

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



**INFLUENCIA DE REMOLINOS DE MESOESCALA EN LA
DISTRIBUCIÓN DE NUTRIENTES EN LA REGIÓN CENTRAL DEL
GOLFO DE CALIFORNIA, MÉXICO.**

T E S I S

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

MAESTRA EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA

NEVIA CAROLINA ALFARO CASTILLO

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO. AGOSTO DE 2013

Resumen.

Los remolinos ciclónicos de mesoescala son estructuras físicas consideradas como mecanismos potenciales de aporte de nutrientes hacia la zona eufótica y en consecuencia estimulan el aumento de la biomasa fitoplanctónica. El objetivo de este trabajo fue estudiar la influencia de los remolinos de mesoescala en la distribución de nutrientes en la región central del Golfo de California, que durante verano, la época de baja producción primaria superficial, presenta la recurrente manifestación de remolinos de mesoescala. La presencia de los remolinos estudiados se detectó desde el mes de mayo de 2011 entre la Cuenca de Guaymas y la Cuenca del Carmen, mediante el análisis de imágenes satelitales de clorofila *a*. La campaña de muestreo se realizó del 27 de Julio al 4 de Agosto de 2011 a bordo del B/O "El Puma". El diseño de muestreo incluyó 4 transectos: el transecto D con influencia de mezcla vertical en la región de las grandes islas; el transecto B caracterizado por la intensa estratificación y los transectos A y C con los que se caracterizó el remolino ciclónico de mesoescala CE-1. Se obtuvieron muestras de agua para el análisis de nitrato más nitrito (N+N), fosfato y silicato desde la superficie hasta una profundidad de 150 m. El remolino CE-1 midió aproximadamente 160 km de diámetro, y durante el muestreo probablemente se encontraba en la etapa madura del ciclo de vida de remolinos, mientras que el diámetro del núcleo del remolino en la base de la zona eufótica (60 m) fue de 40 km. Las concentraciones de nutrientes en el núcleo del remolino a 150 m de profundidad fueron de 26-28 μM de N+N, 2.9 μM de fosfato y 47-49 μM de silicato, mientras que las concentraciones encontradas a la misma profundidad en una zona sin influencia del remolino fueron de 24.4 μM , 2.8 μM , 44.8 μM , respectivamente. De acuerdo con los datos de densidad obtenidos con lances profundos de CTD, el agua que arribó a 150 m de profundidad por efecto del remolino provino desde 225-250 m. El agua que se localizó en la base de la zona eufótica en el núcleo del remolino provino desde 100 m de profundidad y presentó una concentración de nutrientes de 22 μM de N+N, 2.4 μM de fosfato y 34 μM de silicato, que contrastan con 12 μM de N+N, 1.7 μM de fosfato y 17 μM de silicato fuera del núcleo del remolino. Las concentraciones integradas de N+N y fosfato en la capa de 0 a 150 m, fueron similares a las estimadas en la estación D03 de la región de las grandes islas, la cual presentó altos niveles de nutrientes debido al efecto de la mezcla vertical de la columna de agua. En la capa del máximo profundo de clorofila (DCML por sus siglas en inglés) el núcleo del remolino CE-1 presentó las concentraciones más altas. Las razones N:P y Si:N indican que el nitrógeno es el nutriente limitante del crecimiento fitoplanctónico en esta región. La distribución vertical del parámetro N^* indica la dominancia del proceso de fijación de nitrógeno en la capa de mezcla, y la distribución horizontal indica que este proceso es más intenso en las zonas con mayor estratificación de la columna de agua donde las condiciones fueron más favorables para los diazótrofos. Con base a las observaciones de este trabajo, se propone que, los remolinos ciclónicos de mesoescala que aparecen bajo condiciones de verano en la región central del Golfo de California, funcionan como un mecanismo de bombeo de nutrientes a la capa subsuperficial, lo cual favorece el incremento de la biomasa fitoplanctónica y en consecuencia contribuyen con el aumento de la exportación de la producción hacia el fondo de este mar marginal mexicano.

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

INFLUENCIA DE REMOLINOS DE MESOESCALA EN LA
DISTRIBUCIÓN DE NUTRIENTES EN LA REGIÓN CENTRAL DEL
GOLFO DE CALIFORNIA, MÉXICO.

T E S I S

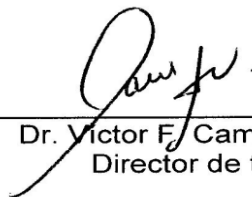
QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA

NEVIA CAROLINA ALFARO CASTILLO

Aprobada por:



Dr. Víctor F. Camacho Ibar
Director de tesis



Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa
Sinodal



Dr. Eduardo Santamaría del Ángel
Sinodal

Agradecimientos.

Especialmente a mi familia: Raúl, Nevia, Ruli, Leslie, Eli, Santiago y Narciso por su confianza, apoyo, amor y comprensión.

A mi director de tesis Dr. Víctor F. Camacho Ibar por permitirme trabajar con usted, por su disponibilidad de tiempo para atender mis múltiples dudas y sobre todo por su asombrosa paciencia.

A mis sinodales Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa y Dr. Eduardo Santamaría Del Ángel por todo el apoyo, consejos, comentarios sobre mi trabajo.

Al Dr. Eduardo Santamaría por facilitarme las imágenes satelitales de clorofila *a* para este trabajo.

Al M. en C. Eduardo “Lalo” Ortiz Campos por la elaboración de los análisis de nutrientes de este trabajo y por compartirme tus conocimientos.

Al Dr. Víctor M. Godínez por facilitar la base de datos hidrográfica del crucero GOLCA-1107.

A la Dra. Laura Sánchez Velasco (CICIMAR-IPN) y al Dr. Miguel Lavín (CICESE) responsables del proyecto SEP-CONACyT 2010-2013 “Asociaciones de larvas de peces, hábitat trófico y su relación con la estructura física en giros del Golfo de California” a cargo de la Dra. Laura Sánchez Velasco (CICIMAR-IPN), con el cual se realizó el crucero para la toma de muestras de nutrientes de este trabajo.

Al CONACyT por el apoyo económico otorgado durante el posgrado.

Al proyecto interno IIO-UABC a cargo del Dr. Víctor F. Camacho Ibar por el financiamiento de los análisis de nutrientes.

Al Sr. Héctor “Tito” Tejeda y Sra. Maricela Carrillo por su apoyo desde el inicio mi carrera profesional, por sus consejos y buenos deseos.

A TODOS mis compañeros de posgrado que hicieron más ameno el recorrido por el sendero de la maestría.

A Martha Robles, Eréndira Canales, Gaby Aguilar, Julieta, Linda y Teresa por su confianza y amistad.

A mis amigas y amigos Vallartenses que aún estando tan lejos siguen fastidiándome: Dalia, Sayaka, Luisana, Thelma, Rogelio “Bull”, Ricardo “chivita”, Christyan “Yuca”, Luis Alvarado ¡Los quiero!

Índice.

1. Introducción	1
1.1 <i>Descripción física de los remolinos de mesoescala</i>	3
1.2 <i>Nutrientes en remolinos de mesoescala</i>	6
1.2.1 <i>Importancia biogeoquímica de los remolinos ciclónicos</i>	6
1.2.2 <i>Distribución de nutrientes en remolinos ciclónicos</i>	7
1.3 <i>Importancia del Golfo de California</i>	10
1.3.1 <i>Antecedentes de estudios sobre nutrientes en el centro del Golfo de California</i>	10
1.4 <i>N*</i>	13
2. Hipótesis	14
3. Objetivos	14
3.1 <i>Objetivo general</i>	14
3.2 <i>Objetivos particulares</i>	15
4. Área de estudio	15
5. Metodología	18
5.1 <i>Monitoreo de los remolinos</i>	18
5.2 <i>Diseño de muestreo</i>	18
5.3 <i>Recolecta y análisis de nutrientes</i>	22
6. Resultados	23
6.1 <i>Distribución de nutrientes</i>	28
6.2 <i>Concentraciones integradas de nutrientes</i>	45
6.3 <i>Razones de nutrientes</i>	48
6.4 <i>N*</i>	50
7. Discusión	55
7.1 <i>Características físicas del área de estudio - Transectos B y D</i>	56
7.2 <i>Características físicas del área con remolinos - Transectos A y C</i>	59
7.3 <i>Caracterización de la zona eufótica</i>	61
7.4 <i>Efecto de los remolinos de mesoescala en la distribución de nutrientes</i>	64

7.5 <i>Distribución de nutrientes en la capa eufótica y su relación con el máximo profundo de clorofila a.</i>	68
7.6 <i>Razones de nutrientes.</i>	76
7.7 <i>Fijación de nitrógeno.</i>	79
8. Conclusiones.	83
9. Referencias.	86

Lista de tablas.

Tabla I. Características de las masas de agua del Golfo de California (modificada de Torres – Orozco, 1993).....	17
Tabla II. Concentración promedio e intervalos de concentración de nutrientes (μM) en la capa de mezcla para la zona fuera del remolino y núcleo del remolino (20 m de profundidad) del transecto A.....	38
Tabla III. Concentración promedio e intervalos de concentración de nutrientes (μM) en la capa de mezcla para las cuatro zonas del transecto C. Borde del remolino CE-1 (30 m de profundidad), núcleo del remolino CE-1 (15 m), zona de cizallamiento (25 m) y borde del remolino CE-2 (10 m).....	41
Tabla IV. Concentración promedio de nutrientes (μM) a 150 m de profundidad para las cuatro zonas del transecto C.	42
Tabla V. Concentraciones integradas de nutrientes (mmol m^{-2}) en la zona eufótica (0 – 60 m).	46
Tabla VI. Concentraciones integradas de nutrientes (mmol m^{-2}) de 0 hasta 150 m de profundidad.	48
Tabla VII. Características físico-químicas de la capa de mezcla para la zona del núcleo del remolino, el transecto B y la zona de umbrales durante el verano.	64

Lista de figuras.

- Figura 1.** Representación esquemática de las características de los remolinos ciclónicos (izquierda) y de los remolinos anticiclónicos (derecha). Figura modificada de Ganachaud *et al.*, 2011..... 4
- Figura 2.** Ciclo de vida de los remolinos ciclónicos de mesoescala. Las líneas discontinuas señalan la etapa del ciclo de vida y las flechas continuas de colores indican los efectos en cada etapa del remolino, los recuadros muestran el desplazamiento de las isopícnas en cada una de las etapas con respecto a la profundidad y distancia. Esquema modificado de Sweeney *et al.* (2003)..... 9
- Figura 3.** Ubicación del sistema de cuatro remolinos en verano de 2011 (29 de Julio) en la región central del Golfo de California, con base a la concentración superficial de clorofila *a* (mg m^{-3}). En donde se observan dos remolinos ciclónicos (CE) y dos remolinos anticiclónicos (ACE). Imagen satelital obtenida de MODIS-Aqua, proporcionada por el Dr. Eduardo Santamaría del Ángel..... 19
- Figura 4.** Ubicación geográfica de los transectos (letra) y estaciones (números) realizados durante la campaña de muestro del proyecto GOLCA-1107. 20
- Figura 5.** Secciones verticales de densidad (kg m^{-3}) hasta 300 m de profundidad para el transecto B (a), transecto A (b), transecto C (c) y transecto D (d). Las isopícnas se muestran en color negro. 24
- Figura 6.** Secciones verticales de N+N (μM): a) transecto B, b) transecto A, c) transecto C y d) transecto D. Las isolíneas negras son las concentraciones de referencia para indicar la profundidad del inicio ($1 \mu\text{M}$) y base de la nitraclina ($20 \mu\text{M}$). Las isopícnas (kg m^{-3}) se señalan en color blanco..... 29
- Figura 7.** Secciones verticales de fosfato (μM): a) transecto B, b) transecto A, c) transecto C y d) transecto D. Las isolíneas negras son las concentraciones de referencia para indicar la profundidad del inicio ($0.8 \mu\text{M}$) y base de la nutriclina ($2 \mu\text{M}$). Las isopícnas (kg m^{-3}) se señalan en color blanco. 30
- Figura 8.** Secciones verticales de silicato (μM): a) transecto B, b) transecto A, c) transecto C y d) transecto D. Las isolíneas negras son las concentraciones

de referencia para indicar la profundidad del inicio ($10 \mu\text{M}$) y base de la nutriclina ($30 \mu\text{M}$). Las isopicnas (kg m^{-3}) se señalan en color blanco. 31

Figura 9. Perfiles verticales de N+N (μM) para las zonas fuera del remolino (a), núcleo del remolino (b), bordes de remolinos (c) y umbrales (d). Las barras horizontales indican el error estándar del promedio..... 33

Figura 10. Perfiles verticales de fosfato (μM) para las zonas fuera del remolino (a), núcleo del remolino (b), bordes de remolinos (c) y umbrales (d). Las barras horizontales indican el error estándar del promedio..... 34

Figura 11. Perfiles verticales de silicato (μM) para las zonas fuera del remolino (a), núcleo del remolino (b), bordes de remolinos (c) y umbrales (d). Las barras horizontales indican el error estándar del promedio..... 35

Figura 12. Perfiles verticales promedio de densidad (kg m^{-3}) para las zonas: fuera del remolino (a), núcleo del remolino CE-1 (b), bordes de remolinos (c) y umbrales (d). 37

Figura 13. Perfiles verticales de la razón N/P vs. Densidad (a) y la razón Si/N vs. Densidad (b). Se utilizaron todos los datos obtenidos en este estudio y se agruparon por transecto. En la esquina inferior derecha (b) se muestra la ampliación en la escala a partir de 23 kg m^{-3} 49

Figura 14. Diagrama de N+N vs fosfato (izquierdo) y diagrama de silicato vs. N+N (derecha). Utilizando todos los datos del muestreo. 51

Figura 15. Perfiles verticales de N^* (μM) para las zonas: fuera del remolino (a), núcleo del remolino (b), bordes de remolinos (c) y umbrales (d). Las barras horizontales indican el error estándar del promedio..... 52

Figura 16. Secciones verticales de N^* (μM) para cada transecto: (a) transecto B, (b) transecto A, (c) transecto C y (d) transecto D..... 54

Figura 17. Sección vertical de Chla (mg m^{-3}) derivada a partir de fluorómetro para el transecto A (izquierda) y el transecto C (derecha). Tomada de Sánchez-Velasco *et al.*, 2013..... 72

Índice de ecuaciones.

Ecuación 1. Parametro N* adaptada para el Pacífico (Deutsch *et al.*, 2001) .. 13

Ecuación 2. Parametro N* ajustada para la estequiometria de la desnitrificación (White *et al.*, 2013) 22

1. Introducción

Existen varios mecanismos físicos que permiten que las aguas en la zona eufótica de los océanos sean abastecidas con nutrientes provenientes de aguas más profundas. En algunas regiones del océano, dicho abasto vertical de nutrientes determina la magnitud de la producción primaria fitoplanctónica, y a su vez, la producción secundaria y la magnitud de la transferencia de energía a través de las redes tróficas marinas. En el caso del Golfo de California (GoC), por ejemplo, siendo este un sistema altamente productivo (Zeitzschel, 1969) con tasas de producción primaria oscilando entre 1 y en algunas regiones hasta $4 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Kahru *et al.*, 2004), se debe presentar un abasto importante de nutrientes hacia la zona eufótica. A nivel de toda la cuenca, se ha sugerido que el abasto vertical de nutrientes hacia las aguas superficiales ocurre durante todo el año principalmente en la región de las Grandes Islas debido a la advección inducida por la circulación termohalina y a la mezcla por mareas, y también ocurre el bombeo de nutrientes a lo largo de las costas promovido por las surgencias particularmente durante el invierno (Álvarez-Borrego *et al.*, 1978; Torres-Valdés, 2000; Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 2001; Torres-Delgado, 2008). En el caso del N, en años recientes también se ha sugerido que durante el verano en el GoC puede haber un aporte importante asociado con la fijación de N (White *et al.*, 2007) y también se ha sugerido que los aportes continentales asociados

con fuentes agrícolas pueden generar florecimientos notables (Beman *et al.*, 2005).

Los remolinos de mesoescala son un mecanismo potencial de bombeo vertical de nutrientes que no ha sido explorado para el Golfo de California en particular, y muy poco estudiado para mares altamente productivos en general. En contraste, la fertilización de la zona eufótica de mares oligotróficos mediante bombeo por remolinos de mesoescala ha sido ampliamente documentada en años recientes, particularmente para el Mar de los Sargazos y para el Pacífico Central alrededor de Hawai'i (McGillicuddy *et al.*, 2007; McGillicuddy *et al.*, 1998; Li y Hansel, 2008; Bibby y Moore, 2011; Rii *et al.*, 2008; Benitez-Nelson *et al.*, 2007; Mahaffey *et al.*, 2008; Dickey *et al.*, 2008; Bidigare *et al.*, 2003; Seki *et al.*, 2001). Se ha reportado que en estas regiones, los remolinos ciclónicos (remolinos que en el hemisferio norte rotan en sentido opuesto a las manecillas del reloj) son capaces de elevar las isopícnas en el centro del remolino varias decenas de metros (Nencioli *et al.*, 2008; Dickey *et al.*, 2008), de tal manera que aguas relativamente profundas y ricas en nutrientes pueden ser elevadas hasta la zona eufótica (McGillicuddy *et al.*, 1999). Dicha elevación induce un incremento en la concentración de nutrientes lo que estimula la producción primaria y en consecuencia un incremento en la biomasa planctónica (Falkowski *et al.*, 1991; Seki *et al.*, 2001; Bidigare *et al.*, 2003), cambios en la estructura de la comunidad fitoplanctónica, y en ocasiones exportación de carbono hacia el fondo (Benitez-Nelson *et al.*, 2007; Bibby *et al.*,

2008; Bibby y Moore, 2011; Brown *et al.*, 2008; Mouriño-Carballido, 2009). Ya que los remolinos de mesoescala son estructuras físicas muy comunes en el GoC (Pegau *et al.*, 2002; Zamudio *et al.*, 2008), es posible que estos contribuyan como mecanismos de fertilización del golfo, particularmente en la región central durante los meses de verano, periodo en el que ocurre estratificación intensa. Si bien los análisis de imágenes de satélite indican que el verano es una época de baja fertilidad en el golfo central (Kahru *et al.*, 2004), la información obtenida con esta herramienta está limitada a la capa superficial del océano. En el GoC ocurren máximos subsuperficiales de clorofila entre 20 y 60 m de profundidad (White *et al.*, 2007), que no se pueden detectar por satélite, y que pueden representar una zona importante para la transferencia de energía en las redes tróficas de la región. Existe el potencial que los remolinos ciclónicos representen una fuente de nutrientes que abastece al fitoplancton observado en la zona del máximo de clorofila, por lo que su estudio contribuirá a un conocimiento más detallado de los controles de la fertilidad de este mar marginal.

1.1 Descripción física de los remolinos de mesoescala.

Los remolinos de mesoescala en el océano son estructuras físicas capaces de transportar agua verticalmente a través de la columna de agua. La generación de estos remolinos es por diversos forzamientos como interacciones de corrientes con otras corrientes, la topografía de la región e incluso la interacción de corrientes con remolinos; también se forman por el

forzamiento del viento sobre la superficie del océano (Colling, 2001). Su duración es variable, algunos duran semanas, otros duran meses o incluso años; además se encuentran simultáneamente en diferentes lugares e inclusive varios en la misma región (Chelton *et al.*, 2011). El tamaño de los remolinos de mesoescala varía entre 50-200 km de diámetro y el núcleo puede alcanzar profundidades de 2000 m (Klein y Lapeyre, 2009).

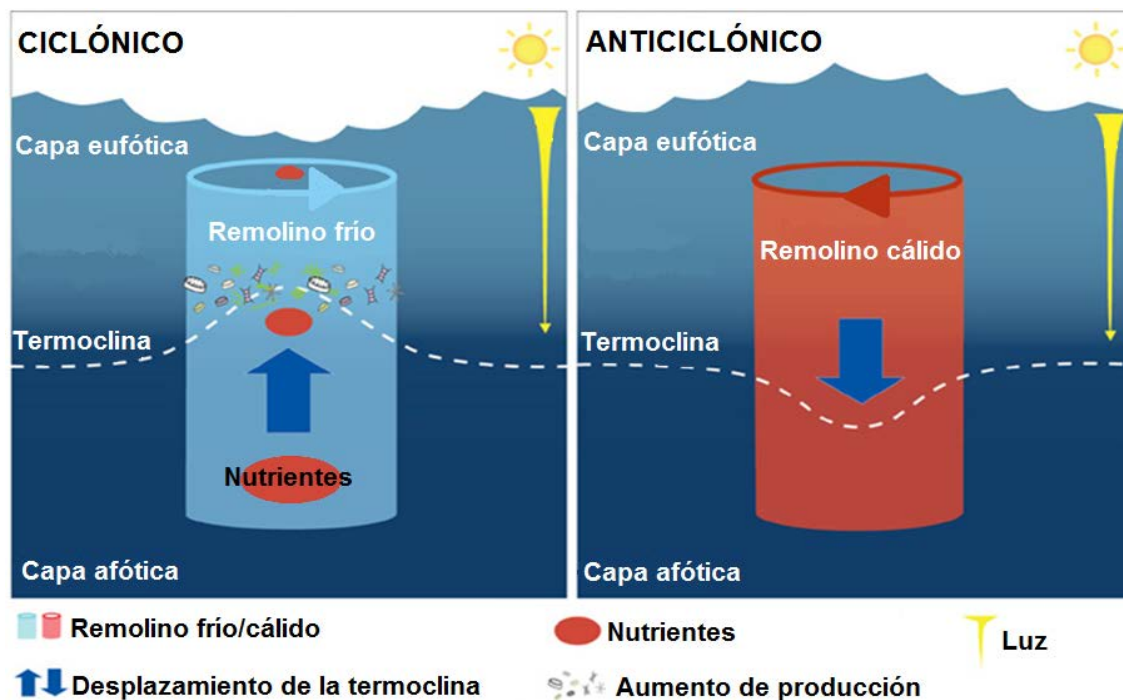


Figura 1. Representación esquemática de las características de los remolinos ciclónicos (izquierda) y de los remolinos anticiclónicos (derecha). Figura modificada de Ganachaud *et al.*, 2011.

Los remolinos de mesoescala se clasifican en ciclónicos, anticiclónicos y de “agua modo” (McGillicuddy *et al.*, 1999). En el hemisferio norte, los

remolinos ciclónicos rotan en sentido contrario a las manecillas del reloj, presentan hundimiento de la superficie del mar, elevación de las isopícnas y baja temperatura superficial (McGillicuddy *et al.*, 1999; Fig. 1), reflejando el transporte de agua profunda hacia la superficie; también son conocidos como remolinos de núcleo frío. En el hemisferio norte, por efecto de la fuerza de Coriolis, la dirección del flujo del remolino ciclónico en la superficie del mar es desviada hacia la derecha ocasionando que parte de dicho flujo se transporte fuera del remolino, es por esto que hay una depresión en la superficie del mar; para compensar la salida de agua en la superficie, se presenta una divergencia que promueve la elevación de la termoclina y la introducción de agua profunda hacia la zona eufótica (Colling, 2001; Chavanne *et al.*, 2002). Por el contrario los remolinos anticiclónicos tienden a elevar la superficie del mar y hundir las isopícnas, su rotación es en el sentido de las manecillas del reloj, y son denominados remolinos de núcleos cálidos por presentar altas temperaturas en la superficie (McGillicuddy *et al.*, 1999; Fig. 1); al igual que los remolinos ciclónicos la fuerza de Coriolis actúa sobre la dirección del flujo, pero en este caso el agua es acumulada dentro del remolino ocasionando que la superficie del mar tenga forma de domo y por convergencia el agua acumulada en la superficie es transportada hacia el fondo forzando el hundimiento de la termoclina (Colling, 2001; Chavanne *et al.*, 2002). Los remolinos de agua modo están formados con una masa de agua de densidad homogénea; presentan

bajas temperaturas en la superficie, el nivel del mar y las isopícnas son elevadas pero su rotación es en el sentido de las manecillas del reloj.

