and western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1–16. <http://doi.org/10.1029/2018JC013813>

Rii, Y.M., Brown, S.L., Nencioli, F., Kuwahara, V., Dickey, T., Karl, D.M., Bidigare, R.R., 2008. The transient oasis: nutrient-phytoplankton dynamics and particle export in Hawaiian lee cyclones. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 55, 1275–1290. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.01.013>.

Rudnick, D. L., Gopalakrishnan, G., and Cornuelle, B. D. (2015). Cyclonic Eddies in the Gulf of Mexico: Observations by Underwater Gliders and Simulations by Numerical Model. *J. Phys. Oceanogr.* 45 (1), 313–326. doi: 10.1175/JPO-D-14-0138.1.

Sarma, V. V. S. S., Jagadeesan, L., Dalabehera, H. B., Rao, D. N., Kumar, G. S., Durgadevi, D. S., et al. (2018). Role of Eddies on Intensity of Oxygen Minimum Zone in the Bay of Bengal. *Cont. Shelf Res.* 168, 48–53. doi: 10.1016/j.csr.2018.09.008

Schmitz Jr, W. J. and McCartney, M. S.: On the north Atlantic circulation, *Rev. Geophys.*, 31, 29–49, <https://doi.org/10.1029/92RG02583>, 1993.

Sidón-Ceseña K., Martínez-Mercado M.A., Chong-Robles J., Response of microbial eukaryote community to the oligotrophic 1 waters of the Gulf of Mexico: a plausible scenario for warm and stratified oceans (2023), <https://doi.org/10.1101/2023.07.26.548711>.

Sturges, W., Leben, R., 2000. Frequency of ring separations from the loop current in the Gulf of Mexico: a revised estimate. *Journal of Physical Oceanography* 30 (7), 1814–1819.

Turner, J.T., 2015. Zooplankton fecal pellets, marine snow, phytodetritus and the ocean's biological pump. *Prog. Oceanogr.* 130, 205–248. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.08.005>.

Valencia-Gasti, J. A., Camacho-Ibar, V. F., and Herguera, J. C. (2022). Water mass structure and mixing fractions in the deepwater region of the Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res. Oceans.* 127, e2021JC017705. doi: 10.1029/2021jc017705.

Velásquez-Aristizábal, J. A., Camacho-Ibar, V. F., Durazo, R., Valencia-Gasti, J. A., Lee-Sánchez, E., and Trasviña-Castro, A. (2022). Nitracentric/Hydrographic classification and prediction of nitrate profiles for oceanographic stations under the influence of mesoscale eddies in the Gulf of Mexico. *Front. Mar. Sci.* 9. doi: 10.3389/ fmars.2022.827574.

Vidal, V.M.V., Vidal, F.V., Hernández, A.F., Meza, E., Zambrano, L., 1994. Winter water mass distributions in the western Gulf of Mexico affected by a colliding anticyclonic ring. *J. Oceanogr.* 50, 559–588. <https://doi.org/10.1007/BF02235424>.

Williams, A.K., McInnes, A.S., Rooker, J.R., Quigg, A., 2015. Changes in microbial plankton assemblages induced by mesoscale oceanographic features in the Northern Gulf of Mexico. PLoS One 10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138230>.