1.2 *Nutrientes en remolinos de mesoescala.*

1.2.1 Importancia biogeoquímica de los remolinos ciclónicos.

La interacción entre la física y los procesos biogeoquímicos en los remolinos de mesoescala es compleja y muy dinámica. Aunque dicha interacción no está aún completamente entendida, gracias a proyectos como EDDies Dynamics, Mixing, Export and Species composition (EDDIES) en el Atlántico Norte (en el Mar de los Sargazos) y Eddy Flux (E-Flux) en el Pacífico Norte (islas Hawaianas), se ha logrado determinar que en las zonas donde se presentan los remolinos ciclónicos hay transporte de agua profunda rica en nutrientes hacia la zona eufótica (McGillicuddy *et al.*, 2007) y por lo tanto, la distribución de nutrientes es modificada (Benitez-Nelson *et al.*, 2007; Palter *et al.*, 2005; Bibby y Moore, 2011; Mahaffey *et al.*, 2008; Li y Hansel, 2008; Rii *et al.*, 2008; Forryan *et al.*, 2012). La inyección de nutrientes promueve un aumento de la producción primaria y de biomasa fitoplanctónica (Falkowski *et al.*, 1991; Seki *et al.*, 2001; Bidigare *et al.*, 2003; Fig. 1), cambios en la estructura de la comunidad fitoplanctónica, algunas ocasiones hay exportación de carbono hacia el fondo y otras como en el caso del remolino Opal hay exportación de sílice biogénico (Benitez-Nelson *et al.*, 2007; Bibby *et al.*, 2008; Bibby y Moore, 2011; Brown *et al.*, 2008; Mouriño-Carballido, 2009; Sweeney *et*

al., 2003). La contribución de los aportes de nutrientes por remolinos ciclónicos a la producción primaria puede ser muy importante en algunas regiones. Por ejemplo, Mahaffey *et al.* (2008) estimaron la concentración de N+N (nitrato más nitrito) en la zona eufótica (hasta 110 m de profundidad) durante la formación del remolino Ciclónico Opal, la cual fue de $213 \pm 59 \text{ mmol m}^{-2}$, ellos indican que solo el $68 \pm 19\%$ de dicha concentración mantiene la demanda de nitrógeno fitoplanctónica; el porcentaje restante ($32 \pm 6\%$) no es asimilado. Benitez-Nelson *et al.* (2007) indican que si todo el N + N encontrado en la zona eufótica ($147 \pm 32 \text{ mmol m}^{-2}$) del Ciclónico Opal hubiera sido completamente usado por el fitoplancton, la producción nueva durante el tiempo de vida del remolino (4-5 semanas) sería equivalente a la mitad de la producción nueva anual de la región ($2 \text{ mol C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$). En la Cuenca de Islandia en el Atlántico Norte, los flujos verticales de nutrientes forzados por los remolinos (nitrato: $0.13 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, silicato: $0.08 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, fosfato: $8.6 \times 10^{-3} \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), contribuyen con más del 14% del suministro de nutrientes por mezcla profunda de invierno en la región (Forryan *et al.*, 2012).

1.2.2 Distribución de nutrientes en remolinos ciclónicos.

En los océanos generalmente la zona eufótica está agotada en nutrientes, principalmente en nitrógeno por el consumo biológico de la comunidad fitoplanctónica. Los remolinos ciclónicos muestran una clara influencia sobre la distribución de nutrientes en la zona eufótica, con aumento en concentraciones debido a la elevación de agua profunda rica en nutrientes.

La modificación de la distribución de nutrientes en la zona eufótica, se puede identificar por el ascenso de isopícnas, isotermas e isolíneas de nutrientes; ejemplo, Li y Hansel (2008) muestran la elevación de casi 90 m de la isolínea de 2 μM de nitrato más nitrito; ésta comúnmente se localiza a ~240 m y fue encontrada a ~150 m de profundidad.

La distribución de nutrientes es diferente en cada remolino ciclónico, esto depende principalmente de la etapa de vida en la que se encuentre el remolino durante el muestreo. La etapa del ciclo de vida puede determinarse por la forma de las isolíneas de nutrientes, densidad o temperatura. El ciclo de vida de los remolinos propuesto mediante un modelo conceptual por Sweeney y colaboradores (2003) describe tres estados (Fig. 2). El estado de "Intensificación" es cuando el remolino se está formando, después de poco tiempo las isolíneas nutrientes comienzan a elevarse presentando una ligera forma de domo; entonces el aporte de nutrientes es introducido a la zona eufótica. En el estado de "Maduración" las isolíneas de nutrientes llegan a su máxima elevación, maximizándose la disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica por efecto del remolino, y presentándose respuestas biológicas como el incremento en la biomasa fitoplanctónica, aumento en la productividad primaria, y por tanto la estimulación en la exportación de producción. Posterior a la maduración, en el estado de "Decaimiento" la introducción de nutrientes disminuirá por la relajación de las isopícnas y los nutrientes serán agotados por el consumo biológico, en consecuencia la productividad primaria decrecerá

aunque, la exportación de producción continuará por un tiempo mientras el remolino se disipa. Rii *et al.* (2008) compararon la distribución de nutrientes de los remolinos ciclónicos Opal y Noah en las islas Hawaianas, e indicaron que el remolino Opal fue muestreado en etapa madura, mientras que el Noah en etapa de decaimiento, debido a que encontraron la isopicna 24.0 kg m^{-3} en el remolino Opal elevada $\sim 120 \text{ m}$, mientras que en el remolino Noah la misma isopicna se encontró elevada $\sim 40 \text{ m}$ de su posición inicial.

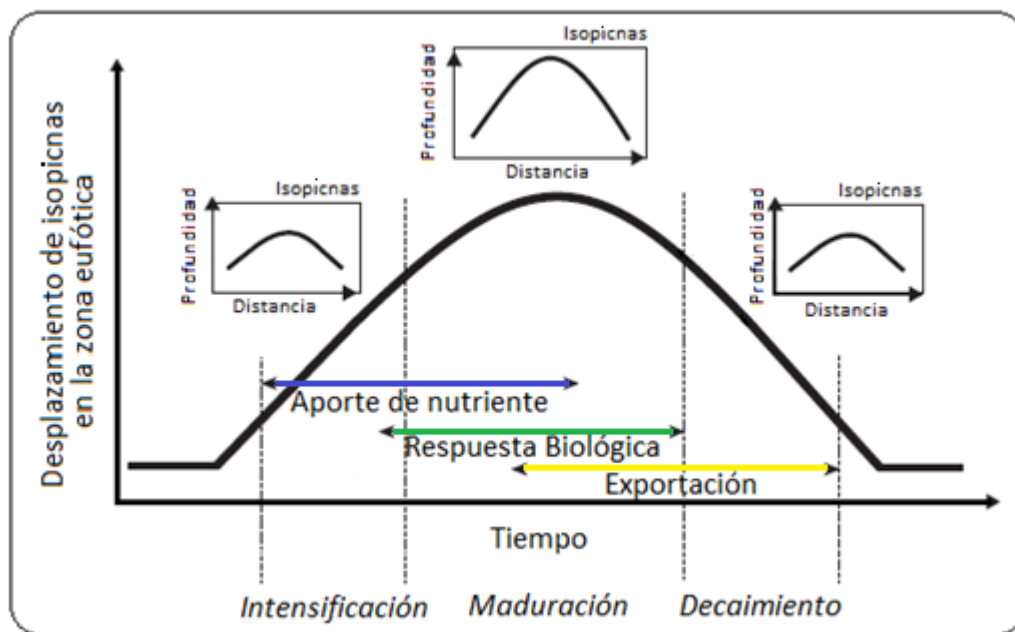


Figura 2. Ciclo de vida de los remolinos ciclónicos de mesoescala. Las líneas discontinuas señalan la etapa del ciclo de vida y las flechas continuas de colores indican los efectos en cada etapa del remolino, los recuadros muestran el desplazamiento de las isopícnas en cada una de las etapas con respecto a la profundidad y distancia. Esquema modificado de Sweeney *et al.* (2003).

1.3 Importancia del Golfo de California.

El Golfo de California (GoC) es un sitio con alta productividad primaria (valores oscilan entre $1 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y en algunas regiones $4 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Kahru *et al.*, 2004), y en consecuencia hay una gran diversidad de especies (Thomson *et al.*, 1979; De La Cruz-Agüero *et al.*, 1996; Aurióles-Gamboa, 1993) tanto comerciales y no comerciales. Es importante mencionar que pesquerías comerciales como sardina, anchoveta, camarón y calamar, así como la pesca deportiva que se realizan en esta región influyen en la economía nacional (Cisneros-Mata *et al.*, 1997; Martínez-Zavala *et al.*, 2000).

1.3.1 Antecedentes de estudios sobre nutrientes en el centro del Golfo de California.

La alta productividad primaria del Golfo de California se debe a los mecanismos que enriquecen la superficie con nutrientes. Entre los mecanismos ya descritos se incluyen: surgencias costeras, mezcla vertical (por mareas, circulación estacional y por rompimiento de la estratificación térmica) y fijación de nitrógeno en el centro del GoC (Lluch-Cota, 2000; Torres-Delgado, 2008; Álvarez-Borrego *et al.*, 1978; Torres-Valdés, 2000; Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 2001; White *et al.*, 2007).

Las surgencias costeras en el Golfo de California son más intensas en la costa este donde ocurren predominantemente durante invierno-primavera

(Lluch-Cota, 2000). En la costa oeste, las surgencias son más débiles y ocurren en verano por la estratificación de la columna de agua (Santamaría-del Ángel *et al.*, 1999). Esto se debe principalmente al patrón de vientos, en invierno-primavera los vientos provienen del noroeste y son fuertes, mientras que en verano provienen del sureste y son débiles (Parés-Sierra *et al.*, 2003).

El patrón de viento también influye en la circulación del Golfo de California (Bray, 1988), permitiendo que la circulación cambie estacionalmente y produzca mezcla. Bray (1988) sugiere que en invierno cuando los vientos provienen del noroeste, la capa superficial (0-50 m) es advectada hacia afuera del golfo. Para compensar la salida del agua superficial, la masa de agua subsuperficial subtropical (ASsSt) rica en nutrientes entra al GoC. Al llegar al umbral de San Lorenzo es transportada hacia la superficie induciendo mezcla y un enriquecimiento con nutrientes de la zona eufótica (Delgadillo *et al.*, 2001).

La mezcla vertical invernal en la parte central del Golfo de California (Cuenca de Guaymas y Cuenca del Carmen) es producida por el cambio en el patrón del viento (de sureste a noroeste), esto permite el rompimiento de la estratificación térmica de la columna de agua (Thunell *et al.*, 1996). Los vientos del noroeste disminuyen la temperatura superficial del mar haciendo que el agua superficial sea más densa y por lo tanto se hunda.

El proceso de fijación de nitrógeno consiste en transformar nitrógeno no reactivo (N_2) a nitrógeno orgánico y es considerado como aporte de nitrógeno

nuevo en la superficie de los océanos (Gruber, 2008). Los organismos diazótrofos son los únicos que pueden realizar este proceso porque presentan el complejo enzimático de la nitrogenasa (encargado de catalizar la reacción; Stal *et al.*, 2010). En el centro del Golfo de California la fijación de nitrógeno mantiene ~35-48% de la demanda de nitrógeno por fitoplancton en la superficie (hasta 15 m de profundidad) durante el verano, con tasas máximas a 10 m de profundidad (White *et al.*, 2007). En este mismo estudio mostraron que los máximos profundos de clorofila *a* se encuentran entre 20 y 60 m de profundidad y no en la superficie donde la fijación de nitrógeno es más intensa (10 m). Por lo anterior no se puede atribuir el sostenimiento del máximo de clorofila al proceso de fijación de nitrógeno; quizá los remolinos en esta región sean el mecanismo de enriquecimiento de nutrientes que promueva al máximo profundo de clorofila *a*.

Según la revisión sobre el estado del ecosistema y retos de sustentabilidad para el Golfo de California realizada por Lluich-Cota y colaboradores en 2007, no existen series de tiempo de nutrientes del Golfo de California y los datos disponibles son sobre surgencias en la región costera y mezcla por mareas en la región de las islas. Indicando que no hay o son escasos los datos de nutrientes en el centro del Golfo de California. Sin embargo Álvarez-Borrego y colaboradores (1978) documentan la variabilidad estacional y espacial de la distribución y concentración de nutrientes en el Golfo de California. Los autores comparan estacionalmente las

concentraciones de nutrientes en diferentes zonas del golfo, e indican que dichas concentraciones son mayores en primavera (Abril - Mayo) en comparación con el otoño (Octubre) para todas las zonas el golfo (por ejemplo, en la parte central la concentración de nitrato en aguas superficiales es de ~ 1.9 μM y ~ 0.3 μM , respectivamente). Los mismos autores indican la variabilidad espacial, aumentando la concentración superficial de nutrientes desde la boca del golfo (nitrato: ~ 0.6 μM) hacia el interior con máximas concentraciones en el Canal de Ballenas (nitrato: ~ 13 μM).

1.4 N^*

El parámetro N^* es originalmente descrito Gruber y Sarmiento (1997). N^* ha sido propuesto para investigar la dominancia de los procesos de fijación de nitrógeno y desnitrificación en los océanos. N^* es definida y adaptada para el Pacífico como (Deutsch *et al.*, 2001):

$$N^* (\mu\text{M}) = (N - 16 P) + 2.9 \dots \dots \dots (1)$$

Donde N es la concentración de nitrato, P es la concentración de fosfato y 2.9 es la constante obtenida a partir de las concentraciones globales promedio de nitrato y fosfato (30.38 μM y 2.08 μM , respectivamente); dicha constante fue añadida a la ecuación para obtener un promedio global de N^* cercano a cero (Gruber y Sarmiento, 1997). Los valores de N^* positivos indican que el proceso de fijación de nitrógeno domina y los valores negativos indican dominancia de la desnitrificación. Esto ayuda a determinar si el sitio de estudio actúa como

aporte o pérdida de nitrógeno. White *et al.* (2007) presentan valores superficiales de N^* (~-5, hasta ~20 m de profundidad) que disminuyen con la profundidad (valores oscilando ~-11 y ~-13), lo anterior contribuye en que la parte superficial de la región de la Cuenca de Guaymas es un hábitat óptimo para el proceso de fijación de nitrógeno durante el verano.

2. Hipótesis.

- * Se observará una variación horizontal en las concentraciones de nutrientes, con máximos en el núcleo del remolino CE-1 y mínimos afuera del mismo.
- * Debido al aporte de nutrientes en la zona eufótica en el núcleo del remolino CE-1, habrá un máximo de la concentración de clorofila al inicio de la nutriclina de dicha región.
- * Se espera que el proceso de fijación de nitrógeno evidenciado mediante el parámetro N^* sea más intenso en las zonas más estratificadas que en las zonas de influencia de remolinos ciclónicos o en la zona de intensa mezcla de la región de las grandes islas.

3. Objetivos.

3.1 Objetivo general.

Describir la influencia de remolinos de mesoescala en la distribución de nutrientes inorgánicos (nitrato más nitrito, fosfato y silicato) y clorofila *a*, en la región central del Golfo de California en verano.

3.2 *Objetivos particulares.*

- Describir la distribución de la densidad para identificar mecanismos físicos de aporte de nutrientes y características físicas como el grado de estratificación de la columna de agua.
- Describir la distribución de nutrientes en zonas con y sin influencia del remolino CE-1, incluyendo la zona de intensa mezcla de la región de las grandes islas.
- Describir la distribución de clorofila *a* en zonas con y sin influencia del remolino CE-1.
- Realizar la estimación del indicador N* para las diferentes zonas con y sin influencia de mecanismos de aporte de nutrientes.
- Describir características de las poblaciones fitoplanctónicas, incluyendo la determinación del nutriente limitante, mediante la estimación de las tasas de consumo/adición de N vs. P y Si vs. N, y las razones N:P y Si:N.

4. **Área de estudio.**

El Golfo de California (GoC) es un mar marginal estrecho ubicado entre 23° 03' - 31° 37' N y 108° - 114° 38' W, al noroeste de México, entre la península de Baja California y los estados de Sonora y Sinaloa; el GoC tiene ~1000 km de longitud y ~200 km de ancho en la parte central del golfo (Cuenca del Carmen).

La batimetría del golfo es muy variable. A partir de la boca hasta el umbral de San Lorenzo se pueden encontrar profundidades máximas entre ~3000 y 4000 m, en la región de las grandes islas la mayor profundidad es de ~2000 m, mientras que la zona más somera con ~200 m de profundidad esta en el golfo norte (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979).

El clima en la región del golfo es influenciado por la árida zona terrestre que lo circunda, ocasionando que la evaporación (1 m año^{-1}) domine sobre la precipitación. Con base a las corrientes superficiales y la circulación termohalina del GoC, Bray (1988) planteó un modelo de circulación de tres capas para los primeros 500 m de profundidad: la capa más profunda localizada entre 250 - 500 m fluye hacia la cabeza del golfo, la capa intermedia con una profundidad entre 50 - 250 m se dirige hacia la boca del golfo y la dirección del flujo de la capa superficial (0 - 50 m) es influenciada por el patrón de vientos estacional. En invierno dominan los fuertes vientos provenientes del noroeste, permitiendo que la corriente superficial fluya hacia afuera del golfo, mientras que los débiles vientos del sureste dominan en verano y cambian la dirección de la corriente introduciendo agua al golfo.

Se han descrito seis masas de agua para el Golfo de California (Alvarado-Aguilar, 1998; Bray y Robles, 1991; Torres-Orozco, 1993). En la capa superficial del GoC durante el verano se encuentran las masas de agua del Agua del Golfo de California (AGC; ubicada en la parte del golfo norte, región de las grandes islas y hasta la zona de la Cuenca del Carmen) y Agua

Superficial Ecuatorial (ASE; en la boca del golfo hasta la Cuenca del Carmen). En la vertical, el AGC presenta un espesor entre 160-175 m y el espesor del ASE es de ~250 m. Por debajo de estas dos masas de agua se encuentra el Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) con un espesor de entre 200 y 370 m y se distribuye a lo largo del GoC. La masa Agua Intermedia del Pacífico (AIP) se localiza por debajo de los 400 m de profundidad y presenta un espesor de 700 m; el Agua Profunda del Pacífico domina la zona más profunda del GoC (Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 2001). Los datos de salinidad y temperatura de las masas de agua se muestran en la tabla I.

Tabla I. Características de las masas de agua del Golfo de California (modificada de Torres – Orozco, 1993).

Masas de agua	Temperatura (°C)	Salinidad	Volumen (%)
Agua del Golfo de California (AGC)	> 12	> 35	6
Agua Superficial Ecuatorial (ASE)	>18	< 35	1
Agua de la Corriente de California (ACC)	12 – 18	< 34.5	-
Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt)	9 – 18	34.5 – 35	19
Agua Intermedia del Pacífico (AIP)	4 – 9	34.5 – 34.8	33
Agua Profunda del Pacífico (APP)	< 4	>34.5	41

5. Metodología.

5.1 Monitoreo de los remolinos.

Con dos meses de anticipación a la fecha de la campaña de muestreo se monitoreó la posición de remolinos entre la Cuenca del Carmen y la Cuenca de Guaymas, utilizando imágenes satelitales de temperatura superficial del mar y de concentración de Clorofila *a*, obtenidas a partir del sensor MODIS – Aqua (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer por sus siglas en inglés).

Mediante las imágenes de concentración de clorofila *a*, se detectó un sistema de cuatro remolinos, dos remolinos ciclónicos denominados CE-1 y CE-2 y dos remolinos anticiclónicos denominados ACE-1 y ACE-2 (Fig. 3). El muestreo se enfocó en el remolino ciclónico CE-1, por el tiempo de permanencia durante su detección y por la claridad de su estructura en las imágenes satelitales (Sánchez-Velasco *et al.*, 2013).

5.2 Diseño de muestreo.

El crucero oceanográfico GOLCA-1107 para describir el remolino CE-1 se realizó del 27 de Julio al 4 de Agosto de 2011 a bordo del B/O “El Puma”. El diseño del muestreo incluyó dos transectos que atravesaron el remolino CE-1: el Transecto A, conformado por 19 estaciones (Fig. 4), y el Transecto C con 23 estaciones. Las estaciones C17 a C23 del Transecto C (Fig. 4) se ubicaron en una porción del remolino CE-2.

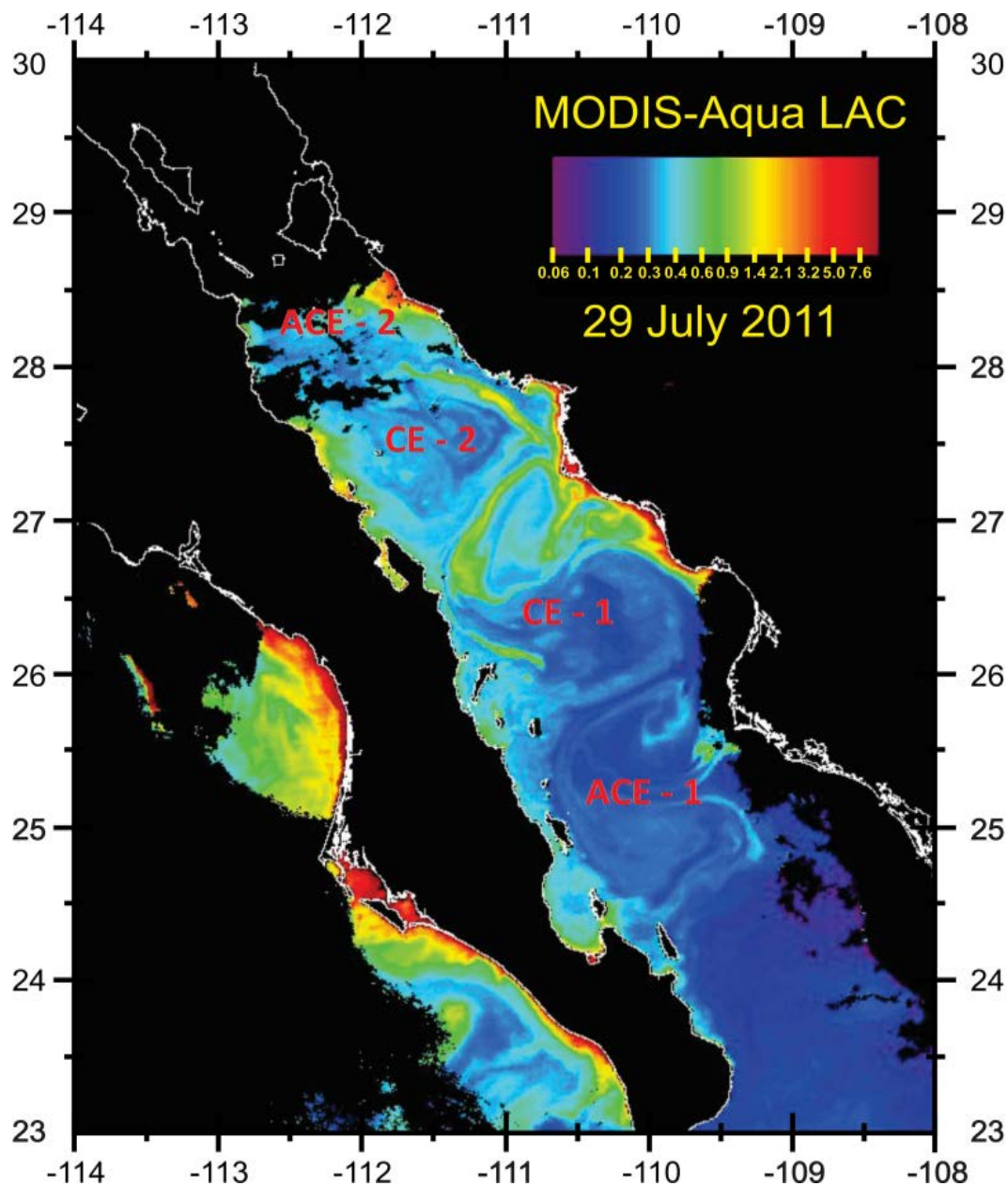


Figura 3. Ubicación del sistema de cuatro remolinos en verano de 2011 (29 de Julio) en la región central del Golfo de California, con base a la concentración superficial de clorofila *a* (mg m^{-3}). En donde se observan dos remolinos ciclónicos (CE) y dos remolinos anticiclónicos (ACE). Imagen satelital obtenida de MODIS-Aqua, proporcionada por el Dr. Eduardo Santamaría del Ángel.

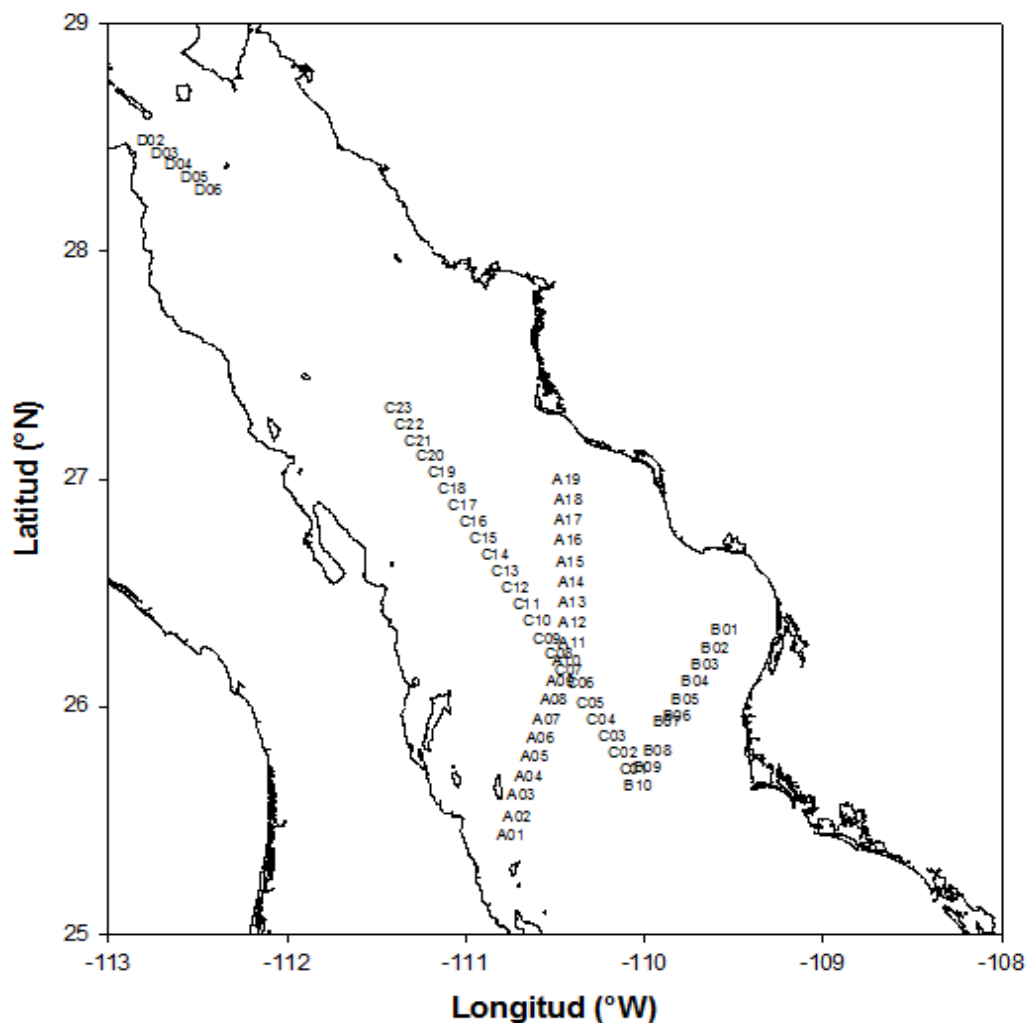


Figura 4. Ubicación geográfica de los transectos (letra) y estaciones (números) realizados durante la campaña de muestro del proyecto GOLCA-1107.

Además se realizó un transecto con 5 (Transecto D) cercano a la región de las Grandes Islas, a un costado del umbral de San Lorenzo, región que resalta por la intensa mezcla vertical. También se obtuvieron muestras de 10 estaciones correspondientes al Transecto B donde se presentó el remolino ACE-1. La posición geográfica de los transectos y estaciones del crucero GOLCA-1107 se muestran en la Fig. 4, la distancia entre cada estación es de 10 km.

Cabe señalar que entre los remolinos ciclónicos CE-1 y CE-2, donde el agua fluyó en direcciones contrarias, las isopícnas presentaron forma cóncava y la distribución superficial de la clorofila *a*, indican las características de un remolino anticiclónico. No obstante, en dicha zona las imágenes de clorofila *a* cambiaron con el paso de los días mostrando inestabilidad; por lo tanto esa área es nombrada como una zona de cizallamiento, en vez de un remolino anticiclónico (Sánchez-Velasco *et al.*, 2013).

Con un sistema de CTD modelo SeaBird 911*plus* se obtuvieron los perfiles verticales de temperatura y conductividad, además el sistema fue equipado con un sensor de fluorescencia para obtener la concentración de clorofila *a*. El procesamiento de los datos del CTD se realizó utilizando el software del fabricante como se describe detalladamente por Godínez *et al.* (2011). Los datos de la concentración de clorofila *a* (mg Chla m^{-3}), fueron obtenidos a partir de los datos de fluorescencia del sensor.

Las características físicas generales del remolino CE-1 son: el remolino corresponde a las estaciones A05-A19 del Transecto A y presentó un diámetro de ~ 140 km, y a las estaciones C01-C16 del transecto C con diámetro ~ 160 km; el diámetro del núcleo del remolino es de ~ 30 km, y corresponde a las estaciones A10 a A13 y C06 a C09. La profundidad aproximada del remolino fue de ~ 520 m y su velocidad superficial promedio fue de ~ 0.5 m s^{-1} . La superficie de la capa de mezcla se encontró entre los 10-15 m, y la termoclina fue localizada entre los 15-55 m (Sánchez-Velasco *et al.*, 2013).

5.3 Recolecta y análisis de nutrientes.

Muestras de agua para nutrientes inorgánicos fueron recolectadas con botellas Niskin en una roseta. Las muestras de agua se transfirieron a botellas de polietileno de alta densidad obscuro de 5 L y con un sistema de jeringa y filtros se filtraron ~45 ml de agua, utilizando filtros de fibra de vidrio (Whatman GF/F previamente calcinados a 400°C por 4 h). Las muestras de agua filtradas se almacenaron en tubos de plásticos y se congelaron a una temperatura de -20°C para su posterior análisis en laboratorio. Las profundidades aproximadas de las muestras de agua por estación son: 0, 15, 30, 40, 50, 70, 100 y 150 m.

Las muestras de agua para análisis de nitrato, nitrito, fosfato y silicato fueron transportadas al laboratorio de Geociencias Ambientales del Instituto de Investigaciones Oceanológicas, de la Universidad Autónoma de Baja California donde fueron analizadas de manera automatizada mediante un analizador de flujo segmentado Skalar San_{plus}. Basándose en el método de Armstrong *et al.* (1967) se realizó el análisis de nitrato y silicato. El fosfato se estimó según el método de Bernhardt y Wilhems (1967).

El parámetro de N* se calculó de acuerdo a White *et al.* (2013), en donde se ajusto para la estequiometria de la desnitrificación:

$$N^* (\mu M) = (N - 16 P) * 0.87 \dots \dots \dots (2)$$

6. Resultados.

Las muestras de agua obtenidas para el análisis de nutrientes en este estudio abarcan hasta 150 m de profundidad, sin embargo los datos de densidad obtenidos a partir de CTD abarcan profundidades hasta de 1000 m dependiendo de la batimetría. A continuación se describen las secciones verticales de la densidad hasta los 300 m (Fig. 5), ya que se desea determinar, en el caso de los remolinos, desde qué profundidad proviene el agua más profunda para la que contamos con datos de nutrientes.

El transecto B, con una longitud aproximada de 90 km, se puede considerar como el transecto de referencia que representa condiciones sin perturbación del océano por remolinos de mesoescala, ya que las isopicnas son casi paralelas a la superficie del mar desde ~30 m donde se ubica la isopicna de 22.0 kg m^{-3} hasta ~230 m donde se ubica la isopicna de 26.4 kg m^{-3} (Fig. 5a). La isopicna de 22.0 kg m^{-3} representa la base de la capa de mezcla mientras que la isopicna de 25.0 kg m^{-3} indica la base de la picnoclina ubicada a ~75 m en este transecto. La isopicna de 26.0 kg m^{-3} , que se utiliza en este estudio como referencia para la descripción de los remolinos y su relación con los nutrientes, en el transecto B se mantuvo alrededor de 125 m. Cabe aclarar que dicho transecto se muestreó como parte del remolino anticiclónico ACE-1 detectado con las imágenes de satélite, sin embargo, al parecer dicho remolino tiene poca influencia en la estructura vertical de la densidad (Fig. 5a).

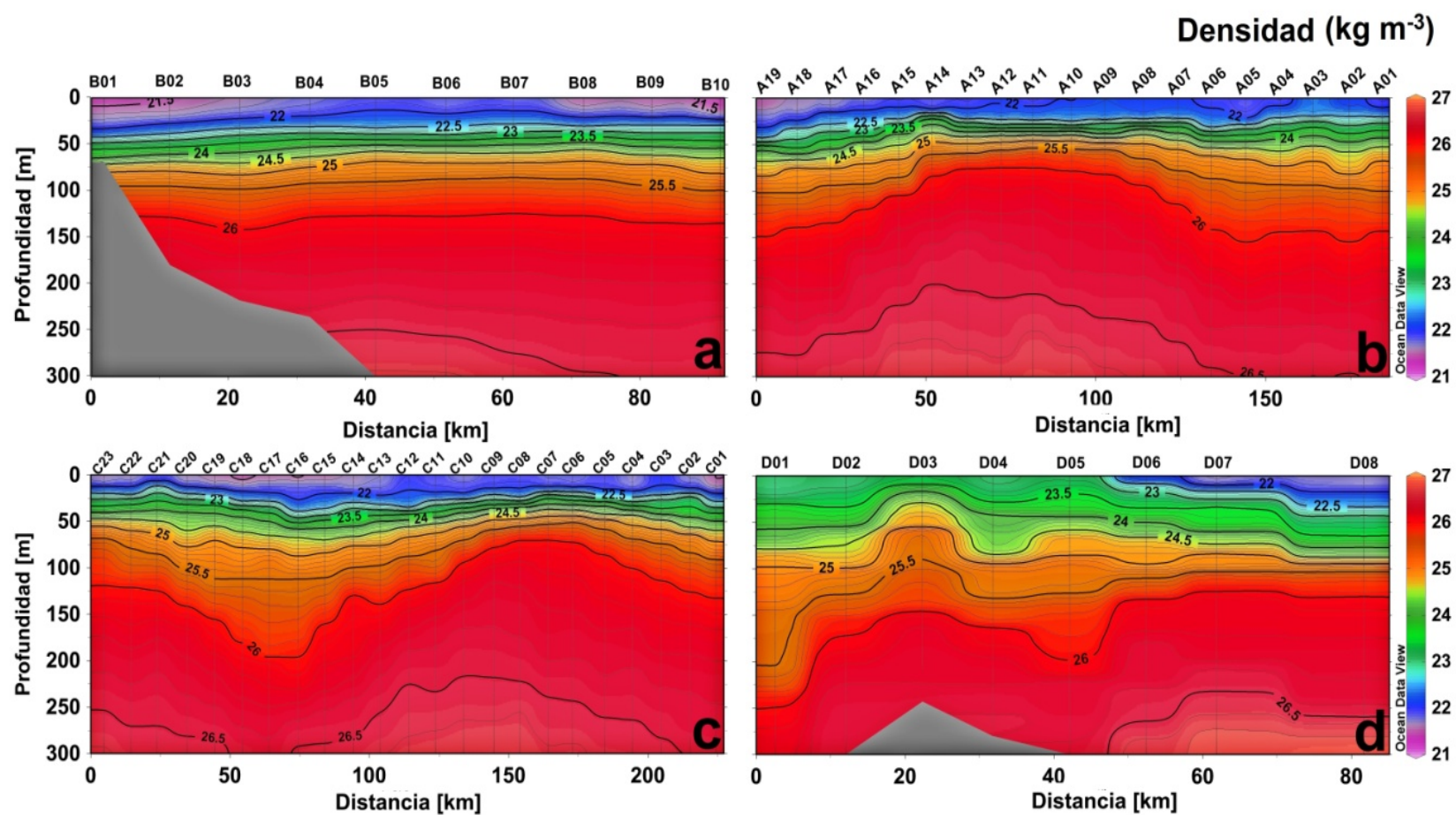


Figura 5. Secciones verticales de densidad (kg m^{-3}) hasta 300 m de profundidad para el transecto B (a), transecto A (b), transecto C (c) y transecto D (d). Las isopícnas se muestran en color negro.

El transecto A tuvo una cobertura de 180 km, y con una orientación de sur a norte cubrió casi todo el ancho del golfo. El rasgo principal en el transecto A es la deformación de las isopicnas $>25 \text{ kg m}^{-3}$ entre las estaciones A05-A19, que con su forma de domo reflejan el efecto del remolino ciclónico CE-1 (Fig. 5b). A 150 m de profundidad, el diámetro del remolino es aproximadamente de 140 km. Como en el caso del transecto B, las isopicnas entre las estaciones A01 y A04, cercanas a la costa de Baja California, sugieren que dicha región estuvo fuera de la influencia de remolinos; en este caso, la isopicna de 26.0 kg m^{-3} se encuentra a una profundidad de 150.

Esta isopicna se eleva hasta $\sim 75 \text{ m}$ en el núcleo del remolino (A10-A13), indicando una elevación de $\sim 75 \text{ m}$ de su posición inicial (Fig. 5b). En contraste con el transecto B, en el transecto A la forma de la isopicna de 22.0 kg m^{-3} es más irregular y con frecuencia llega a la superficie, indicando la presencia de agua ligeramente más densa aflorando en la superficie. Sin embargo, a lo largo de todo el transecto (dentro y fuera el remolino) aproximadamente entre los 20 y 50 m de profundidad se acumulan y son casi planas las isopicnas con valores entre 22.5 y 24.5 kg m^{-3} ; esta intensa pycnoclina refleja una fuerte estratificación causada por las altas temperaturas de las aguas superficiales (Fig. 5b). Otro rasgo a resaltar en esta sección, importante para la explicación de las secciones de nutrientes, es que en el núcleo del remolino, entre las estaciones A09-A15 el agua de 125 a 150 m de profundidad tiene densidad entre 26.3 y

26.4 kg m⁻³; las isopícnas con estos valores se ubican a 225 y 250 m de profundidad en la región fuera del remolino.

El transecto C con longitud de 220 km es el que presenta la sección vertical más compleja. En este transecto se observa la influencia del remolino ciclónico CE-1 entre las estaciones C01 y C15, lo que representa un diámetro de ~150 km a los 150 m de profundidad (Fig. 5c). La distribución de las isopícnas también refleja la influencia del remolino CE-2 entre las estaciones C19 y C23, sin embargo, aparentemente solo se muestreó una porción (40 km a 150 m de profundidad) del flanco sur del remolino y no se alcanzó a muestrear el núcleo del mismo (Fig. 5c). En el núcleo del remolino CE-1 a 150 m de profundidad afloran las isopícnas entre 26.3 y 26.4 kg m⁻³, mientras que en la porción muestreada del remolino CE-2 arribaron a la misma profundidad aguas entre las isopícnas 26.1 y 26.2 kg m⁻³. En los casos de los transectos A y B donde no hubo influencia de remolinos, la profundidad de la isopícnica de 26.0 kg m⁻³ se ubicó entre 130 y 150 m de profundidad, sugiriendo que esa es la profundidad donde dicha isopícnica es estable, sin perturbaciones (Fig. 5 b y c). Sin embargo, en el caso del transecto C, la misma isopícnica se localiza hasta 200 m de profundidad entre los remolinos (estaciones C16-C18) mientras que en la estación C01, donde posiblemente la influencia del remolino sea pequeña, la isopícnica se encuentra a 130 m (Fig. 5c). Ya que en las estaciones más sureñas del transecto D (estaciones D06 a D08) la isopícnica de 26.0 kg m⁻³ se ubica alrededor de los 130 m de profundidad, es posible que su ubicación a

200 m entre los remolinos refleje un hundimiento asociado con el cizallamiento entre remolinos. En el transecto C, la base de la capa de mezcla indicada por la posición de la isopícnica de 22 kg m^{-3} se localiza entre 10 y 20 m de profundidad; esta isopícnica es casi paralela a la superficie del mar reflejando una fuerte estratificación térmica que favorece la formación de picnoclinas particularmente intensas encima de los remolinos. La profundidad de la base de la picnoclina (25 kg m^{-3}) oscila entre ~50 m de profundidad en las crestas de los remolinos, hasta ~80 m de profundidad en la zona de cizallamiento entre remolinos (Fig. 5c).

Aunque el transecto D, con una longitud de 80 km, se incluye en el borde del remolino anticiclónico ACE-2 detectado por satélite (Fig. 3), la forma de las isopícnas sugiere que no hubo influencia de remolinos de mesoescala (Fig. 5d). Este transecto se encuentra influenciado por la dinámica física (y biogeoquímica) particular de la región de las Grande Islas, y en específico del umbral San Lorenzo que a la altura de la estación D03 tiene una profundidad aproximada de 250 m; las estaciones D01 y D02 se ubican en el Canal de Ballenas. En contraste con los transectos antes descritos, en el transecto D no se observa la fuerte estratificación en los primeros 20 m sino que se observa un gradiente horizontal en los valores de las isopícnas con valores que incrementan hacia la cumbre del umbral. Por ejemplo, la isopícnica de 23.0 kg m^{-3} se localiza a 40 m de profundidad en la estación D08 y aflora a la superficie cerca de la estación D05. En la cima del umbral, en la estación D03, aflora la

isopicna de 23.4 kg m^{-3} . La isopicna de 24.0 kg m^{-3} en la estación más alejada a la influencia de los umbrales (D08) se encuentra a $\sim 80 \text{ m}$ y se elevó a menos de 10 m en el umbral. Otro rasgo a destacar en la sección del transecto D es el aparente hundimiento de las isopicnas de 25.5 a 26.3 kg m^{-3} a partir del umbral hacia el Canal de Ballenas. La isopicna de 26.0 kg m^{-3} en la estación D03 se presentó a 150 m de profundidad mientras que en la estación D01 se localizó a 250 m . Dicho hundimiento es consistente con el mecanismo de desbordamiento (overflow en inglés) descrito por López *et al.* (2008) mediante el cual agua proveniente del sur y que fluye cerca del fondo por encima de los umbrales (esencialmente Agua Subsuperficial Subtropical) se hunde rápidamente al rebasar el umbral para llenar las cuencas profundas de Canal de Ballenas y Cuenca Tiburón.

6.1 Distribución de nutrientes.

La distribución de nutrientes se presenta en secciones y perfiles verticales promedio hasta 150 m de profundidad (Figs. 6-11). Para fines de descripción de los resultados, en este estudio hemos considerado al transecto B como transecto de referencia porque, como lo indican las isopicnas paralelas (Fig. 5a), las estaciones en este transecto no están influenciadas por remolinos de mesoescala. Aunque las isolíneas de nutrientes mostradas en las secciones verticales (Figs. 6a, 7a y 8a) no son tan paralelas como las isolíneas de densidad, en comparación con los transectos que cruzaron remolinos de mesoescala (transectos A y C) el transecto B refleja una columna de agua

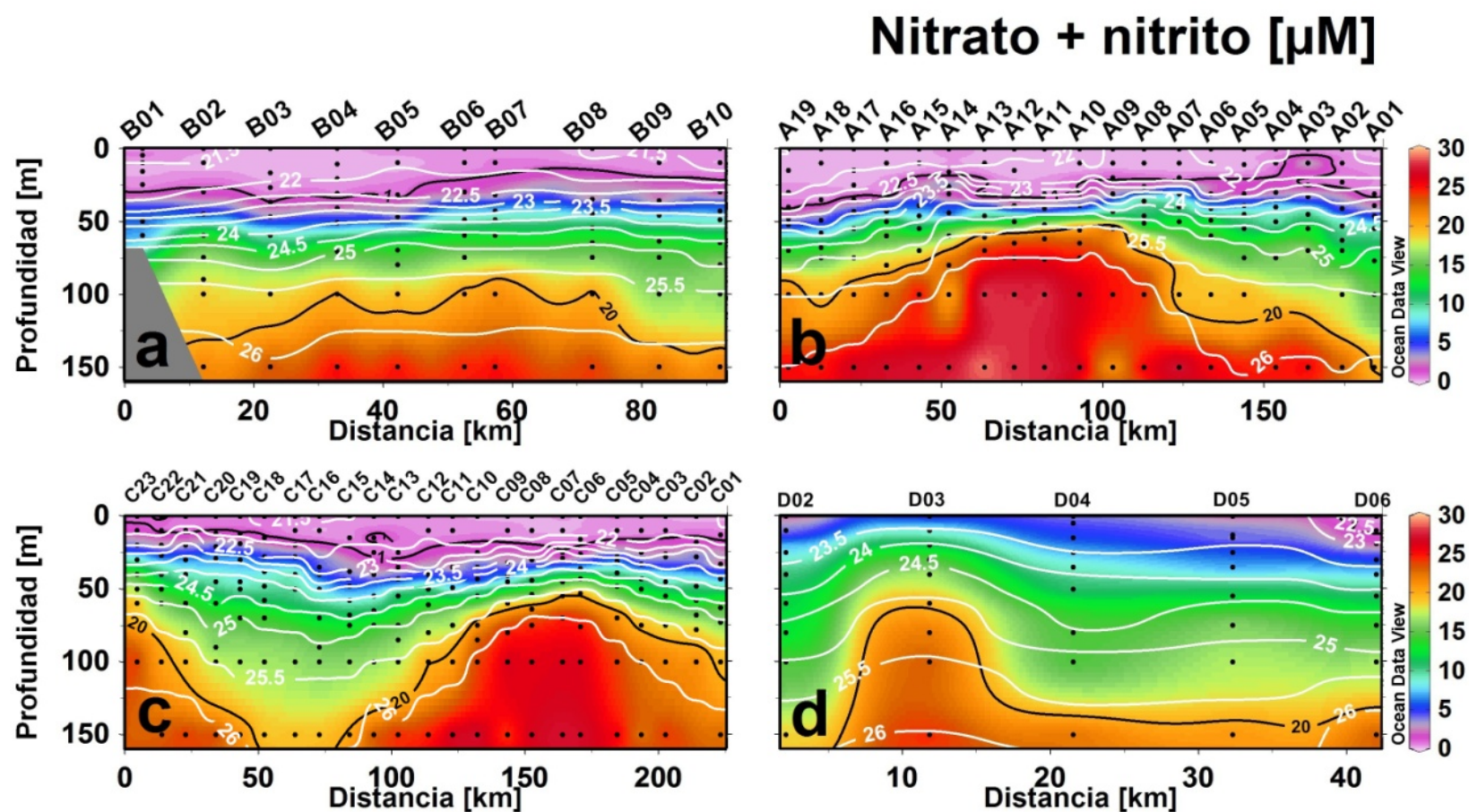


Figura 6. Secciones verticales de N+N (μM): a) transecto B, b) transecto A, c) transecto C y d) transecto D. Las isolíneas negras son las concentraciones de referencia para indicar la profundidad del inicio (1 μM) y base de la nitracina (20 μM). Las isopícnas (kg m^{-3}) se señalan en color blanco.

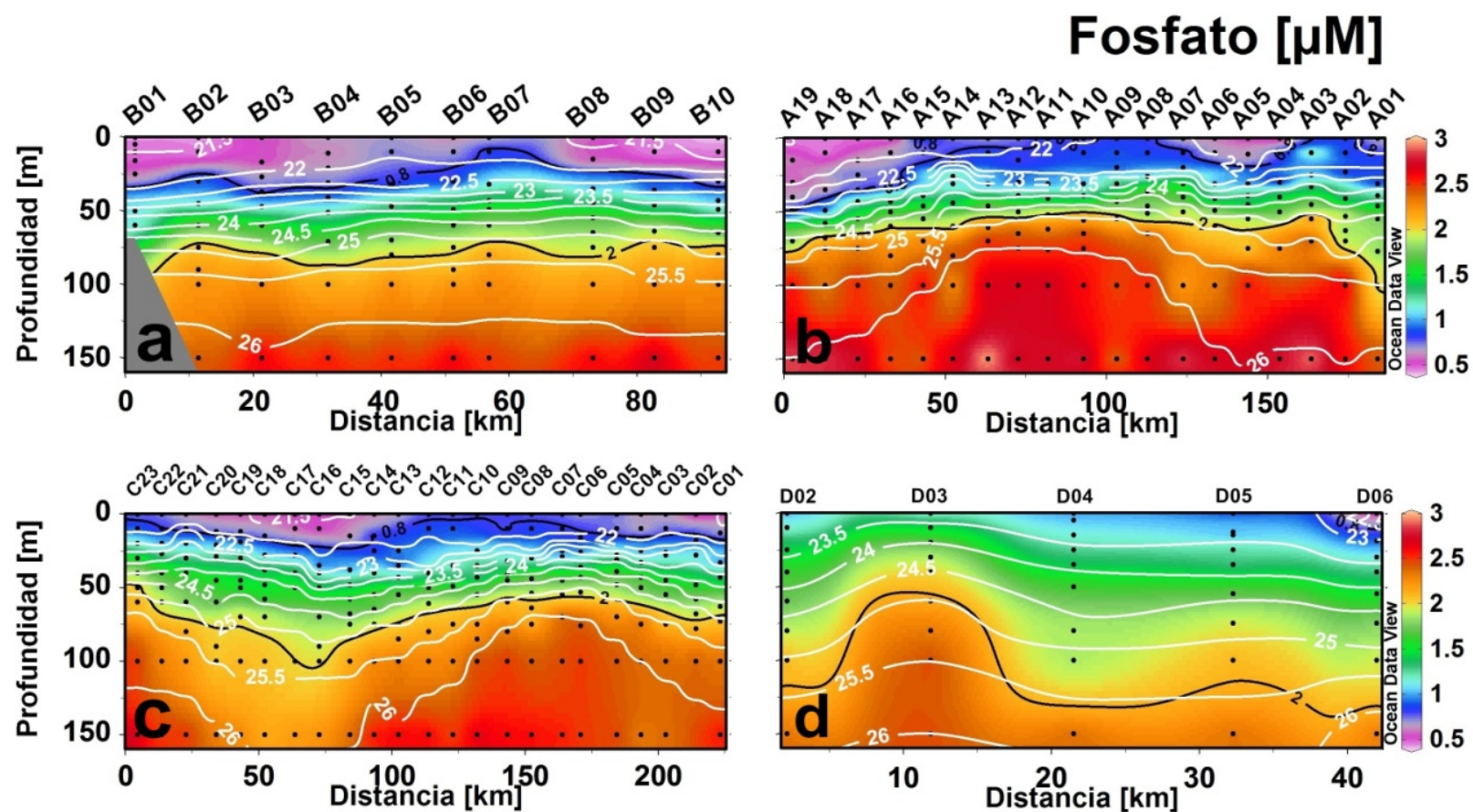


Figura 7. Secciones verticales de fosfato (μM): a) transecto B, b) transecto A, c) transecto C y d) transecto D. Las isolíneas negras son las concentraciones de referencia para indicar la profundidad del inicio ($0.8 \mu\text{M}$) y base de la nutriclina ($2 \mu\text{M}$). Las isopícnas (kg m^{-3}) se señalan en color blanco.

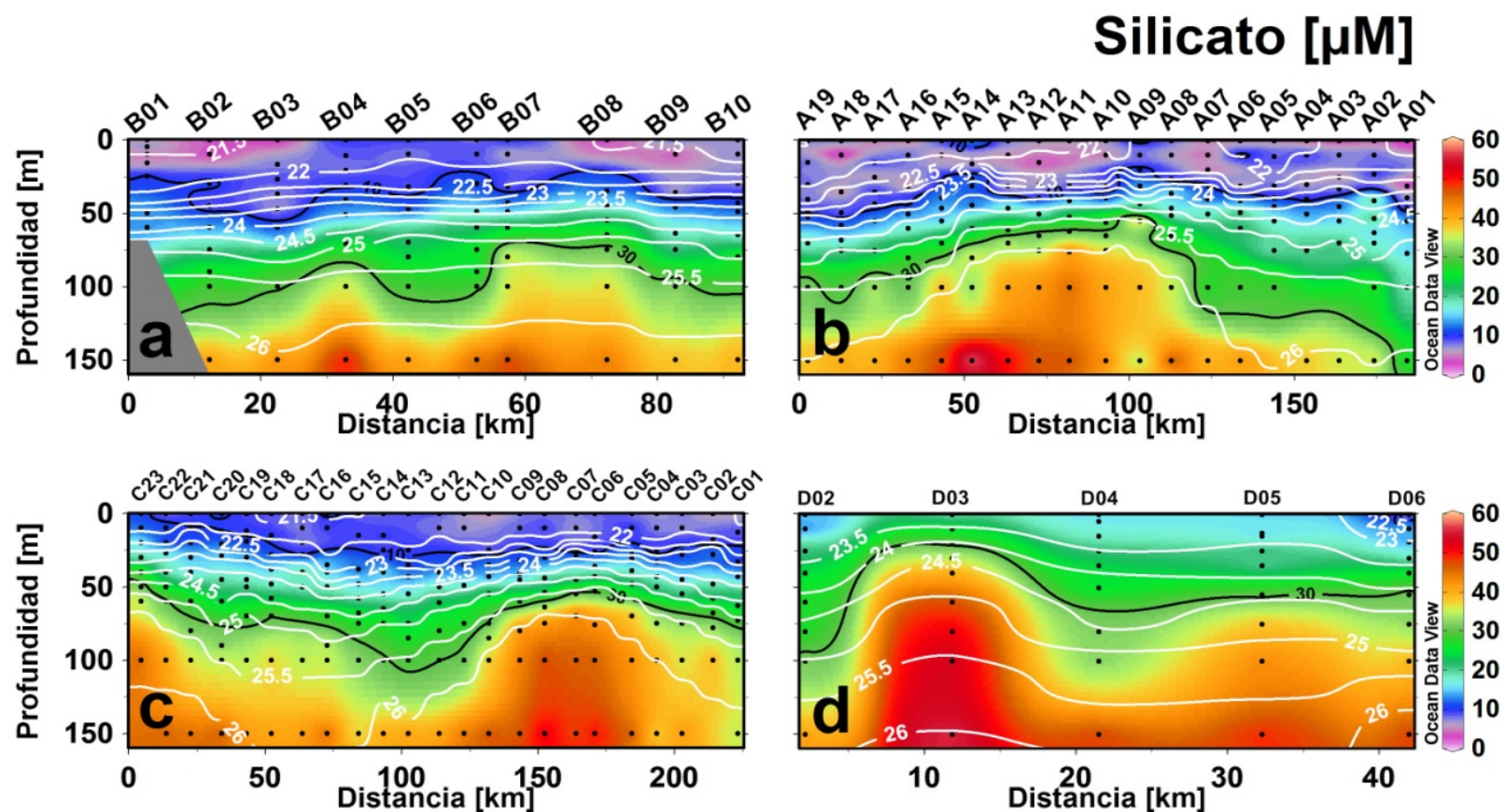


Figura 8. Secciones verticales de silicato (μM): a) transecto B, b) transecto A, c) transecto C y d) transecto D. Las isolíneas negras son las concentraciones de referencia para indicar la profundidad del inicio ($10 \mu\text{M}$) y base de la nutriclina ($30 \mu\text{M}$). Las isopicnas (kg m^{-3}) se señalan en color blanco.

relativamente estable. La profundidad de la base de la capa de mezcla oscila entre 25 y 30 m (isopicna 22 kg m^{-3} ; Fig. 6a). El intervalo de concentración en la capa de mezcla es de 0-0.80 μM (excluyendo dos datos de 1.08 y 1.21 μM de nitrato y nitrito) para nitrato + nitrito (N+N), 0.36-0.98 μM para fosfato (excluyendo un dato de 1.18 μM de fosfato) y 1.2-11.6 μM para silicato. La concentración promedio (*i.e.*, el valor promedio de todos los datos de la capa de mezcla) de N+N en la capa de mezcla es de 0.24 μM , mientras que para fosfato y silicato es de 0.57 μM y 7.2 μM , respectivamente (Fig. 6a-8a). Aunque la concentración promedio de N+N en la capa de mezcla se calculó hasta 30 m de profundidad, las bajas concentraciones ($<0.88 \mu\text{M}$) continuaron hasta 37 m en tres estaciones.

La nutriclina es la capa en donde el gradiente de concentración de nutrientes cambia abruptamente en una distancia vertical relativamente corta; término análogo a la termoclina y picnoclina. De acuerdo con los perfiles verticales promedios obtenidos, la profundidad en donde inicia la nutriclina es a 30 m, similar en cada uno de los nutrientes (Figs. 9a-11a). Al inicio de la nutriclina la concentración promedio es 0.4 μM de N+N (Fig. 9a), 0.8 μM de fosfato (Fig. 10a) y 8.7 μM de silicato (Fig. 11a). Algunos autores (Cullen y Eppley, 1981; Mantyla *et al.*, 2008) sugieren que la concentración inicial para definir la nutriclina de N+N (*i.e.* la nitraclina) es 1 μM , esta concentración en el perfil promedio se encuentra alrededor de 33 m de profundidad. La base de la nutriclina se encuentra a 75 m de profundidad en cada nutriente,

Nitrato + nitrito [μM]

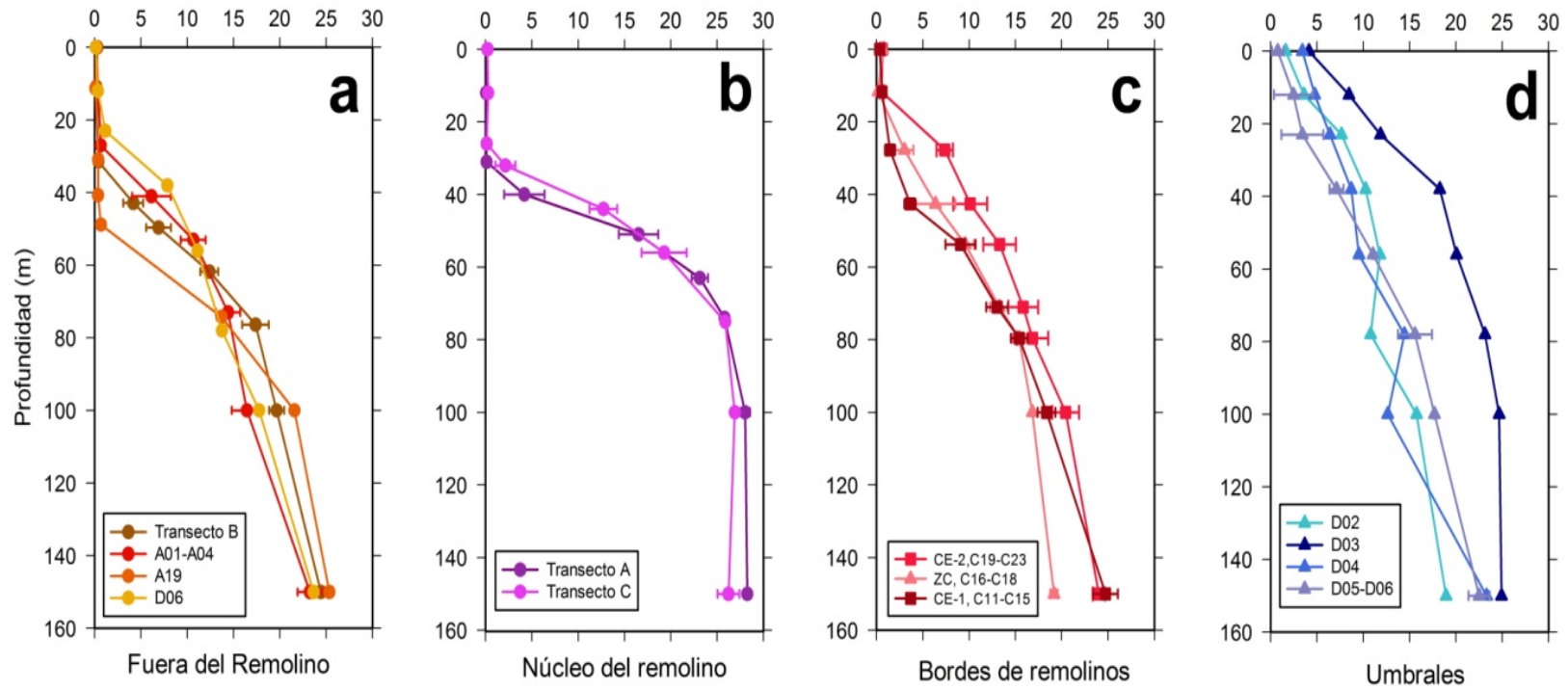


Figura 9. Perfiles verticales de N+N (μM) para las zonas fuera del remolino (a), núcleo del remolino (b), bordes de remolinos (c) y umbrales (d). Las barras horizontales indican el error estándar del promedio.

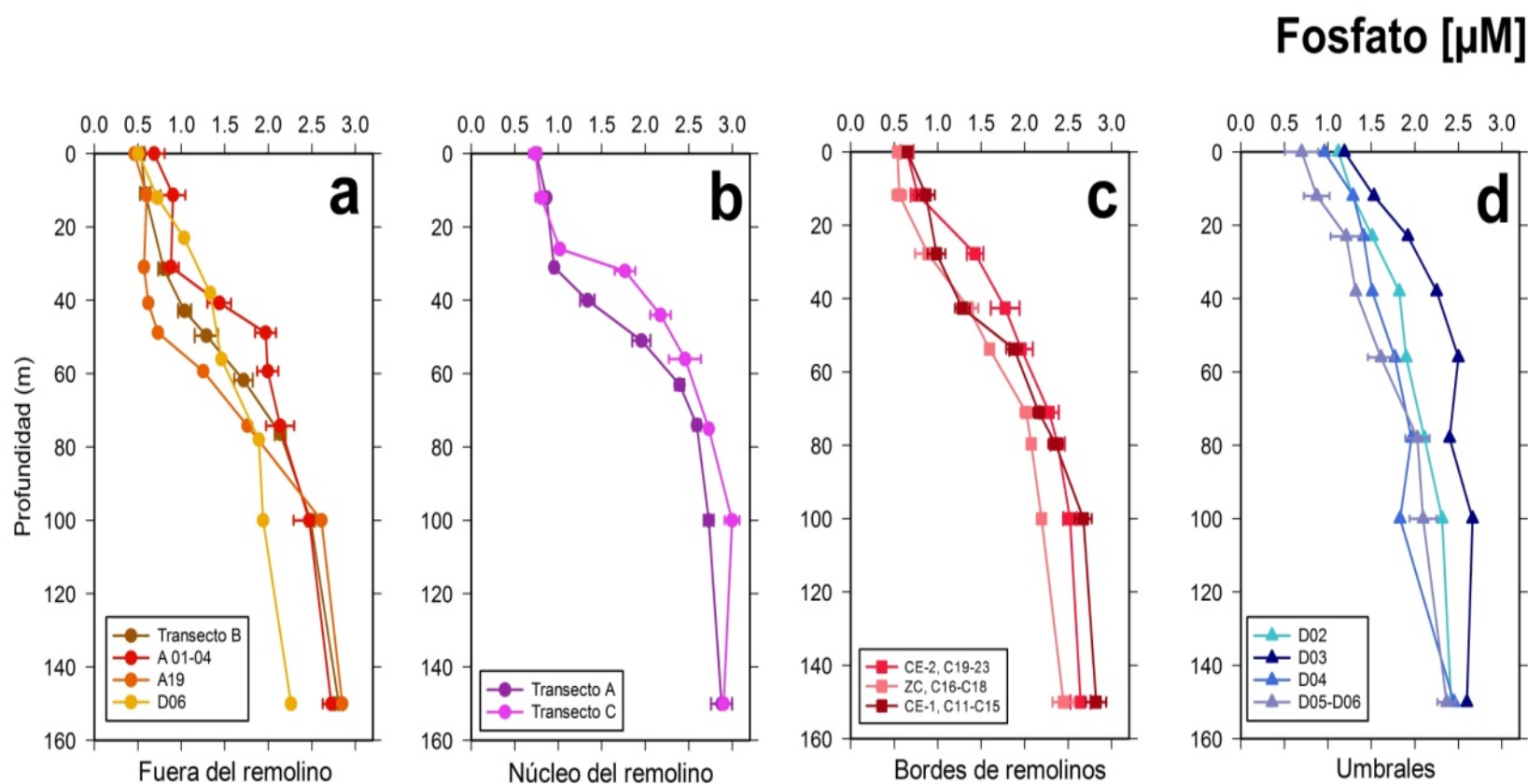


Figura 10. Perfiles verticales de fosfato (μM) para las zonas fuera del remolino (a), núcleo del remolino (b), bordes de remolinos (c) y umbrales (d). Las barras horizontales indican el error estándar del promedio.

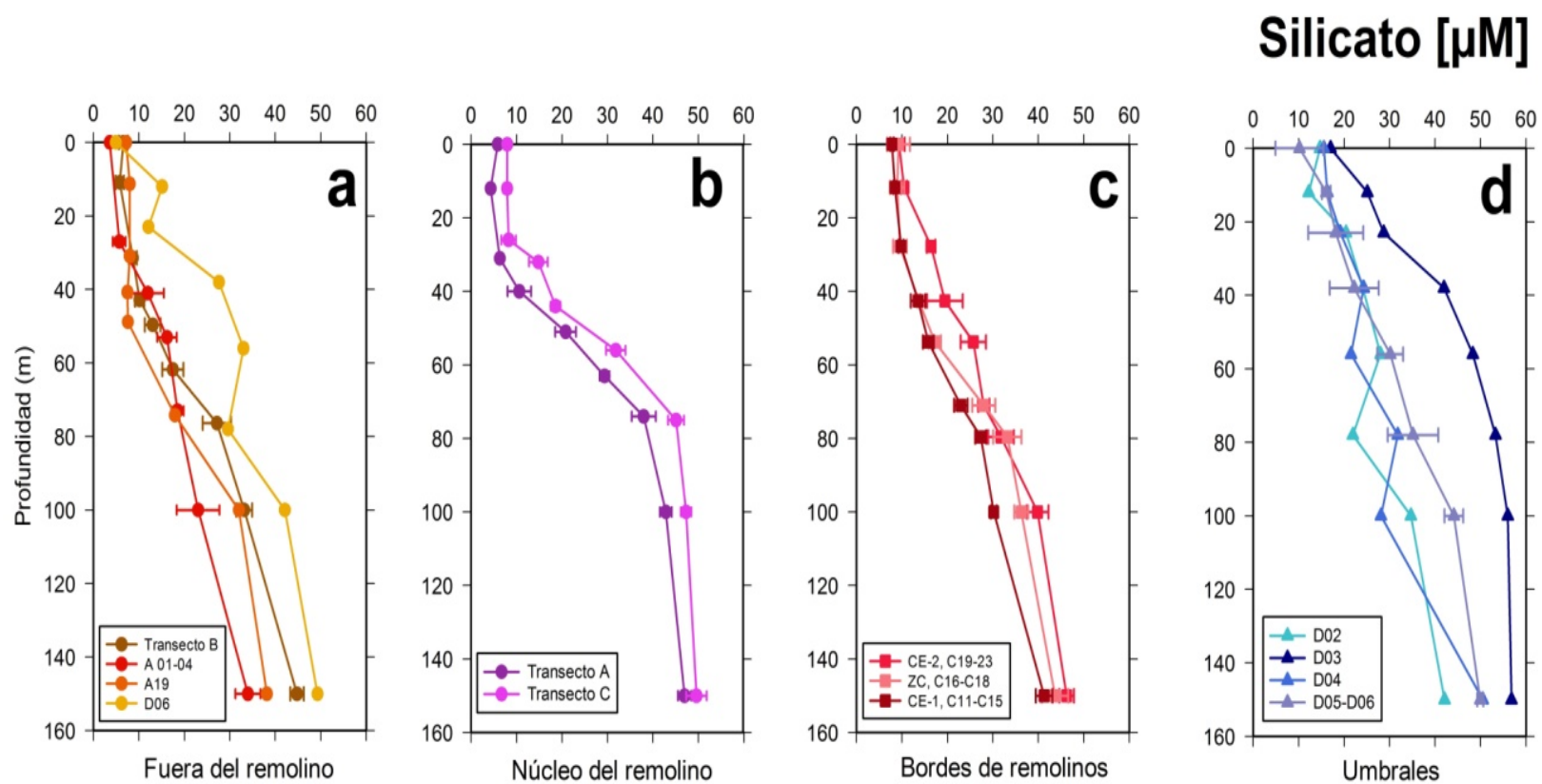


Figura 11. Perfiles verticales de silicato (μM) para las zonas fuera del remolino (a), núcleo del remolino (b), bordes de remolinos (c) y umbrales (d). Las barras horizontales indican el error estándar del promedio.

con concentraciones de 17.4 μM de N+N, 2.13 μM de fosfato y 27.2 μM de silicato (Figs. 9a-11a). En las secciones verticales de nutrientes se marcan las isolíneas de 1 y 20 μM de N+N (Fig. 6a), 0.8 y 2 μM de fosfato (Fig. 7a) y 10 y 30 μM de silicato (Fig. 8a) como referencias para mostrar la profundidad del inicio y la base de la nutriclina. En el caso del N+N la isolínea de 1 μM representa la base de una capa de mezcla agotada de nitrógeno. Las máximas concentraciones de nutrientes se observaron en las muestras más profundas (150 m de profundidad) y son de 24.4 μM para N+N, 2.8 μM para fosfato y 44.8 μM para silicato (Figs. 6a-11a).

El transecto A presenta zonas con y sin el efecto de remolinos ciclónicos en la distribución vertical de nutrientes (Figs. 6b-8b). Con base en esto el transecto se ha dividido en dos zonas. Las estaciones A01-A04 corresponden a la zona fuera del remolino como lo indica la forma casi paralela de las isopicnas y las estaciones A10-A13 pertenecen al núcleo del remolino CE-1 (Figs. 6b-8b).

Con base en los perfiles promedio de densidad la profundidad de la base de la capa de mezcla se encuentra a 20 m para ambas zonas (Figs. 12a y b). Las concentraciones promedio y los intervalos de concentración de nutrientes para la capa de mezcla en las diferentes zonas del transecto A se muestran en la tabla II. Las concentraciones promedio de N+N en la capa de mezcla para las dos zonas son similares (se excluyó un dato de 3.9 μM de N+N), siendo el promedio para toda la capa de mezcla del transecto de 0.2 μM . Igualmente, la concentración promedio de fosfato es relativamente constante en la capa de

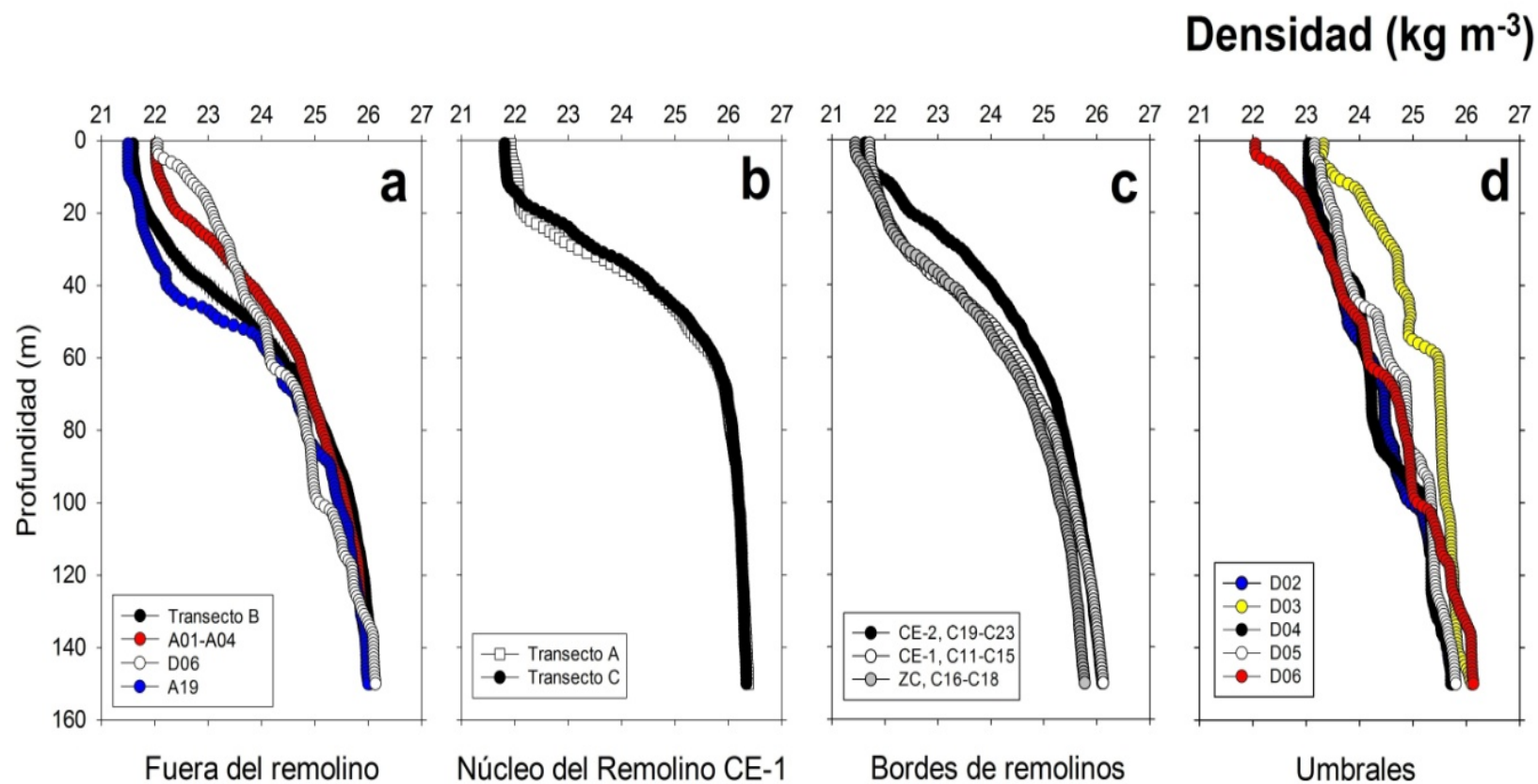


Figura 12. Perfiles verticales promedio de densidad (kg m^{-3}) para las zonas: fuera del remolino (a), núcleo del remolino CE-1 (b), bordes de remolinos (c) y umbrales (d).

mezcla a lo largo de todo el transecto ($\sim 0.8 \mu\text{M}$). La concentración promedio de silicato en la capa de mezcla a lo largo del transecto es de $\sim 6.2 \mu\text{M}$ (Tabla II; Figs. 6b-8b y 9-11 a y b).

Tabla II. Concentración promedio e intervalos de concentración de nutrientes (μM) en la capa de mezcla para la zona fuera del remolino y núcleo del remolino (20 m de profundidad) del transecto A.

Nutriente	Fuera del remolino TA	Núcleo del remolino CE-1
N+N	0.3 (0.08 - 0.51; n= 8)*	0.2 (0 - 0.18; n =7)
PO₄	0.83 (0.37 - 1.32; n= 9)	0.79 (0.69 - 0.90; n = 7)
Si(OH)₄	5.9 (2.2 - 9.6; n = 9)	5.2 (3.7 - 7.4; n = 7)

* Se excluyó un dato de $3.9 \mu\text{M}$ de N+N.

En los perfiles verticales promedios de nutrientes (Figs. 9-11a y b), la profundidad inicial de las nutriclinas (nitraclina, fosfaclina y silicaclina) es alrededor de 30 m. La concentración promedio del inicio de la nitraclina es $<1 \mu\text{M}$ (Fig. 9 a y b). Para la fosfaclina es alrededor de $0.9 \mu\text{M}$ (Fig. 10 a y b). El promedio de las concentraciones al inicio de la silicaclina es $\sim 7 \mu\text{M}$ (Fig. 11 a y b).

De acuerdo con los perfiles verticales promedio de nutrientes, a 75 m de profundidad se encuentra la base de la nitraclina (Fig. 9a y b), fosfaclina (Fig. 10a y b) y silicaclina (Fig. 11a y b) en las dos zonas. La máxima concentración promedio de nutrientes en la base de la nutriclina se encuentra en el núcleo del

remolino con 25.8 μM de N+N, 2.59 μM de fosfato y 38 μM de silicato (Fig. 9b-11b). Mientras que las mínimas concentraciones promedio pertenecen a la zona fuera del remolino con 14.4 μM de N+N, 2.13 μM de fosfato y 18.5 μM de silicato (Fig. 9a-11a).

A 150 m de profundidad las máximas concentraciones encontradas de N+N fueron 23.3 μM para la zona fuera del remolino (Fig. 9a) y 28.3 μM para la zona del núcleo del remolino (Fig. 9b). Para fosfato, 2.72 μM fuera del remolino (Fig. 10a) y 2.87 μM en el núcleo del remolino (Fig. 10b). Para silicato, 34 μM fuera del remolino (Fig. 11a) y 47 μM en el núcleo del remolino (Fig. 11b).

En las secciones verticales de nutrientes del transecto A se puede observar que la isolínea de 1 μM de N+N oscila (excluyendo una muestra) entre los 25 y los 40 m de profundidad (Fig. 6b). Esta isolínea coincide con la isopicna de 22.5 kg m^{-3} y su forma no muestra una influencia obvia del remolino. En contraste, la isolínea de 0.8 μM de fosfato, se hace somera hacia el núcleo del remolino y en la zona fuera del remolino cercana a la costa de Baja California, de tal manera que entre las estaciones A08-A11 y A01-A03 llega a la superficie (Fig. 7b). Cabe resaltar que, al igual que la isopicna de 22 kg m^{-3} , la isolínea de 0.8 μM de fosfato es más profunda en las estaciones fuera del remolino cercanas a la costa de Sonora (A18 y A19; ~50 m). La isopleta de 10 μM de silicato oscila entre 25 y 50 m de profundidad (Fig. 8b), siendo más profunda hacia los bordes externos del transecto.

Las isopletas de 20 μM de N+N y de 30 μM de silicato reflejan claramente la influencia del remolino en la distribución vertical de nutrientes a lo largo del transecto A. Mostrando una elevación desde ~150 m de profundidad en las estaciones fuera del remolino cercanas a Baja California (A01-A04), hasta ~60 m en el núcleo del remolino (Figs. 6b y 8b). En las estaciones cercanas a la costa de Sonora ambas isopletas se localizan ~100 m de profundidad (Fig. 6b). En contraste, en el transecto B dicha isopleta oscila a una profundidad entre ~100 y 140 m (Fig. 6a).

Para la descripción de la distribución de nutrientes el transecto C ha sido dividido en cuatro zonas: el núcleo del remolino CE-1 (C06-C09), el borde del remolino CE-1 (C11-C15), la zona de cizallamiento (C16-C18) y el borde del remolino CE-2 (C19-C23).

Los perfiles promedio de densidad muestran diferencias en la profundidad de la capa de mezcla en las diferentes zonas del remolino CE-1 y en la zona de cizallamiento (Fig. 12a-12c). En el borde del remolino CE-1 se encuentra hasta 30 m, en el núcleo a 15 m y en la zona de cizallamiento ~25 m (Fig. 12b y c). Las concentraciones promedio e intervalos de concentración para las cuatro zonas se muestran en la tabla III. Aunque existan diferencias en la profundidad de la capa de mezcla a lo largo del transecto, las concentraciones promedio de nutrientes en la capa de mezcla del transecto son 0.4 μM de N+N, 0.74 μM de fosfato y 9 μM de silicato (Tabla III).

Tabla III. Concentración promedio e intervalos de concentración de nutrientes (μM) en la capa de mezcla para las cuatro zonas del transecto C. Borde del remolino CE-1 (30 m de profundidad), núcleo del remolino CE-1 (15 m), zona de cizallamiento (25 m) y borde del remolino CE-2 (10 m).

Nutriente	Borde del remolino CE-1 (n= 11)	Núcleo del remolino CE-1 (n= 8)	Zona de cizallamiento (n= 7)	Borde del remolino CE-2 (n= 10)
N+N	0.4 (0 – 1.8)	0.2 (1 – 0.66)	0.4 (0 – 1.1)	0.6 (0.14 – 1.6)
PO₄	0.78 (0.46 – 1.13)	0.79 (0.53 – 0.96)	0.57 (0.45 – 0.71)	0.70 (0.51 – 1.05)
Si(OH)₄	8.2 (7.1 – 9.7)	7.9 (5.7 – 9.9)	8.7 (5 – 13.7)	9.9 (5.4 -12.7)

En los perfiles verticales promedio de nutrientes, la profundidad inicial de las nutriclinas en el núcleo del remolino CE-1 es de 30 m y la concentración promedio para cada nutriente es de 2.2 μM de N+N, 1.77 μM de fosfato y 14.8 μM de silicato (Figs. 9b-11b). La base de las nutriclinas en el núcleo del remolino se encuentran alrededor de 80 m de profundidad y la concentración promedio es de 25.9 μM de N+N, 2.73 μM de fosfato y 45.1 μM de silicato (Fig. 9b-11b). Los perfiles verticales promedios de nutrientes para los bordes de los remolinos y la zona de cizallamiento, no presentan una forma marcada de las nutriclinas como en el perfil del núcleo del remolino; por lo que no se distingue el inicio y base de las nutriclinas (Figs. 9c-11c).

Las concentraciones promedio encontradas a 150 m de profundidad se muestran en la tabla IV. La máxima concentración promedio de los nutrientes

se encuentra en el núcleo del remolino, mientras que la mínima concentración promedio de los nutrientes está en la zona de cizallamiento (Tabla IV; Figs. 9-11 y 6c-8c). Las mínimas concentraciones de nutrientes encontradas en la zona de cizallamiento, confirman que la interacción entre los remolinos CE-1 y CE-2 ocasiona el hundimiento de agua como se sugirió en la descripción de densidad (Figs. 6c-8c).

Tabla IV. Concentración promedio de nutrientes (μM) a 150 m de profundidad para las cuatro zonas del transecto C.

Nutriente	Borde del remolino CE-1 n=5	Núcleo del remolino CE-1 n=4	Zona de cizallamiento n=3	Borde del remolino CE-2 n=5
N+N	24.7 (19.9 – 28.1)	26.2 (22.7 – 27.8)	19.2 (18.4 – 19.7)	24 (21.9 – 25.2)
PO₄	2.82 (2.54 – 3.07)	2.90 (2.87 – 2.94)	2.45 (2.20 – 2.57)	2.64 (2.37 – 2.90)
Si(OH)₄	41.3 (34 – 46.3)	49.6 (46.3 - 51.9)	43.7 (40.8 – 49.5)	46.3 (40.7 – 49.9)

La distribución de nutrientes a lo largo del transecto C se muestra en las secciones de nutrientes (Figs. 7c-9c). En el remolino CE-1 (C01-C15) las isolíneas de $1 \mu\text{M}$ de N+N y $10 \mu\text{M}$ de silicato se ubican ~ 25 m de profundidad. En la sección de N+N en la zona de cizallamiento y el borde del remolino CE-2, la isolínea de $1 \mu\text{M}$ se encuentra a 10 m de profundidad (Fig. 6c); mientras que en la sección de silicato llega hasta la superficie en el borde del remolino CE-2 (Fig. 8c). En el caso del fosfato la isopleta de $0.8 \mu\text{M}$ es más somera en el núcleo del remolino (10 m de profundidad) que en las otras zonas (Fig. 7c).

Al igual que en el transecto A, la influencia del remolino CE-1 se observa en la elevación de las isoplethas de 20 μM de N+N, 2 μM de fosfato y 30 μM de silicato. La máxima elevación de las isoplethas varía entre 50 y 75 m de profundidad en el núcleo del remolino (Figs. 6c-8c). Por otro lado, en el borde del remolino CE-2 (C19-C23) se observa el ascenso de la isopletha de 20 μM de N+N desde 150 m de profundidad en la estación C19 hasta 75 m en la estación C23 donde se ubica la máxima elevación (Fig. 6c). En la zona de cizallamiento (C16-C18) la escala de color observada posterior a los 50 m de profundidad, indica mínimas concentraciones de nutrientes en comparación con otras zonas (Figs. 6c-8c). Las mínimas concentraciones encontradas a 150 m en esta zona (ver tabla IV) son incluso menores que las que se encontraron a la misma profundidad en la zona sin influencia de remolinos (transecto B: 24.4 μM de N+N, 2.8 μM de fosfato y 44.8 μM de silicato). Lo que se sugiere que hay hundimiento de agua por la interacción entre los dos remolinos ciclónicos.

El mecanismo de la mezcla vertical inducido por mareas y advección vertical (umbral San Lorenzo) es característico y dominante (persiste todo el año) en la región de las Grandes Islas (Marinone y Lavín, 2003; López *et al.*, 2008), este permite la disponibilidad permanente de nutrientes en la zona eufótica para el consumo del fitoplancton (Álvarez-Borrego, 2008). Todas las estaciones en el transecto D están influenciadas por la mezcla vertical, lo cual se refleja en la distribución de nutrientes (Figs. 6d-11d). En las secciones de nutrientes (Figs. 6d-8d) al igual que en los perfiles verticales de nutrientes

(Figs. 9d-11d) la columna de agua no presenta estratificación marcada. Los perfiles verticales de nutrientes se muestran por estación, debido a las diferencias en la profundidad de las isopícnas encontradas en cada estación (por ejemplo la estación D03 ubicada sobre el umbral de San Lorenzo).

A lo largo del transecto D, la concentración promedio y el rango de concentración en la superficie (0 m) es de 2.13 (0.13-4.13) μM de N+N, 0.93 (0.51-1.19) μM de fosfato y 13.5 (4.9-17) μM de silicato (Figs. 9d-11d). Las mayores concentraciones a través de la columna de agua se presentan en la estación D03 (Figs. 9d-11d). La concentración promedio y el intervalo de nutrientes encontrados a 150 m fueron de 22.4 (18.9-25) μM de N+N, 2.44 (2.26-2.60) μM de fosfato y 50 (42.1-56.8) μM de silicato (Figs. 9d-11d).

En comparación con los perfiles verticales de nutrientes de otras zonas, los perfiles del transecto D presentan las máximas concentraciones en la superficie (Figs. 9-11). A 150 m de profundidad la concentración de N+N en la estación D03 es 3 μM menor que en el núcleo del remolino (TC). Para el fosfato, también fue mayor la concentración en el núcleo del remolino (TC) con 0.3 μM . En el caso del silicato, las concentraciones fueron mayores en la estación D03 con ~7 μM más que en el núcleo del remolino (TC).

La importancia de la mezcla vertical en la región de las Grandes Islas, como mecanismo de inyección de nutrientes hacia la superficie, se enfatiza al comparar la posición de las isopletas de 1 μM de N+N, 0.8 μM de fosfato y 10

μM de silicato entre los diferentes transectos (Figs. 6-8). En las secciones de nutrientes de este transecto (Figs. 6d-8d), tales isopletras no son visibles debido a la presencia de mayores concentraciones de nutrientes en la superficie a causa de la mezcla vertical.

Las isopletras de $20 \mu\text{M}$ de N+N, $2 \mu\text{M}$ de fosfato y $30 \mu\text{M}$ de silicato (corresponden a la base de las nutriclinas sin influencia de remolinos) tienen forma de domo en la estación D03 (Figs. 6d-8d). Debido al flujo de agua profunda que entra al golfo (capa entre 250 - 500 m de profundidad) por circulación termohalina (Bray, 1988) que al chocar con el umbral de San Lorenzo es advectada verticalmente hacia la superficie (López *et al.*, 2008). En la estación D03 la isopletra de $20 \mu\text{M}$ de N+N se encuentra a 60 m de profundidad, la isopletra de $2 \mu\text{M}$ de fosfato se ubica a ~ 50 m y la isopletra de $30 \mu\text{M}$ de silicato se localiza a 25 m (Figs. 6d-8d). Al sur del umbral de San Lorenzo a partir de la estación D04 hasta la estación D06, las isopletras se mantienen a profundidades alrededor de 130 m para el N+N, ~ 125 m para el fosfato y entre 50-80 m para el silicato (Figs. 6d-8d).

6.2 Concentraciones integradas de nutrientes.

Las concentraciones de nutrientes fueron integradas hasta 60 m de profundidad, capa que corresponde a la zona eufótica, con el fin de comparar la disponibilidad de nutrientes para la comunidad fitoplanctónica en zonas con y sin influencia del remolino. Las concentraciones fueron mayores en el núcleo

del remolino en comparación con las zonas sin influencia de remolino, con excepción de las concentraciones de N+N y silicato en la estación D06 (Tabla V). Las concentraciones integradas en el núcleo del remolino CE-1 fueron mayores en la zona del transecto C respecto al transecto A (Tabla V). Para fines comparativos, la zona del núcleo del remolino correspondiente al transecto C se toma como referencia de los máximos valores encontrados. La concentración integrada de N+N en el núcleo del remolino (TC) fue 2.2 veces mayor que la encontrada en el transecto B; en cuanto a fosfato y silicato fue 1.4 veces mayor.

Tabla V. Concentraciones integradas de nutrientes (mmol m^{-2}) en la zona eufótica (0 – 60 m).

Nutriente	Fuera del remolino				Núcleo del remolino		Mezcla vertical
	TB n=10	A01- A04 n=4	A19	D06	TA n=4	TC n=4	D03
N+N	176	245	56	301	292	384	852
PO₄	55	74	41	68	75	77	121
Si(OH)₄	567	543	497	1262	648	856	2119

Las concentraciones de nutrientes también fueron integradas hasta 150 m que es la máxima profundidad de los datos obtenidos. Las concentraciones integradas hasta 150 m de profundidad presentan el mismo patrón que las concentraciones integradas hasta 60 m, con las mayores concentraciones en el

núcleo del remolino (Tabla VI). Las concentraciones fueron 1.4 veces mayores para el N+N y el silicato, el fosfato fue 1.2 veces mayor en el núcleo del remolino (TC) en comparación con la zona sin influencia del remolino (TB).

En el transecto D, las máximas concentraciones integradas de nutrientes fueron encontradas en la estación D03 mientras que las mínimas se presentaron en la estación D06 (tabla V y VI). Las concentraciones integradas hasta 60 m fueron 2.8, 1.8 y 1.7 veces mayores en la estación D03 que en la estación D06 para el N+N, el fosfato y el silicato, respectivamente. En cuanto a las concentraciones integradas hasta 150 m, fueron 1.6, veces mayores en la estación D03 para el N+N y 1.4 tanto para el fosfato y el silicato.

Las concentraciones integradas de la estación D03 se comparan con las concentraciones del transecto B (zona sin influencia de mezcla vertical ni de remolinos de mesoescala), para evaluar la importancia de la mezcla vertical en la concentración de nutrientes en aguas superficiales del golfo. Las concentraciones integradas hasta 60 m de profundidad fueron 5, 2.2 y 3.7 veces mayores en la estación D03 para N+N, fosfato y silicato, respectivamente. Las concentraciones integradas hasta 150 m fueron 1.5, 1.4 y 1.9 veces mayores en la estación D03 para N+N, fosfato y silicato, respectivamente.

Tabla VI. Concentraciones integradas de nutrientes (mmol m^{-2}) de 0 hasta 150 m de profundidad.

Nutriente	Fuera del remolino				Núcleo del remolino		Mezcla vertical
	TB n=10	A01- A04 n=4	A19	D06	TA n=4	TC n=4	D03
N+N	1958	1831	1837	1917	2738	2725	3013
PO₄	252	294	259	247	313	313	352
Si(OH)₄	3600	2766	3112	4902	4409	5017	7068

Para contrastar el efecto en la disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica entre el bombeo por el remolino de mesoescala (núcleo TC) y la mezcla vertical (D03) se comparan las concentraciones integradas. Las concentraciones integradas hasta 60 m de profundidad fueron 2.2, 1.6 y 2.5 veces mayores en la estación D03 para N+N, fosfato y silicato, respectivamente. Las concentraciones integradas hasta 150 m fueron mayores en la estación D03 que en el núcleo del remolino con 1.1 veces mayor para N+N y fosfato y 1.4 veces mayor para el silicato.

6.3 Razones de nutrientes.

Todos los datos obtenidos durante el crucero fueron incluidos en los perfiles verticales de las razones N/P y Si/N vs. densidad (Fig. 13). El perfil vertical de la razón N/P con respecto a la densidad (Fig. 13a) muestra que casi todos los

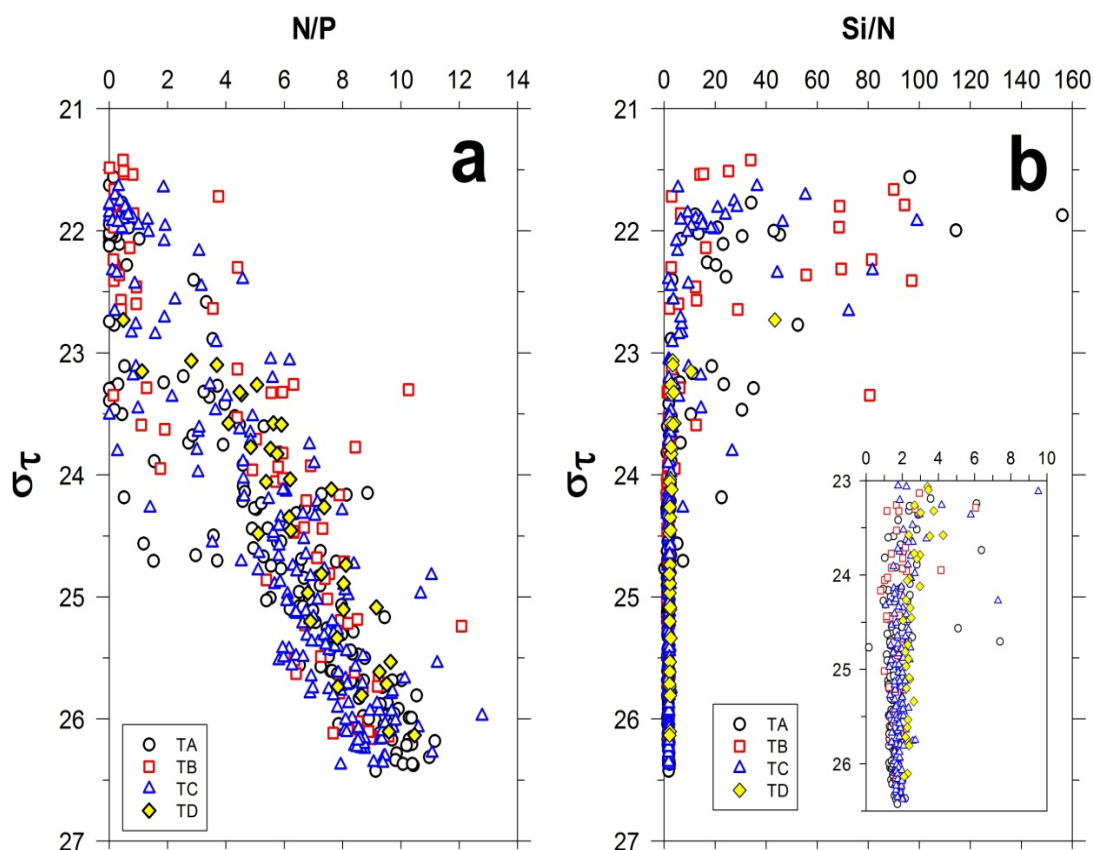


Figura 13. Perfiles verticales de la razón N/P vs. Densidad (a) y la razón Si/N vs. Densidad (b). Se utilizaron todos los datos obtenidos en este estudio y se agruparon por transecto. En la esquina inferior derecha (b) se muestra la ampliación en la escala a partir de 23 kg m^{-3} .

valores fueron menores que 2 en la capa de mezcla ($< 22.5 \text{ kg m}^{-3}$), indicando la limitación del crecimiento del fitoplancton por nitrógeno en la superficie.

El valor promedio de la razón N/P en las muestras más profundas ($> 26 \text{ kg m}^{-3}$) fue de 9. Los valores demuestran que la razón de N/P es menor a la propuesta por Redfield (1958) con un valor de 16. El perfil vertical de la razón Si/N (Fig. 13b) muestra en la capa de mezcla los máximos valores que oscilan entre 120 y 1 (excluyendo un valor de 160); mientras que a partir de 24.5 kg m^{-3}

el valor promedio es 2. Todos los valores están por encima del valor de 1 que es la razón de consumo de Si/N por diatomeas reportado por Brzezinski (1985).

La proporción de N:P propuesta por Redfield (1958) para el requerimiento metabólico del fitoplancton es de 16:1 y la proporción de Si:N propuesta por Brzezinski (1985) es de 16:16. Estos valores indican la proporción atómica en que son consumidos los nutrientes por el fitoplancton y/o liberados por la remineralización de materia orgánica. La relación de N vs. P y Si vs. N se muestran en la Fig. 14, que mediante el análisis de regresión lineal se obtuvo la pendiente con valor de 11 para N:P (Fig. 14a) y de 1.4 para Si:N (Fig. 14b). En particular para la razón Si:N existe un patrón horizontal donde el transecto D presenta una razón mayor con un valor de 2.5 (Figs. 13b y 14b).

6.4 N^*

Todos los valores de N^* fueron negativos en la columna de agua, con valores máximos de $-6 \mu\text{M}$ y valores mínimos de $-22 \mu\text{M}$. Los valores negativos se deben a la intensa señal de desnitrificación de las masas de agua provenientes del ecuador que entra al Golfo de California en verano, tales como el Agua Subsuperficial Subtropical y el Agua Superficial Ecuatorial.

Existe una tendencia general de los valores de N^* en la región central del golfo durante el verano, los valores son menos negativos en la superficie y disminuyen con la profundidad. Los valores cercanos a cero confirman la

dominancia del proceso de la fijación de nitrógeno en la superficie durante el verano (White *et al.*, 2013).

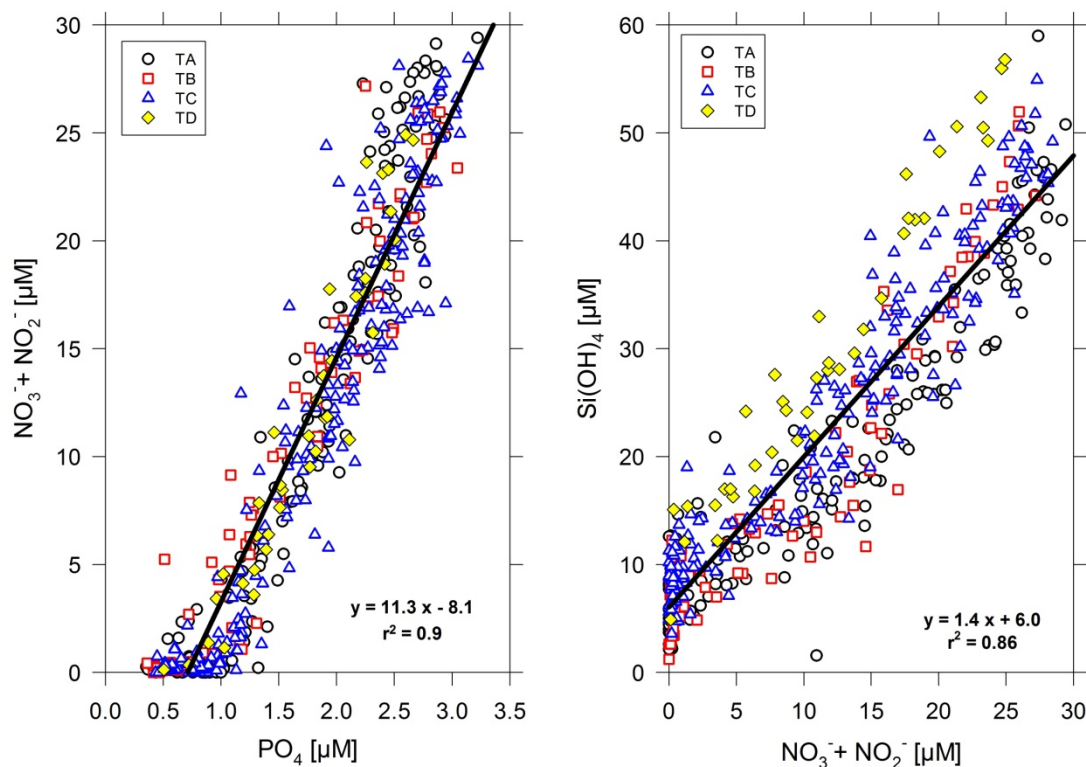


Figura 14. Diagrama de N+N vs fosfato (izquierdo) y diagrama de silicato vs. N+N (derecha). Utilizando todos los datos del muestreo.

Dicha tendencia se presenta en los perfiles verticales promedios de las diferentes zonas (Fig. 15). Los perfiles de la zona fuera del remolino presentan los valores menos negativos en la superficie, con un promedio de $-7 \mu\text{M}$ (Error estándar = 0.61; Fig. 15a). Los valores promedios en la superficie de la zona del núcleo del remolino, bordes de remolinos y umbrales son de $-10.1 \mu\text{M}$ (0.50), $-8.0 \mu\text{M}$ (0.44), $-11.7 \mu\text{M}$ (1.24), respectivamente (Fig. 15b, c y d). Los valores

promedios encontrados a 150 m son de $-17.3 \mu\text{M}$ (0.61), -17 (0.90), $-16.5 \mu\text{M}$ (0.84) y $-14.7 \mu\text{M}$ (1.05) para fuera del remolino, bordes de remolinos, núcleo del remolino y umbrales, respectivamente (Fig. 15).

Cabe destacar que en los perfiles de las zonas fuera y bordes de remolinos se observa un gradiente marcado a través de la columna de agua, en el que a partir de los 50 m de profundidad los valores de N^* aumentan conforme se acercan a la superficie (Fig. 15a y c). En las zonas del núcleo del remolino y umbrales este gradiente no es tan marcado (Fig. 15d y d), sin embargo no significa que no haya fijación de nitrógeno y quizá refleje la intensidad del proceso en las diferentes zonas.

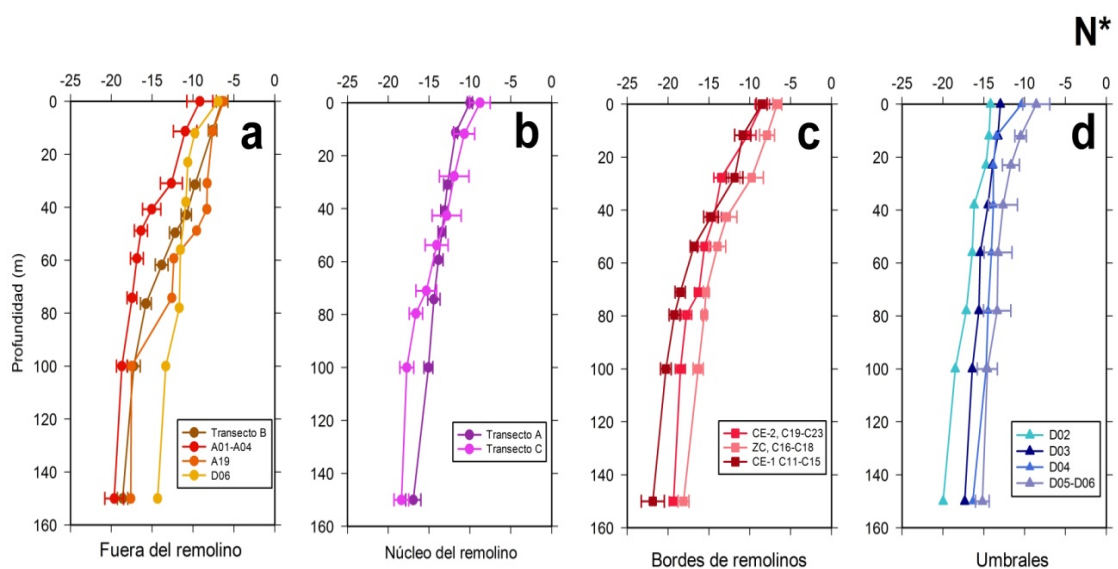


Figura 15. Perfiles verticales de N^* (μM) para las zonas: fuera del remolino (a), núcleo del remolino (b), bordes de remolinos (c) y umbrales (d). Las barras horizontales indican el error estándar del promedio.

En el transecto B se distinguen dos capas a través de la columna de agua: la capa superficial de 0 a 50 m de profundidad caracterizada con máximos valores y la capa entre 50 y 150 m con valores mínimos (Fig. 16a). En este transecto sobresalen los mínimos valores de N^* posteriores a los 75 m en las estaciones B09 y B10.

En el transecto A se distingue la variabilidad espacial tanto superficial como profunda (Fig. 16b). En las estaciones cercanas a la costa de Sonora (A19-A16) los máximos valores superficiales o bien, cercanos a cero, se encuentran hasta 50 m de profundidad mientras que en las estaciones cercanas al núcleo del remolino (A07-A13) los valores son menores a la misma profundidad (Fig. 16b). Por debajo de los 75 m se perciben valores mínimos en ambas costas (estaciones A19-A17 y A01-A05) en comparación con las estaciones cercanas al núcleo del remolino. El mismo patrón de variabilidad espacial ocurre en el transecto C (Fig. 16c). Las estaciones que pertenecen a la zona de bordes de remolinos (C12-C23) al igual que las estaciones C01-C05, presentan valores superficiales máximos y mínimos debajo de los 75 m de profundidad (Fig. 16c). En el núcleo del remolino los valores superficiales son menores respecto a las otras zonas del mismo transecto.

En la superficie de las estaciones más sureñas (D04-D06) del transecto D (Fig. 16d) se observa máximos valores superficiales, mientras que en las estaciones norteñas (D02-D03) los valores disminuyen.

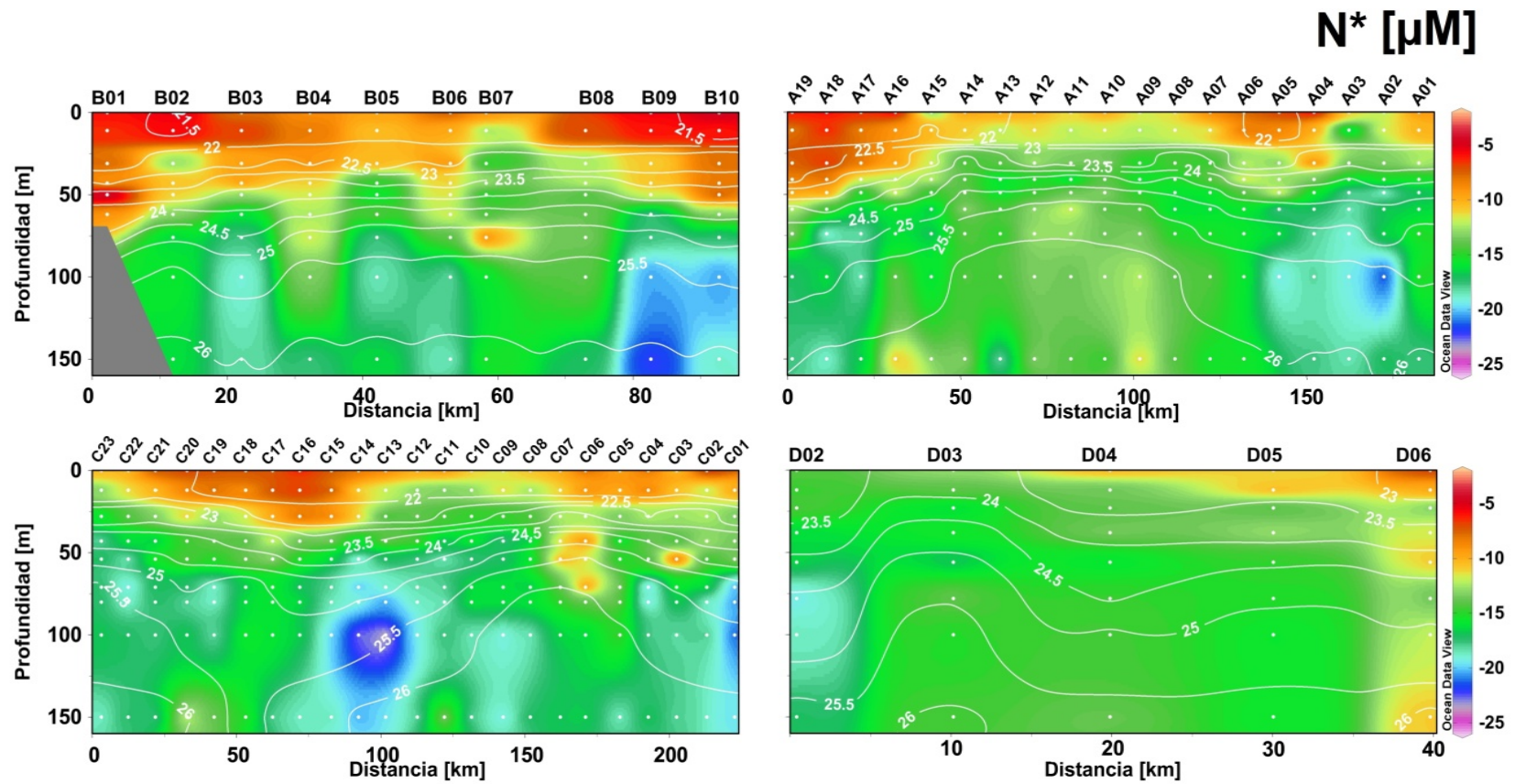


Figura 16. Secciones verticales de N^* (μM) para cada transecto: (a) transecto B, (b) transecto A, (c) transecto C y (d) transecto D.

7. Discusión.

Este estudio es pionero en documentar la influencia de remolinos de mesoescala sobre la distribución de nutrientes en la parte central del Golfo de California en verano, época del año en la cual este tipo de remolinos son recurrentes (Pegau *et al.*, 2002; Zamudio *et al.*, 2008). En otras regiones oceánicas, particularmente en regiones oligotróficas, los remolinos ciclónicos de mesoescala han sido propuestos como mecanismos de aporte de nutrientes hacia la zona eufótica, y en consecuencia, como mecanismos de fertilización que promueven el aumento de la biomasa fitoplanctónica (McGuillicuddy *et al.*, 1999; Bibby *et al.*, 2008; Rii *et al.*, 2008). En este estudio, la inyección de nutrientes hacia la zona eufótica por efecto de remolinos ciclónicos en el Golfo de California, se hace evidente al observarse en el núcleo del remolino CE-1 concentraciones integradas (de la superficie hasta los 60 m) de nutrientes notoriamente mayores que en áreas sin influencia de remolinos. También en el núcleo del remolino CE-1, en la zona del máximo profundo de clorofila, se observaron los valores más altos de Chla (Sánchez-Velasco *et al.*, 2013) coincidiendo con la parte superior de la nutriclina. Nuestras observaciones son relevantes para el entendimiento del funcionamiento del ecosistema del Golfo de California, particularmente en su región central, donde en el verano sus aguas superficiales (en la capa de mezcla) presentan baja producción primaria (Santamaría-Del-Ángel *et al.*, 1994; Kahru *et al.*, 2004) reflejando una fuerte

limitación por nitrógeno (White *et al.*, 2013). Proponemos que durante el verano, la inyección de nutrientes (particularmente de nitrógeno inorgánico) por remolinos de mesoescala hacia la zona eufótica en el Golfo central, puede representar un mecanismo fundamental para el sostenimiento de altas tasas de producción primaria en la zona del máximo profundo de clorofila. Este mecanismo de fertilización ha sido pasado por alto, aún en las revisiones más recientes (Álvarez-Borrego *et al.*, 2012).

7.1 Características físicas del área de estudio - Transectos B y D.

Durante la campaña oceanográfica realizada en este estudio se cubrieron tres zonas con características físicas contrastantes: (a) una zona con intensa estratificación de la columna de agua, cubierta con el transecto B; (b) una zona con intensa mezcla vertical correspondiente a la región de los umbrales, cubierta con el transecto D; y (c) una zona con presencia de remolinos de mesoescala, cubierta con los transectos A y C. Estas características físicas, en combinación con los procesos biológicos de adición y remoción, determinan la forma de los perfiles verticales de nutrientes en la región de estudio.

Consideramos que el transecto B representa condiciones sin perturbación del océano por actividad de mesoescala, ya que desde la base de la capa de mezcla hasta ~230 m de profundidad las isopícnas fueron casi paralelas a la superficie del mar (Fig. 5a). A lo largo de este transecto, la capa

de mezcla, delimitada por la isopicna de 22.0 kg m^{-3} , tuvo una profundidad entre 25 y 30 m. A partir de esta profundidad y hasta ~ 75 m, se localizó la picnoclina cuya base está determinada por la isopicna de 25.0 kg m^{-3} (Fig. 5a y 6a). En ausencia de remolinos de mesoescala, la fuerte estratificación observada en el transecto B es un rasgo esperado para la región central y sur del GoC, ya que durante el verano las temperaturas ambientales son altas y los vientos provenientes del sureste son débiles (Soto-Mardones *et al.*, 1999; Páres-Sierra *et al.*, 2003). En esta zona fuertemente estratificada, la isopicna de 26.0 kg m^{-3} se mantuvo alrededor de los 125 m de profundidad; en este estudio utilizamos la posición de dicha isopicna como referencia para la descripción del efecto de los remolinos de mesoescala y la mezcla vertical en la región de los umbrales, en la distribución vertical de los nutrientes.

En contraste con el transecto B, el transecto D se ubicó en una zona donde la mezcla vertical es intensa a lo largo de todo el año. En este transecto, que incluyó la zona del umbral de San Lorenzo, la mezcla vertical inducida por las mareas y la advección (Marinone y Lavín, 2003; López *et al.*, 2008) se manifiesta con valores de densidad relativamente altos para el agua superficial (Fig. 5d). A lo largo de aproximadamente 40 km, entre las estaciones D05 y D01, el agua superficial presenta valores de densidad entre 23.0 y 23.4 kg m^{-3} , que contrastan con valores menores que 22.0 kg m^{-3} en el agua superficial del resto de las estaciones muestreadas en este estudio. Es decir, la mezcla vertical evita que en la región de los umbrales se forme una capa de mezcla

con altas temperaturas como la observada hacia el sur en los transectos C, A y B, y promueve que en la superficie afloren aguas que en condiciones sin mezcla vertical se encontrarían entre 30 y 50 m de profundidad (Fig. 5a). Como lo refleja la distribución de la isopícnica de 26.0 kg m^{-3} en el transecto D, la circulación y la mezcla en la región es compleja. A la altura de la cumbre del umbral (estación D03) la isopícnica de 26.0 kg m^{-3} se encontró a 150 m de profundidad, es decir, 25 m más profunda que en la región estratificada y 20 m más profunda que en la estación D08 ubicada a 60 km al sur del umbral. El hundimiento de las isopícnicas de 25.5 a 26.3 kg m^{-3} hacia el norte del umbral, en el Canal de Ballenas, es aún más notorio como lo refleja la posición de la isopícnica de 26.0 kg m^{-3} que en la estación D01 se localizó a 250 m. Dicho hundimiento es consistente con el mecanismo de desbordamiento (overflow en inglés) descrito por López *et al.* (2008) mediante el cual agua proveniente del sur y que fluye cerca del fondo por encima de los umbrales (esencialmente Agua Subsuperficial Subtropical) se hunde rápidamente al rebasar el umbral para llenar las cuencas profundas de Canal de Ballenas y Cuenca Tiburón.

En contraste con el hundimiento observado en la región de los umbrales y el Canal de Ballenas, como se describe a continuación, el remolino ciclónico CE-1 observado en este estudio tuvo el efecto de elevar la isopícnica de 26.0 kg m^{-3} hasta ~ 70 m, cerca de 55 m por arriba de su nivel de referencia (transecto B).

7.2 Características físicas del área con remolinos - Transectos A y C.

Sánchez-Velasco *et al.* (2013) recientemente describieron las características físicas de la zona de estudio y de manera particular del remolino ciclónico CE-1. A continuación se destacan algunos aspectos descritos por dichos autores y se enfatizan los rasgos físicos de las aguas de los primeros 150 m de profundidad correspondientes a la capa donde se hicieron análisis de nutrientes.

El transecto A cruzó cerca del centro del remolino ciclónico CE-1, mientras que el transecto C cruzó por el centro de dicho remolino, así como una porción del remolino ciclónico CE-2 (estaciones C19-C23). Si bien el análisis de las imágenes satelitales de Chla no permitió definir la dirección de rotación del remolino CE-2, la forma de las isopícnas y la distribución del campo de velocidades (con máxima velocidad superficial de $\sim 0.4 \text{ m s}^{-1}$) permitió inferir su circulación ciclónica (Sánchez-Velasco *et al.*, 2013). Debido a su cercanía, entre los remolinos CE-1 y CE-2 se presentó una zona de cizallamiento de $\sim 20 \text{ km}$ de ancho (estaciones C16-C18), debido al roce de las corrientes con direcciones opuestas, lo que produjo un hundimiento de agua detectado por la depresión de las isopícnas con valores $>25 \text{ kg m}^{-3}$. En esta zona de cizallamiento, la isopícna de 26 kg m^{-3} se ubicó en los 200 m, 75 m más profunda que su posición en el transecto B (Fig. 5a y c).

El remolino CE-1 tuvo forma elíptica, con un diámetro >160 km a lo largo del transecto C mientras que en el transecto A fue de ~140 km. Presentó una profundidad de alrededor de 500 m, con una velocidad geostrofica máxima en superficie de $\sim 0.5 \text{ m s}^{-1}$ por lo que el periodo de rotación fue de ~11 días. El análisis de imágenes de satélite indica que el remolino CE-1 estuvo presente en la parte central del golfo durante 3 meses (Junio-Agosto 2011). Sánchez-Velasco *et al.* (2013) consideran que en el momento del cruce, el remolino CE-1 se encontraba en un estado maduro de acuerdo con el “ciclo de vida” de remolinos descrito por Sweeney *et al.* (2003). Dicho estado es sugerido por la presencia de altas temperaturas y altas salinidades en aguas superficiales en la zona del núcleo del remolino, siendo que los remolinos ciclónicos se suelen definir como remolinos de núcleo frío (McGillicuddy *et al.*, 1999; Sweeney *et al.*, 2003). Altas temperaturas y altas salinidades en la superficie sugieren que durante la campaña de muestreo el remolino ya estaba completamente formado, y es posible que el agua profunda que llegó a la superficie (con baja temperatura y baja salinidad) durante la etapa de intensificación, fue atrapada en el núcleo del remolino y con el paso del tiempo, debido a la ganancia de calor y a la evaporación, sus propiedades conservativas fueron modificadas. Otra evidencia que sugiere que el estado de desarrollo del remolino era maduro, es que las concentraciones de Chla en el máximo profundo de clorofila fueron mayores en el núcleo que en aguas adyacentes (Sánchez-Velasco *et al.*, 2013). Sweeney *et al.* (2003) señalan que una de las características del

estado de maduración de los remolinos es la respuesta biológica, como el aumento en la biomasa fitoplanctónica, a causa del incremento en la disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica por efecto del remolino.

Para los fines de este estudio definimos el núcleo del remolino CE-1 como la zona entre las estaciones A10-A13 y C06-C09, es decir, el núcleo tiene un diámetro aproximado de 30-40 km. Dicho diámetro fue delimitado con base en el cruce de la isolinia de 20 μM con la isobata de 60 m en las secciones verticales de N+N (Fig. 6b y c). Es decir, es la zona a través de la cual se inyecta agua con concentraciones "altas" de nitrógeno inorgánico disuelto hacia la zona eufótica. Cabe aclarar que esta definición es diferente a la reportada por Sánchez-Velasco *et al.* (2013), quienes la delimitan como la zona de aprox. 20 km de diámetro donde las velocidades geostroficas en la superficie fueron mínimas.

7.3 Caracterización de la zona eufótica

La disponibilidad de nutrientes dentro de la zona eufótica es un factor importante para los organismos fitoplanctónicos ya que los nutrientes controlan el crecimiento de estos microorganismos y esto se refleja en la magnitud de la producción primaria. Para evaluar cualitativamente la relevancia de los remolinos en el abasto de nutrientes en la región central del Golfo de California, en este estudio hemos considerado que el límite de la zona eufótica se localiza a ~60 m de profundidad. Aunque es claro que la profundidad de la zona

eufótica es variable aún en una misma región (Malinverno *et al.*, 2008; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego, 2001), la profundidad de referencia que elegimos representa una de las profundidades máximas reportadas para la zona eufótica en el golfo central (Malinverno *et al.*, 2008). Con base en la distribución de la temperatura dividimos la zona eufótica en dos capas, similar a la clasificación realizada por Coale y Bruland (1987). La capa superficial corresponde a la capa de mezcla, la cual tiene un espesor de ~20 m de profundidad en la parte central del golfo. Cabe señalar que la capa de mezcla en la zona de umbrales no está marcada como en los transectos A, B y C, sin embargo, se tomó en cuenta los primeros 20 m de profundidad para fines comparativos. La segunda capa se encuentra por debajo de la capa de mezcla y corresponde a la parte superior de la termoclina, esta capa subsuperficial comprende desde los 20 m hasta los 60 m de profundidad. A continuación se discuten las características de cada capa.

Uno de los aspectos importantes a destacar sobre las características físicas de la región de estudio es la ubicuidad de la capa de mezcla generada por las altas temperaturas. En los transectos B, A y C, la mayoría de las estaciones presentó temperaturas en la capa de mezcla entre 30 y 31°C. Estas temperaturas tan elevadas favorecen una estratificación tal que impide el aporte de nutrientes desde aguas subsuperficiales, aún en el núcleo del remolino, de tal manera que el nitrógeno inorgánico disuelto se encuentra prácticamente abatido (concentraciones de N+N <0.3 µM). En contraste con el

N, las concentraciones de fosfato y silicato en esta capa de mezcla se encuentran por encima de las concentraciones limitantes del crecimiento fitoplanctónico (Wu *et al.*, 2000; Egge y Aksnes, 1992; Tabla VII). La estratificación y el agotamiento de N en la superficie de la región central del golfo durante el muestreo indican que el bombeo de agua hacia la superficie por influencia del remolino CE-1 no fue capaz de romper la estratificación. Por tal motivo, y como fue observado por Pegau *et al.* (2002), las imágenes satelitales de temperatura superficial del mar no son un buen medio para detectar remolinos durante el verano en la parte central del GoC, en contraste con estudios para otras regiones donde si se observan los remolinos de mesoescala con el parámetro de la temperatura (Dickey *et al.*, 2007; Nencioli *et al.*, 2008).

Las condiciones de alta temperatura y de fuerte limitación por nitrógeno observadas en el golfo central son ideales para la proliferación de organismos fijadores de N, cuya presencia y actividad en la región de estudio han sido documentadas recientemente (White *et al.*, 2007; White *et al.*, 2013). El tema de la fijación de N en el Golfo Central durante el verano y las evidencias sobre este proceso surgidas de nuestros datos se discute más adelante. Claramente, en el transecto D no se presenta una capa de mezcla similar a la del resto de la región de estudio como lo indica el promedio de la temperatura superficial de 27°C observado entre las estaciones D02 y D04 (Tabla VII), con las temperaturas mínimas observadas en la estación D03 sobre el umbral. En

dichas estaciones la concentración superficial promedio de N+N fue de 4 μM , valor que indica que en esta zona de intensa mezcla no existe limitación por nitrógeno y por lo tanto la fijación de N no debe ser un proceso importante.

Tabla VII. Características físico-químicas de la capa de mezcla para la zona del núcleo del remolino, el transecto B y la zona de umbrales durante el verano.

	TB	Núcleo del remolino CE-1	Zona de umbrales
Temperatura (°C)	30 (27-32)	31 (28-31)	27 (26-27) [§]
Profundidad (m)	20	20	20 [‡]
N+N (μM)	0.3 (n=29)*	0.2 (n=16)	4 (n=8) ^a
PO₄ (μM)	0.6 (n=29) [†]	0.8 (n=16)	1.1 (n=8) ^b
Si(OH)₄	7.1 (n=30)	6.6 (n=16)	16.5 (n=8) ^c

[§] Promedio de las estaciones D02, D04 y D05; excluyendo los valores (23-26; n=3) de la estación D03 y los valores (27-30; n=3) de la estación D06.

[‡] Profundidad seleccionada para fines comparativos con la parte central del Golfo de California.

* Se excluyó un dato de 1.08 μM de N+N.

[†] Se excluyó un dato de 1.18 μM de fosfato.

^a ^b ^c Se excluyeron dos datos de cada nutriente, correspondientes a la estación D06.

7.4 Efecto de los remolinos de mesoescala en la distribución de nutrientes.

La distribución vertical de las concentraciones de nutrientes en la capa superior del océano (0-150 m) en la zona de estudio muestra claramente el efecto de los procesos físicos. El bombeo vertical de agua inducido por el remolino CE-1, es evidente en los perfiles de densidad en el núcleo del remolino (Fig. 6b), que produjo una estructura de 3 capas muy bien definidas. La capa de mezcla (0-20 m) y la capa profunda (60-150 m) presentaron

densidades casi constantes, y entre 20 y 60 m se generó una intensa pycnoclina. Cabe observar que fuera del núcleo del remolino, en ninguna otra zona, incluyendo la región de los umbrales, se presentaron aguas tan densas ($26.2-26.4 \text{ kg m}^{-3}$) entre 60 y 150 m de profundidad. El bombeo vertical por el remolino generó, a su vez, los perfiles de nutrientes con nutriclinas más marcadas entre los 30 y los 70 m (Figs. 10-12b), para las estaciones en el núcleo; los gradientes de concentración en estas nutriclinas fueron 0.6 , 0.04 y $0.8 \mu\text{M}$ por metro para N+N, fosfato y silicato respectivamente. En el caso de los tres nutrientes, por debajo de estas nutriclinas intensas las concentraciones fueron altas y casi constantes hasta los 150 m de profundidad. Por ejemplo, para el N+N la capa de mezcla en el núcleo del remolino presentó concentraciones $<0.3 \mu\text{M}$, un incremento de 0.3 a $25 \mu\text{M}$ de 30 a los 70 m, y entre 70 y 150 m valores alrededor de $26-28 \mu\text{M}$ (Fig. 9b). En el caso de las zonas estratificadas (Figs. 9a-11a), las nutriclinas fueron mucho menos marcadas. Para el N+N en el transecto B, las concentraciones incrementaron de <0.3 a $17 \mu\text{M}$ de los 30 a los 70 m, generando un gradiente de $0.4 \mu\text{M}$ de N+N por metro. Por otro lado, en la región de los umbrales, debido a la intensa mezcla vertical la mayoría de los perfiles carecen de nutriclinas y presentan un incremento monotónico desde la superficie hasta los 150 m (Figs. 9d-11d); excluyendo la estación D03, entre la superficie y los 150 m las concentraciones de N+N incrementaron en $20 \mu\text{M}$, es decir, $0.13 \mu\text{M}$ por metro. Como en el caso de la densidad, tanto para el N+N como para el fosfato, en el presente

estudio las mayores concentraciones entre 70 y 150 m fueron observadas en el núcleo del remolino (Fig. 9b), aún en comparación con la región de los umbrales (Fig. 9d) que suele ser considerada la zona más rica en nutrientes de la región centro-sur del GoC por efectos de la mezcla vertical (Álvarez-Borrego *et al.*, 1978; Millán-Núñez y Yentsch, 2000; Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 2001).

El agua que arribó, junto con sus propiedades biogeoquímicas, a 150 m por el efecto del remolino CE-1 provino de una profundidad entre 225 y 250 m, mientras que el agua que llegó a 60 m, la base de la zona eufótica, provino desde 100 m. La influencia del remolino CE-1 sobre la distribución de nutrientes en la capa de 0-150 m es evidente al comparar las concentraciones integradas en el núcleo con las concentraciones integradas de estaciones fuera del núcleo (Tabla VI). El contenido (“pool”) de nutrientes en el núcleo del remolino equivale aproximadamente al 90% del contenido de N+N y fosfato, y alrededor de 62-71% del contenido de silicato observados en la estación D03, estación con la máxima influencia de la mezcla vertical en la región de las grandes Islas. En las zonas estratificadas “estables” (sin remolinos), el contenido de N+N equivale al 60-65% del contenido de la estación D03, mientras que el fosfato y silicato equivalen a 72-84% y 39-51% respectivamente.

La tendencia espacial de las secciones verticales (Fig. 6 a 8) y de las concentraciones integradas de nutrientes (Tabla V) indican que ocurre un enriquecimiento particular del silicato, en comparación con el fosfato y el N+N,

hacia la zona de los umbrales en la capa superior del océano en la región de estudio. La posición de las isolíneas de referencia en las figuras 6 a 8 indica que únicamente en el caso del silicato, su isolínea de referencia ($30 \mu\text{M}$) es más somera en el transecto D que en los otros transectos. Este enriquecimiento del silicato refleja una diferencia en su comportamiento biogeoquímico que induce un desacoplamiento con relación al N+N y el fosfato. El notable desacoplamiento del silicato con respecto al N+N y el fosfato se puede explicar parcialmente por la diferencia notoria en su función biológica. El N+N y el fosfato son asimilados por el fitoplancton para la síntesis de compuestos orgánicos que rápidamente pueden ser remineralizados e incorporarse al pool disuelto gracias a la actividad microbiana. En contraste, el silicato es asimilado en el océano principalmente por diatomeas para transformarlo en ópalo biogénico, un compuesto inorgánico que durante su transporte hacia el fondo del océano se recicla vía la disolución. Dependiendo de varios factores y condiciones oceanográficas, el ópalo puede ser exportado de manera más eficiente que la materia orgánica, tal como lo observaron Benítez-Nelson *et al.* (2007) en un estudio del efecto de remolinos de mesoescala en los flujos de exportación de material biogénico (N, P y Si) particulado en la región de Hawai'i.

7.5 Distribución de nutrientes en la capa eufótica y su relación con el máximo profundo de clorofila a.

Las concentraciones integradas de nutrientes en la zona eufótica (0 - 60 m de profundidad) son mayores en la zona del núcleo del remolino en comparación con las zonas sin el efecto del remolino (Tabla V). Las concentraciones integradas de nutrientes fueron 2.2 veces mayores para N+N y 1.5 veces mayor para fosfato y silicato en la zona del núcleo del remolino en el transecto C comparadas con la zona fuera del remolino en el transecto B. Esta variabilidad horizontal de la concentración de nutrientes indica que el remolino ciclónico de mesoescala en el GoC actuó como un mecanismo de aporte vertical de nutrientes hacia de la capa eufótica, como se ha reportado para remolinos ciclónicos en otras regiones oceánicas como el Mar de los Sargazos en el Atlántico (McGillicuddy *et al.*, 1998), Hawai'i en el Pacífico Central (Mahaffey *et al.*, 2008) o el Golfo de Bengala en el Mar Índico (Prasanna Kumar *et al.*, 2007). Es importante notar que el aporte de nutrientes por el remolino CE-1 fue un fenómeno subsuperficial, es decir, no se enriqueció toda la capa eufótica sino que el enriquecimiento se presentó en la capa entre 30 y 60 m de profundidad. Ya que de acuerdo con Sánchez-Velasco *et al.* (2013) el muestreo se realizó cuando el remolino se encontraba en una etapa madura de su ciclo de vida, es posible que el enriquecimiento con nutrientes haya sido mayor en días previos al muestreo, durante la etapa de desarrollo del remolino (Sweeney *et al.*, 2003). Lo que no sabemos hasta el momento es si

este enriquecimiento pudo llegar a la superficie durante la etapa de desarrollo del remolino, pues para ello el remolino debió romper la fuerte estratificación en la capa de mezcla y generar un núcleo de agua fría evidente en imágenes satelitales de temperatura superficial del mar. Pegau *et al.* (2002) indican que es difícil el rastreo de remolinos mediante la temperatura superficial del mar en el GoC durante verano, sin embargo en ocasiones se han observado pequeños gradientes de temperatura (2-3°C) atribuidos a remolinos (Santamaría-Del Ángel *et al.*, 1999). El hecho que los remolinos ciclónicos no rompan la capa de mezcla es un fenómeno que ha sido documentado para otros sitios con fuerte estratificación en el verano (Prasanna Kumar *et al.*, 2007).

Se ha reportado que el aporte de nutrientes hacia la capa eufótica por efecto de los remolinos ciclónicos de mesoescala suele inducir el aumento en la biomasa fitoplanctónica, principalmente en el núcleo del remolino (McGillicuddy *et al.*, 2007; Bibby and Moore, 2011). Este aumento en la biomasa fitoplanctónica se manifiesta por la presencia de un máximo profundo de Chl_a ubicado en la nitraclina, que coincide con la máxima elevación de isopícnas por la influencia de los remolinos (Bibby and Moore, 2011; Rii *et al.*, 2008; Li & Hansel, 2008; Nencioli *et al.*, 2010). En el presente estudio, en los lances hidrográficos de todas las estaciones de los transectos A, B y C (*i.e.*, con o sin influencia de remolinos) así como en las estaciones D05 a D08 (*i.e.*, las estaciones del transecto D con poca influencia de la mezcla vertical), se observó con el fluorómetro la capa con el máximo profundo de clorofila *a*

(conocida en la literatura como DCML o deep chlorophyll maximum layer por sus siglas en inglés) bien definida (Godínez *et al.*, 2011). Las secciones verticales de Chla a lo largo de los transectos A y C fueron reportadas por Sánchez-Velasco *et al.* (2013; Fig. 17) y en ellas se observa que las concentraciones de Chla varían a lo largo de la DCML, con los valores máximos ubicados en el núcleo del remolino CE-1. La DCML presentó un rango de concentración entre 1-3 mg Chla m⁻³ y se encuentra entre 25-60 m de profundidad en el remolino CE-1, mientras que en el borde del remolino CE-2 y la zona de cizallamiento está entre 10 y 45 m (Fig. 17). Aun con esa variabilidad de la profundidad, la DCML coincide con la profundidad del inicio de la nutriclina (Fig. 10). Los valores máximos de Chla (2.5 a 3 mg Chla m⁻³) observados en el núcleo del remolino CE-1, se centraron entre 30 y 40 m de profundidad, donde en el transecto C se observaron gradientes más intensos en la concentración de N+N, que incrementó de <1 µM a 30 m a valores hasta de 17 µM a 40 m en la estación C06. Las concentraciones más bajas de la DCML (1-1.5 mg Chla m⁻³) se observan en la zona de cizallamiento, donde la nitraclina, aunque más somera, fue menos intensa (Fig. 9c). El hecho de observar una concentración mayor en el núcleo del remolino CE-1 sugiere que el aporte de nutrientes dentro de la zona eufótica por efecto del mismo, favorece el aumento de la concentración dentro de la DCML durante el verano en la parte central del GoC. Cabe resaltar que el área de influencia del remolino CE-1 en la distribución horizontal de clorofila *a* fue amplia, pues en la

sección del transecto A la amplitud de la zona con concentraciones $>2.3 \text{ mg Chla m}^{-3}$ fue $\sim 40 \text{ km}$, mientras que en el transecto C esta fue de $\sim 80 \text{ km}$.

La presencia de una DCML es un rasgo común de la distribución vertical de esta variable en varias regiones del océano, incluyendo mares tropicales y templados (Cullen, 1982; Estrada *et al.*, 1993; Huisman *et al.*, 2006; Letelier *et al.*, 2004; Sathyendranath *et al.*, 1995; Weston *et al.*, 2005). Aunque existen diversos factores que pueden determinar la posición y la magnitud de la concentración de clorofila en la DCML, aparentemente estas dependen principalmente de la disponibilidad de la luz provista desde la superficie y el abasto de nutrientes provistos desde el fondo (Huisman *et al.*, 2006; Varela *et al.*, 1992). En algunos casos, la contribución de la DCML a la producción primaria integrada puede ser alta, y la acumulación de fitoplancton en esta capa puede jugar un papel importante en la organización de las redes tróficas en el ecosistema pelágico (Estrada *et al.*, 1993; Sánchez-Velasco *et al.*, 2013). En un estudio en el Mar del Norte, Weston *et al.* (2005) reportaron que la DCML contribuyó $\sim 60\%$ de la producción primaria integrada durante el periodo de estratificación en el verano, estos autores sugieren que el papel de la DCML en la producción primaria puede ser pasado por alto ya que muchos estudios para estudiar la producción primaria están basados en imágenes de satélite que no alcanzan a "ver" esta capa subsuperficial.

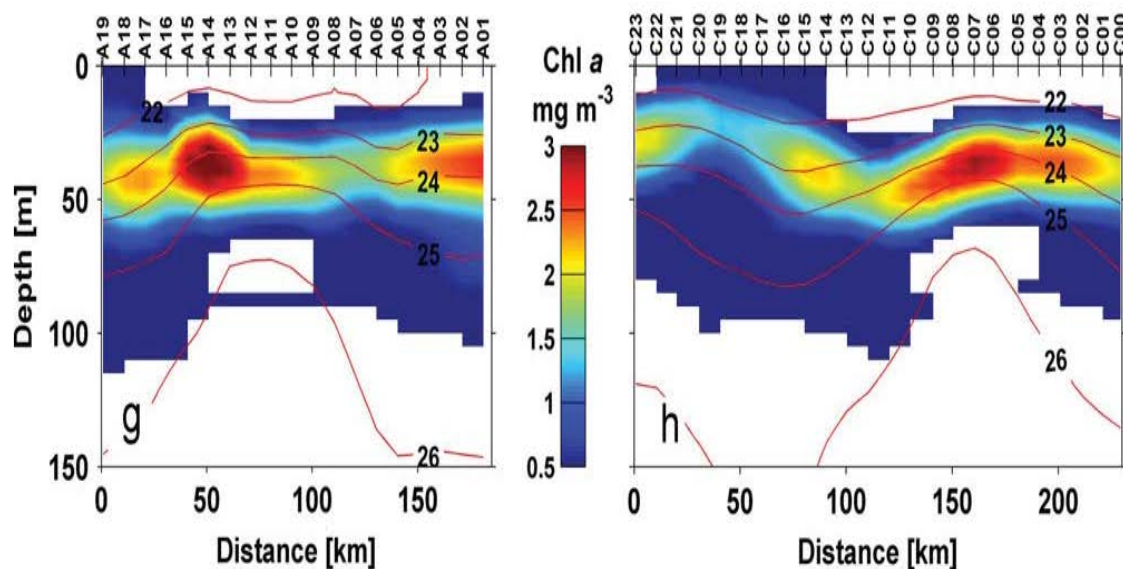


Figura 17. Sección vertical de Chl a (mg m^{-3}) derivada a partir de fluorómetro para el transecto A (izquierda) y el transecto C (derecha). Tomada de Sánchez-Velasco *et al.*, 2013.

Como en el presente estudio, estudios previos en la región central y sur del GoC también han reportado la presencia de una DCML ubicada entre 30-50 m de profundidad y alrededor de la parte superior de la nutriclina (Hidalgo-González y Álvarez-Borrego, 2001; White *et al.*, 2007; Malinverno *et al.*, 2008; Kalansky *et al.*, 2011, White *et al.*, 2013). Sin embargo, en dichos estudios escasamente se analizan los procesos que controlan la posición y magnitud de la concentración de clorofila *a* en dicha capa. La distribución de la clorofila durante este estudio sugiere que, como en otras regiones del océano (Bibby y Moore, 2011; Huisman *et al.*, 2006; Varela *et al.*, 1992), la intensidad de la DCML en el GoC durante el verano está fuertemente controlada por los flujos verticales de N+N desde aguas profundas, los cuales, a su vez, son

notoriamente influenciados por actividad de mesoescala. En un estudio para evaluar la importancia de la fijación de N en los flujos de exportación carbono y nitrógeno, White *et al.* (2013) concluyeron que la zona eufótica de la región central y sur del GoC durante el verano presenta una estructura de dos capas. Estos autores indican que el N que sostiene la producción primaria en la capa superior, la capa de mezcla, es abastecido por el proceso de fijación de N, mientras que en la capa inferior que se ubica en la parte superior de una nitraclina marcada, se presentan "formas de producción primaria más clásicas controladas por nitrato". Del carbono y nitrógeno orgánico particulado exportados desde estas dos capas hacia profundidades mayores de 100 m, White *et al.* (2013) calculan que en promedio únicamente ~10% fue producido gracias al proceso de fijación de N aunque se pueden presentar eventos episódicos de florecimientos de cianobacterias fijadoras en los que en los flujos de exportación la fijación de N contribuyó ~44%. El corolario obvio (aunque no fue hecho explícito por los autores) del trabajo de White *et al.* (2013) es que los flujos de exportación de C y N orgánico en la región central y sur del GoC están determinados principalmente por la producción nueva que ocurre en la DCML, siendo esta producción, a su vez, determinada por la intensidad de los flujos de N nuevo proveniente de aguas profundas.

Vale la pena notar que alrededor de las estaciones A01-A04 cercanas a las costa de Baja California se presentaron también valores altos ($2-2.5 \text{ mg m}^{-3}$) de clorofila *a* en la DCML, que posiblemente no estén relacionados con la

actividad de remolinos de mesoescala sino con surgencias costeras. Santamaría del Ángel *et al.* (1999) reportaron que aunque durante el verano las surgencias en la costa de Baja California son débiles debido a la intensa estratificación de la columna de agua, aun así se observaron máximos de Chla superficial. Esto indica que estas surgencias puedan tener un efecto relevante debajo de la capa de mezcla. En nuestro estudio, los datos de densidad no muestran una evidente elevación de las isopícnas hacia la costa como se esperaría de una surgencia, sin embargo, los perfiles verticales de N+N y de fósforo (Figs. 9 y 10), muestran un enriquecimiento subsuperficial, en comparación con las concentraciones encontradas en el transecto B. Ya que los perfiles de concentración de silicato (Fig. 11) no muestran un enriquecimiento similar al de N+N y fósforo, no podemos afirmar que los altos valores de N, P y clorofila en las estaciones A01-A04 sean por surgencias costeras.

Los resultados de nuestro estudio sugieren que, durante el verano, la generación recurrente de remolinos ciclónicos de mesoescala en la región central y sur del GoC (Pegau *et al.*, 2002, Zamudio *et al.*, 2008) induce la fertilización periódica de la capa inferior de la zona eufótica, promoviendo la intensificación de la DCML. Durante cada verano se pueden presentar varios remolinos ciclónicos cuya duración es de pocos meses, pero cuya área de influencia abarca varias decenas de kilómetros en la horizontal. A pesar de que diversos estudios han reportado que la producción primaria en la capa

superficial de la región central del GoC presenta una alta variabilidad estacional, con condiciones de muy baja productividad durante el verano (ej. ver Kahru *et al.*, 2004; Escalante *et al.*, 2013), estudios de flujos de carbono orgánico particulado realizados en la región de la Cuenca de Guaymas (Altabet *et al.*, 1999; Thunell, 1998) indican que los flujos de C hacia aguas profundas (500 m) son poco variables a lo largo del año (~1 a 2 mmol C m⁻² d⁻¹). White *et al.* (2013) sugieren que para que los flujos de carbono en verano sean similares a los de invierno-primavera, el proceso de exportación de la producción primaria debe ser más eficiente durante el verano. Por otro lado, Kalansky *et al.* (2011) observaron que las diatomeas grandes juegan un papel importante en el control de la señal isotópica ($\delta^{15}\text{N}$) total de los sedimentos de la Cuenca de Guaymas, y concluyeron que estas diatomeas fueron producidas en la DCML del GoC durante el periodo de estratificación (el verano), por lo que "las diatomeas de aguas profundas que utilizan nitrógeno de la nitraclina pueden representar una fuente importante de la producción exportada que no está relacionada con el periodo de surgencias de invierno".

Ya que casi todo el material orgánico exportado durante el verano se debe estar produciendo en la DCML, para entender los flujos de carbono en la región central y sur del Golfo de California es necesario hacer estudios específicos para conocer la relación entre la producción en dicha capa y los mecanismos físicos que aportan los nutrientes incluyendo la generación y el ciclo de vida de los remolinos de mesoescala. Aunque en este trabajo no se

calculó el flujo vertical de partículas exportadas, otros estudios muestran que debido al aporte de nutrientes y al aumento de la biomasa fitoplanctónica, los remolinos ciclónicos de mesoescala tienden a incrementar la exportación de partículas (Sweeney *et al.*, 2003; Rii *et al.*, 2008). Sin embargo, la calidad del material particulado que se produce por efecto de los remolinos de mesoescala y que se exporta desde la zona eufótica es variable y depende de la composición de las comunidades fitoplanctónicas que se desarrollan (Rii *et al.*, 2008; Benitez-Nelson *et al.*, 2007). De acuerdo con Rii *et al.* (2008), aparentemente la velocidad de inyección de los nutrientes hacia la zona eufótica determinará el desarrollo de unos u otros grupos fitoplanctónicos y, en consecuencia, la calidad del material exportado.

7.6 Razones de nutrientes.

En la superficie del océano las concentraciones de nutrientes son influenciadas por el consumo fitoplanctónico, permitiendo la disminución de nutrientes o inclusive el agotamiento, mientras que subsuperficialmente son adicionados por la remineralización de la materia orgánica, en el caso de N y P, y por disolución del ópalo biogénico en el caso del Si.

En este estudio tanto los valores de la razón de N:P (< 2) y la razón Si:N (entre 20 y 120) (Fig.13), como las concentraciones observadas en la capa de mezcla (Figs. 10, 11 y 12), indican el agotamiento de N ($< 0.2 \mu\text{M}$ en los transectos A, B y C) y el exceso de fosfato (0.5 a $0.8 \mu\text{M}$ en los transectos A, B

y C) y silicato (entre 5 y 10 μM en los transectos A, B y C), lo cual sugiere que el N es el nutriente limitante del crecimiento fitoplanctónico en la superficie. En cuanto a la razón N:P, el promedio de los valores máximos por debajo de los 100 m de profundidad fue de 9 (Fig. 13a), mientras que para la razón de Si:N, por debajo de los 50 m de profundidad el valor promedio fue ~ 2 .

Con el fin de identificar tendencias o diferencias en las tasas de consumo o adición de nutrientes entre los transectos, se realizó un diagrama de N vs. P y Si vs. N con todo el conjunto de datos de este estudio (Fig. 14). Mediante un análisis de regresión lineal se calculó la pendiente de la relación que representa una estimación de la tasa de consumo y adición para cada proporción. Las pendientes obtenidas para el conjunto de datos indican una proporción de 11 para las tasa de consumo/adición de N vs. P y 1.4 para Si vs. N (Fig. 14).

Es evidente que en el caso de la proporción de N:P, todos los datos están por debajo del valor de referencia de 16:1 propuesto por Redfield (1958). Una causa que provoca los bajos valores de la razón N:P en la superficie del océano es referente al consumo fitoplanctónico. Esto depende de la estrategia de crecimiento del organismo, por ejemplo, los formadores de florecimientos fitoplanctónicos o “bloomers” (en inglés) como las diatomeas que por estar adaptadas para un crecimiento exponencial presentan una alta proporción de su mecanismo de crecimiento (aumentan su ARN ribosomal) y por lo tanto pueden mostrar una razón N:P menor a 16 (Arrigo, 2005; Klausmeier *et al.*,

2004). En el GoC estudios reportan la abundancia de diatomeas en el GoC (Thunell, 1993; Millán-Nuñez, 1992).

Otra causa es la fuerte señal del proceso de desnitrificación en la parte sur y centro del GoC debido al transporte de masas de agua subsuperficiales provenientes de la zona ecuatorial con bajas concentraciones de oxígeno (<1 ml/l) y nitrato, que forman una zona de mínimo de oxígeno entre 300 y 900 m de profundidad (Altabet, 1999), permitiendo un hábitat propicio para la proliferación de organismos anaeróbicos que realizan el proceso de la desnitrificación. Altabet (1999) observó que el $\delta^{15}\text{N}$ está enriquecido (14‰) dentro de la zona de mínimo de oxígeno en la parte central del GoC, como consecuencia del proceso de desnitrificación.

En cuanto a la tasa de consumo de Si:N obtenida para todo el conjunto de datos de este estudio fue de 1.4 (Fig. 14), la cual es mayor a la propuesta por Brzezinski *et al.* (1985) de ~1 para diatomeas saludables, por lo que el consumo de Si con respecto al N es mayor en las diatomeas que habitan el golfo es decir, el grado de silicificación de estos organismos es mayor. En el diagrama de Si vs. N se observó una tendencia espacial en la que los datos del transecto D, zona influenciada por la mezcla vertical, se encuentran por encima de la pendiente calculada para todos los datos de nuestro estudio (Fig. 14). El conjunto de datos del transecto D refleja una proporción de 1.8, la cual es similar al valor estimado por Torres-Delgado *et al.* (2013) de 1.9 ± 0.1 para verano en la misma región. Además la tasa de consumo o adición estimada

para este transecto influenciado con la mezcla vertical, concuerda con el valor de 1.8 que Pichevin *et al.* (2012) calculó en invierno bajo condiciones de mezcla vertical para la cuenca de Guaymas.

7.7 Fijación de nitrógeno.

La fijación de N_2 es un proceso que permite la disponibilidad de nitrógeno nuevo en la superficie del océano (Gruber 2008), este proceso energéticamente costoso transforma el nitrógeno no reactivo en nitrógeno orgánico. Este proceso es relevante ya que representa un aporte de nitrógeno nuevo a la capa superficial de los océanos, dicha capa superficial está comúnmente agotada en nitrógeno debido al consumo por organismos fitoplanctónicos.

En el GoC estudios recientes han documentado la ocurrencia del proceso de la fijación de nitrógeno durante el verano en las cuencas de Guaymas y del Carmen, debido a que esta zona presenta las condiciones óptimas para la proliferación de organismos diazotróficos (White *et al.*, 2007, 2013; Kalansky *et al.*, 2011). Nuestro estudio se realizó en verano, por lo que también observamos condiciones óptimas para el desarrollo de organismos fijadores de nitrógeno incluyendo: una columna de agua fuertemente estratificada, con agua superficial cálida (~ 30 °C) agotada en nitrógeno (< 0.3 μM) y enriquecida en fosfato (> 0.8 μM). Por tal motivo, los perfiles verticales del parámetro N^* de este estudio (Fig. 15) muestran evidencias de fijación de N en

la capa de mezcla como las reportadas por White *et al.* (2013). Por ejemplo, el perfil vertical del transecto B presenta los máximos valores, de alrededor de $-7 \mu\text{M}$, desde la superficie hasta los 30 m de profundidad para disminuir hasta un valor de $-18 \mu\text{M}$ a 150 m (Fig. 15a). La tendencia a que incrementen los valores de N^* hacia la superficie indica la dominancia del proceso de la fijación de N_2 en la capa de mezcla, a pesar de que la capa superior del océano que se analizó en este trabajo (0-150 m) presenta valores negativos de N^* en todos perfiles verticales. Cuando se definió originalmente el parámetro N^* (Michaels *et al.*, 1996; Gruber y Sarmiento, 1997), con base en las proporciones entre el nitrato y el fosfato, se pretendía hacer un análisis a escala global del balance entre la fijación y la desnitrificación, de tal manera que en aquellas regiones oceánicas donde predominara la fijación (*i.e.*, un exceso de N abastecido por la fijación), los valores de N^* serían positivos, mientras que en aquellas regiones donde predominara la desnitrificación (un déficit de N con respecto al P) los valores de N^* serían negativos. En nuestra zona de estudio, el agua superficial, incluyendo el Agua del Golfo de California (0-100 m), es esencialmente ASsSt modificada. El ASsSt abarca desde los 200 m hasta ~ 400 m de profundidad (Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 2001), por lo que incluye una porción de la zona de mínimo de O_2 en donde la señal de desnitrificación es intensa. Esta desnitrificación hace que toda la región del Pacífico nororiental, incluyendo el Golfo de California, presente una señal negativa de N^* (e.g., ver mapa de distribución global de N^* en Deutsch y Weber, 2012) aún en el agua superficial.

Es sobre esta señal regional que tiene un intenso déficit de N, que se sobrepone la señal de la fijación de N en la zona central del GoC, por lo que aún en presencia de fijación de N los máximos superficiales de N^* no rebasan el valor de cero.

El objetivo del estudio de White *et al.* (2013) fue probar la hipótesis del posible acoplamiento entre los procesos de desnitrificación y de fijación de N_2 en el GoC, mediante el cual existe una retroalimentación positiva que podría suceder en una escala de tiempo anual. Este posible acoplamiento entre los dos principales procesos de entrada y salida del ciclo del N en escala global, es un tema de discusión y controversia actual entre los expertos en el balance global de N (Landolfi *et al.*, 2013), y el GoC presenta las condiciones ideales para estudiarlo. White *et al.* (2013) concluyen que la retroalimentación positiva entre dichos procesos en escala regional no es tan fuerte ya que el aporte de N nuevo por la fijación de N_2 , tendría que ser suficientemente significativo para aumentar la biomasa fitoplanctónica y a su vez aumentar el flujo de partículas hacia el fondo. La fijación de N_2 contribuyó con <10 % de la exportación de partículas en la parte central del GoC (White *et al.*, 2013) lo que parece insuficiente para retroalimentar al proceso de desnitrificación. Los autores sugieren que debe existir un mecanismo más eficiente para aumentar la biomasa fitoplanctónica y los flujos de N y C particulados. En nuestro estudio, el aporte de nutrientes por efecto del remolino ciclónico de mesoescala aumentó la concentración de Cla en DCML (Fig. 17), lo cual puede ser el

mecanismo que mantiene los flujos de C y N particulado durante el verano y además ayude a contribuir con la desnitrificación en la zona de mínimo de oxígeno.

Un rasgo sobresaliente del proceso superficial de la fijación de nitrógeno en la parte central del GoC durante el verano es la variabilidad espacial en las tasas de dicho proceso; es decir, se presentan parches de diferentes magnitudes de tasas de fijación de nitrógeno (White *et al.*, 2007, 2013). En nuestro estudio la variabilidad horizontal en el proceso de fijación se puede evidenciar mediante la variabilidad en los valores máximos de N^* (Fig. 16). A lo largo del transecto B y en la estación A19, correspondientes a las zonas fuertemente estratificadas, se observan valores los más altos $\sim -6 \mu\text{M}$ en la superficie (Fig. 16a y b), mientras que en los transectos A y C en la zona del núcleo del remolino (Fig. 16b y c) los valores en la superficie disminuyen aproximadamente a -10 y posteriormente aumentan en los bordes del remolino a $-6 \mu\text{M}$. En el transecto D en las estaciones D02 y D03 que son las más influenciadas por la intensa mezcla vertical los valores de N^* en la superficie son de $\sim -13 \mu\text{M}$, y son los valores más bajos encontrados en la superficie con respecto a las otras zonas (Fig. 16d). Es claro que el valor de N^* es controlado por el grado de estratificación de la columna de agua. Es decir, que en las zonas donde se observó la intensa estratificación se presentaron los valores más altos de N^* . Esta tendencia se observa claramente en la sección vertical

de N^* del transecto D, donde se observa el aumento de los valores superficiales hacia las estaciones más sureñas (Fig. 16d).

Nuestros resultados sugieren que la mezcla vertical y remolinos de mesoescala en el GoC pueden inhibir el proceso de la fijación de N_2 tal vez debido a que estos procesos físicos aumentan la disponibilidad de NO_3^- dentro de la zona eufótica. Es posible que los parches de fijación de nitrógeno sean una característica en la parte central del GoC durante el verano, debido a la presencia simultánea de varios remolinos de mesoescala durante esta época del año (Pegau *et al.*, 2002; Zamudio *et al.*, 2008).

8. Conclusiones.

Bajo las condiciones del muestreo, la influencia del remolino ciclónico de mesoescala CE-1 en la distribución de nutrientes fue subsuperficial debido a la intensa estratificación de la columna de agua en la región central del Golfo de California durante el verano. Además de las altas temperaturas y altas salinidades del agua superficial presentes en el núcleo del remolino CE-1 (Sánchez Velasco *et al.*, 2013), se sugiere que durante la campaña de muestreo el remolino CE-1 se encontraba en la etapa madura de su ciclo de vida ya que en la DCML de la zona del núcleo se observó una intensa respuesta biológica.

El remolino ciclónico CE-1 actuó como mecanismo de aporte intenso de nutrientes hacia la zona eufótica en la región central del GoC durante el verano. El remolino CE-1 duplicó las concentraciones integradas de N+N hasta la base de la zona eufótica con respecto a zonas sin influencia de remolinos. Las concentraciones integradas hasta los 150 m de profundidad indican que el remolino CE-1 casi igualó el contenido de N+N y de fosfato encontrado en la estación D03 con mayor influencia de la mezcla vertical de la región de umbrales.

Las máximas concentraciones de Chla dentro de la DCML de la parte central del GoC en verano fueron consecuencia del aporte de nutrientes dentro de la zona eufótica por efecto del remolino ciclónico CE-1. Durante el verano, es posible que los remolinos ciclónicos de mesoescala sean el principal mecanismo que estimule subsuperficialmente el incremento en la biomasa fitoplanctónica y, por lo tanto, contribuyan significativamente con la exportación de la producción primaria. Este mecanismo puede explicar por qué los flujos particulados de C y N orgánico sean similares en el verano que en el invierno como ha documentado Thunell (1998) para esta región.

Las concentraciones superficiales de los nutrientes y las razones N:P y Si:N indican que el nutriente limitante del crecimiento fitoplanctónico en la región central del Golfo de California es el nitrógeno.

Todos los valores del parámetro N^* estimado en este estudio fueron negativos, lo que refleja el fuerte déficit de nitrógeno inducido por la intensa desnitrificación en las zonas de mínimo de oxígeno de donde proviene el agua presente en la capa superior del Golfo de California. Sin embargo, la forma de los perfiles verticales de N^* con máximos hacia la superficie indica la dominancia del proceso de fijación de nitrógeno en la capa de mezcla. Los máximos fueron más obvios en las zonas de mayor estratificación de la columna de agua, en donde las condiciones fueron óptimas para la proliferación de organismos diazotróficos. De acuerdo con las secciones verticales de N^* , tanto los remolinos ciclónicos de mesoescala como la mezcla vertical pueden inhibir el proceso de fijación de N_2 debido al aporte de $N+N$ hacia la superficie. Por lo tanto, se sugiere que durante el verano en la parte central del GoC es común que la fijación de N se manifieste en forma de parches (White *et al.*, 2007; 2013) debido a la recurrente presencia de remolinos de mesoescala.

9. Referencias.

- Altabet, M. A., PilskaIn, C., Thunell, R., Pride, C., Sigman, D., Chavez, F., Francois, R. 1999. The nitrogen isotope biogeochemistry of sinking particles from the margin of the Eastern North Pacific. *Deep Sea-Research I*. 46, 655-679.
- Alvarado-Aguilar, D. 1998. Uso de nutrientes como trazadores de masas de agua: boca del Golfo de California. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas – UABC. pp. 44.
- Álvarez-Borrego, S., Rivera, J. A., Gaxiola-Castro, G., Acosta-Ruiz, M. J., Schwartzlose, R. A. 1978. Nutrientes en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*. 5, 53-71.
- Álvarez-Borrego, S., Schwartzlose, R. A. 1979. Water masses of the Gulf of California. *Ciencias Marinas*. 6, 43-63.
- Álvarez-Borrego, S., Lara-Lara, J. R. 1991. The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. En The Gulf and peninsular province of the californias. Dauphin, J. P., Simoneit, B. R. T (Editors). *American Association of Petroleum Geologist Memoir*. 47, 555-567.
- Álvarez-Borrego, S. 2008. Oceanografía de la región de las grandes islas. En: Gustavo D. Danemann y Exequiel Ezcurra, editores. "Bahía de los Ángeles: recursos naturales y comunidad. Línea base 2007". Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN: 978-968-817-891-1. pp. 45-65.
- Álvarez-Borrego, S. 2012. Phytoplankton biomass and production in the Gulf of California: a review. *Botanica Marina*. 55, 119-128.
- Armstrong, F. A. J., Stearns, C.R., Strickland, J. D. H. 1967. The measurement of upwelling and subsequent biological processes by means of Technicon autoanalyzer and associated equipment. *Deep Sea Research*. 14, 381-389.

- Aurioles-Gamboa, D. 1993. Biodiversidad y estado actual de los mamíferos marinos en México. Publicación especial de la Sociedad Mexicana de Historia Natural, 44, 397-412.
- Beman, J. M., Arrigo, K. R., Matson, P. A. 2005 Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean. *Nature*. 434, 211-214.
- Benitez-Nelson, C. R., Bidigare, R. R., Dickey, T. D., Landry, M. R., Leonard, C. L., Brown, S. L., Nencioli, F., Rii, Y. M., MAiti, K., Becker, J. W., Bibby, T. S., Black, W., Cai, Wei-Jun, Carlson, C. A., Chen, F., Kuwahara, V. S., Mahaffey, C., McAndrew, P. M., Quay, P. D., Rappé, M. S., Selph, K. E., Simmons, M. P., Yang, E. J. 2007. Mesoscale eddies drive increased silica export in the subtropical Pacific Ocean. *Science*. 316, 1017-1021.
- Bernhardt, A., Wilhelms, A. 1967. The continuous determination of low level iron, soluble phosphate and total phosphate with the AutoAnalyzer. *Technicon International Symposium*. I, 386.
- Bibby, T. S., Gorbunov, M. Y., Wyman, K. W., Falkowski, P. G. 2008. Photosynthetic community responses to upwelling in mesoscale eddies in the subtropical North Atlantic and Pacific Oceans. *Deep-Sea Research II*. 55, 1310-1320.
- Bibby, T. S. y Moore, C. M. 2011. Silicate:nitrate ratios of upwelled waters control the phytoplankton community sustained by mesoscale eddies in sub-tropical North Atlantic Pacific. *Biogeoscience*. 8, 657–666.
- Bidigare, R. R., Benitez-Nelson, C. Leonard, C. L., Quay, P. D., Parsons, M. L., Foley, D. G., Seki, M. P. 2003. Influence of a cyclonic eddy on microheterotroph biomass and carbon export in the lee of Hawaii. *Geophysical Research Letters*. 30, 1318.
- Bray, N. A., 1988. Thermohaline circulation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*. 93, 4993-5020.

- Bray, N. A., Robles, J. M. 1991. Physical oceanography of the Gulf of California. En: The Gulf and Peninsular Province of the Californias. Dauphin, J. P., Simoneit, B. R. T. *American Association of Petroleum Geologist Memoir*. 47, 511-553.
- Brown, S. L., Landy, M. R., Selph, K. E., Yang, Eun Jin, Rii, Y. M., Bidigare, R. R. 2008. Diatoms in the desert: plankton community response to a mesoscale eddy in the subtropical North Pacific. *Deep-Sea Research II*. 55, 1321-1333.
- Brzezinski, M.A., 1985. The Si:C:N ratio of marine diatoms: Interspecific variability and the effect of some environmental variables. *Journal of Phycology*. 21, 347-357.
- Chavanne, C., Flament, P., Lumpkin, R., Dousset, B., Bentamy, A. 2002. Scatterometer observations of wind variations induced by oceanic islands: implications for wind-driven ocean circulation. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 28, 466-476.
- Chelton, D. B., Schlax, M. G., Samelson, R. M. 2011. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in Oceanography*. 91, 167-216.
- Cisneros-Mata, M. A., Névarez-Martínez, M. O., Martínez-Zavala, M. A., Anguiano-Carrasco, M. L., Santos-Molina, J. P., Godínez-Cota, R., Montemayor-López, G. 1997. Diagnóstico de la pesquería de pelágicos menores del Golfo de California de 1991 a 1995/96. Instituto Nacional de la Pesca. CRIP Guaymas, Sonora, Mexico, pp. 59.
- Coale, K. H. y Bruland, K. W. 1987. Oceanic stratified euphotic zone as elucidated by ^{234}Th : ^{238}U disequilibria. *Limnology and Oceanography*. 32, 189-200.
- Colling, A. Ocean currents. En: Ocean circulation. The Open University, Oceanography Course Team. Reino Unido. 2001. pp. 64-71.

- Cullen, J. J., Eppley, R. W. 1981. Chlorophyll maximum layers of the Southern California Bight and possible mechanisms of their formation and maintenance. *Oceanologica Acta*, 4 (1), 23-32.
- Cullen, J. J. 1982. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll *a*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 39, 791-803.
- De la Cruz-Agüero J., Arellano-Martínez M., Cota-Gómez V. M., De la Cruz G., 1996. Catálogo de los peces marinos de Baja California Sur. CICIMAR-IPN-CONABIO, pp. 342.
- Delgadillo-Hinojosa, F., Macias-Zamora, J. V., Segovia-Zavala, J. A., Torres-Valdés, S., 2001. Cadmium enrichment in the Gulf of California. *Marine Chemistry*. 75, 109-122.
- Deutsch, C., Gruber, N., Key, R. M., Sarmiento, J. L., Ganachaud, A. 2001. Denitrification and N₂ fixation in the Pacific Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*. 15, 483-506.
- Deutsch, C., Weber, T. 2012. Nutrient ratios as a tracer and driver ocean biogeochemistry. *Annu. Rev. Marine. Sci.* 4:113-141.
- Dickey, T. D., Nencioli, F., Kuwahara, V. S., Leonard, C., Black, W., Rii, Y. M., Bidigare, R. R., Zhang, Q. 2008. Physical and bio-optical observations of oceanic cyclones west of the island of Hawai'i. *Deep-Sea Research II*. 55, 1195-1217.
- Egge, J. K. y Aksnes, D. L. 1992. Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition. *Marine Ecology Progress Series*. 83, 281-289.
- Escalante, F., Valdez-Holguín, J. E., Álvarez-Borrego, S., Lara-Lara, J. R. 2013. Variación temporal y espacial de la temperatura superficial del mar, clorofila *a* y

productividad primaria en el golfo de California. *Ciencias Marinas*.39 (2), 203-215.

Estrada, M. Marrasé, C., Latasa, M., Berdalet, E., Delgado, M., Riera, T. 1993. Variability of deep chlorophyll maximum characteristics in the Northwestern Mediterranean. *Marine Ecology Progress Series*. 92, 289-300.

Falkowski, P. G., Ziemann, D., Kolber, Z., Bienfang, P. K. 1991. Role of eddy pumping in enhancing primary production in the ocean. *Nature*. 352, 55-58.

Forryan, A., Martin, A. P., Srokosz, M. A., Popova, E. E., Painter, S. C., Stinchcombe, M. C. 2012. Turbulent nutrient fluxes in the Iceland Basin. *Deep-Sea Research I*. 63, 20-25.

Gaunachaud, A. S., Gupta, A. S., Orr J. C., Wijffels, S. E., Ridgway, K. R., Hemer, M. A., Maes, C., Steinberg, C. R., Tribollet, A. D., Qiu, B., Kruger, J. C. 2011. Observed and expected changes to the tropical Pacific Ocean. En: J. D. Bell, J. E. Johnson y A. J. Hobday (Editores). Vulnerability of tropical pacific fisheries and aquaculture to climate change. Secretariat of the pacific community, Noumea, New Caledonia.

Godínez, V. M., Lavín, M. F., Sánchez-Velasco, L., Hernández-Becerril, D. U., Cabrera-Ramos, C. E. 2011. Datos hidrográficos en el Golfo de California: Campaña GOLCA-1107 (27 de julio al 4 de agosto del 2011). Informe técnico 102304. Departamento de Oceanografía Física, CICESE.

Gruber, N., Sarmiento, J. L. 1997. Global patterns of marine nitrogen fixation and denitrification. *Global Biogeochemistry Cycles*. 11, 235-266.

Gruber, N. The marine nitrogen cycle: Overview of distributions and processes. En Nitrogen in the Marine Environment, 2^a ed. D. G. Capone, D. A. Bronk, M. R. Mulholland y E. J Carpenter. Ed. Academic Press y Elsevier. Burlington, MA. 2008. pp. 1-49.

- Hidalgo-González, R. M. y Álvarez-Borrego, S. 2001. Chlorophyll profile and the water column structure in the Gulf of California. *Oceanologica Acta*. 24 (1), 19-28.
- Huisman, F., Pham Thi, N. N., Karl, D. M., Sommeijer, B. 2006. Reduced mixing generates oscillations and chaos in the oceanic deep chlorophyll maximum. *Nature*. 439, 322-325.
- Kahru, M., Marinone, S. G., Lluch-Cota, S.E., Parés-Sierra, A., Mitchel, B. G. 2004. Ocean-color variability in the Gulf of California: scales from days to ENSO. *Deep-Sea Research II*. 51, 139-146.
- Kalansky, J. F., Robinson, R. S., Popp, B. N. 2011. Insights into nitrogen cycling in the western Gulf of California from the nitrogen isotopic composition of diatom-bound organic matter. *Geochemistry, Geophysics and Geosystem*. 12, Q06015, doi:10.1029/2010GC003437
- Klein, P., Lapeyre, G. 2009. The oceanic vertical pump induced by mesoscale and the submesoscale turbulence. *Annual Review of Marine Science*. 1, 351-375.
- Landolfi, A., Dietze, H., Koeve, W., Oeschies, A. 2013. Ovelooked runaway feedback in the marine nitrogen cycle: the vicious cycle. *Biogeosciences*. 10, 1351-1363.
- Letelier, R. M., Karl, D. M., Abbot, M. R., Bidigare, R. R. 2004. Light driven seasonal patterns of chlorophyll and nitrate in the lower euphotic zone of the North Pacific Subtropical Gyre. *Limnology and Oceanography*. 49 (2), 508-519.
- Li, Q. P., y Hansell, D. A. 2008. Nutrient distributions in baroclinic eddies of the oligotrophic North Atlantic and inferred impacts on biology. *Deep-Sea Research II*. 55, 1291-1299.
- López, M., Candela, J., García, J. 2008. Two overflows in the Northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 113, C08

- Lluch-Cota, S. E. 2000. Coastal upwelling in the eastern Gulf of California. *Oceanologica Acta*. 23, 731-740.
- Lluch-Cota, S. E., Aragón-Noriega, E. A., Arreguín-Sánchez, F., Aurióles-Gamboa, D., Bautista-Romero, J. J., Brusca, R. C., Cervantes-Duarte, R., Cortés-Altamirano, R., Del-Monte-Luna, P., Esquivel-Herrera, A., Fernández, G., Hendrickx, M. E., Hernández-Vázquez, S., Herrera-Cervantes, H., Kahru, M., Lavín, M., Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, D. B., López-Martínez, J., Marinone, S. G., Nevárez-Martínez, M. O., Ortega-García, S., Palacios-Castro, E., Parés-Sierra, A., Ponce-Díaz, G., Ramírez-Martínez, M., Salinas-Zavala, C. A., Schwartzlose, R. A., Sierra-Beltrán, A. P. 2007. The Gulf of California: Review of ecosystem status and sustainability challenges. *Progress in Oceanography*. 73, 1-26.
- Mahaffey, C., Benitez-Nelson, C. R., Bidigare, R. R., Rii, Y., Karl D. M. 2008. Nitrogen Dynamics within a wind-driven eddy. *Deep-Sea Research II*. 55, 1398–1411.
- Malinverno, E., Prahl, F. G., Popp B. N., Ziveri, P. 2008. Alkenone abundance and its relationship to the coccolithophore assemblage in Gulf of California surface waters. *Deep Sea-Research I*. 55, 1118-1130.
- Mantyla, A. W., Bograd, S. V., Venrick, E. L. 2008. Patterns and controls of chlorophyll-a and primary productivity cycles in the Southern California Bight. *Journal of Marine Systems* 73, 48-60.
- Marinone, S. G., Lavín, M. F. 2003. Residual flow and mixing in the large islands region of the central Gulf of California. En O.U Velasco Fuentes, J. Sheinbaum and J.L Ochoa de la Torre (Editores), *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 213-236.
- Martínez-Zavala M.A., Cisneros-Mata M.A., Anguiano-Carrasco M., Santos-molina J.P., Nevarez- Otilio M., Godínez-Cota A.R. y G. Montemayor-López, 2000. Diagnósis de la pesquería de pelágicos menores del Golfo de California. Instituto Nacional de Pesca, CRIP-Guaymas, Sonora. pp. 53.

- McGillicuddy, D. J., Robinson, A. R., Siegel, D. A., Jannasch, H. W., Johnson, R., Dickey, T. D., McNeil, J., Michaels, A. F., Knap, A. H. 1998. Influence of mesoscale eddies on new production in the Sargasso Sea. *Nature*. 394, 263-266.
- McGillicuddy, D. J., Johnson, R., Siegel, D.A., Michaels, A. F., Bates, N. R., Knap, A. H. 1999. Mesoscale variations of biogeochemical properties in the Sargasso Sea. *Journal of Geophysical Research*. 104, 13381-13394.
- McGillicuddy, D. J., Anderson, L. A., Bates, N. R., Bibby, T., Buesseler, K. O., Carlson, C. A., Davis, C. S., Ewart, C., Falkowski, P. D., Goldthwait, S. A., Hansell, D. A., Jenckins, W. J., Johnson, R., Kosnyrev, V. K., Ledwell, J. R., Li, Q. P., Siegel, D. A., Steinberg, D. K. 2007. Eddy/wind interactions stimulate extraordinary mid-ocean plankton blooms. *Science*. 316, 1021-1026.
- Michaels, A. F., Olson, D., Sarmiento, J. L., Ammerman, J. W., Fanning, K., Jahnke, K., Knap, A. H., Lipschultz, F., Prospero, J. M. 1996. Inputs, losses and transformations of nitrogen and phosphorous in the pelagic North Atlantic Ocean. *Biogeochemistry*. 35, 181-226.
- Millán-Núñez, E. y Yentsch, C. M. 2000. El Canal de Ballenas, Baja California, como ambiente favorable para el desarrollo del fitoplancton. *Hidrobiológica*. 10 (2), 91-100.
- Mouriño-Carballido, B. 2009. Eddy-driven pulses of respiration in the Sargasso Sea. *Deep-Sea Research I*. 56, 1242-1250.
- Nencioli, F., Kuwahara, V. S., Dickey, T. D., Rii, Y. M., Bidigare, R. R. 2008. Physical dynamics and biological implications of a mesoscale eddy in the lee of Hawai'i: Cyclone Opal observations during E-Flux III. *Deep Sea-Research II*. 55, 1252-1274

- Nencioli, F., Dong, C., Dickey, T., Washburn, L., McWilliams, J. C. 2010. A vector geometry-based eddy detection algorithm and its application to a high-resolution numerical model product and high-frequency radar surface velocities in the Southern California Bight. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 27, 564-579.
- Parés-Sierra, A., Mascarenhas, A., Marinone, S. G., Castro, R. 2003. Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters*. 30, 1312
- Palter, J. B., Lozier, M. S., Barber, R. T. 2005. The effect of advection on the nutrient reservoir in the Atlantic subtropical gyre. *Nature*. 437, 687-692.
- Pegau, W. S., Boss, E., Martínez, A. 2002. Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters*. 29, 1-3.
- Pichevin, L., Ganeshram, R. S., Reynolds, B. C., Prah, F., Pedersen, T. F., Thunell, R., McClymont, E. L. 2012. Silicic acid biogeochemistry in the Gulf of California: Insights from sedimentary Si isotopes. *Paleoceanography*. Vol. 27, PA2201. DOI:10.1029/2011PA002237
- Prasanna-Kumar, S. P., Nuncio, M., Ramaiah, N., Sardesai, S., Narvekar, J., Fernandes, V., Paul, J. T. 2007. Eddy-mediated biological productivity in the Bay of Bengal during fall and spring intermonsoons. *Deep Sea-Research I*. 54, 1619-1640.
- Redfield, A. C. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*. 46 (3), 205-221.
- 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 Research II*. 55, 1275-1290.

- Sánchez-Velasco, L., Lavín, M. F., Jiménez-Rosenberg, S. P. A., Godínez, V. M., Santamaría-Del Ángel, E., Hernández-Becerril, D. U. 2013. Three-dimensional distribution of fish larvae in a cyclonic eddy in the Gulf of California during the summer. *Deep-Sea Research I*. 175, 39-51.
- Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S., Müller-Karger, F. E. 1994. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research*. 99, 7411-7421.
- Santamaría –del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S., Millán-Núñez, R., Müller-Karger, F. E. 1999. Sobre el efecto débil de las surengias de verano en la biomasa fitoplanctónica del golfo de California. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.*, 49:207-212.
- Sathyendranath, S., Longhurst, A., Caverhill, C., Platt, T. 1995. Regionally and seasonally differentiated primary production in the North Atlantic. *Deep Sea-Research I*. 42 (10), 1773-1802.
- Schlitzer, R. 2013. Ocean Data View. <http://odv.awi.de>
- Seki, M. P., Polovina, J. J., Brainard, R. E., Bidigare, R. R., Leonard, C. L., Foley, D. G. 2001. Biological enhancement at cyclonic eddies tracked with GOES thermal imagery in Hawaiian waters. *Geophysical Research Letters*. 28, 1583-1586.
- Soto-Mardones, L., Marinone, S.G., Parés-Sierra, A. 1999. Variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*. 25 (1), 1-30.
- Stal, L. J., Severin, I., Bolhuis, H. The ecology of nitrogen fixation in cyanobacterial mats. En: *Recent Advances in phototrophic prokaryotes, Advances in experimental medicine and biology* Vol 675. P.C Hallenbeck. 2010. pp. 35-45.
- Sweeney, E. N., McGillicuddy D. J., Buesseler, K. O. 2003. Biogeochemical impacts due to mesoscale eddy activity in the Sargasso Sea as measured at the

- Bermuda Atlantic Time-series Study (BATS). *Deep-Sea Research II*. 50, 3017-3039.
- Thomson, D. A., Findley, L. T., Kerstitch, A. N. 1979. Reef Fishes of the Sea of Cortez: The Rocky-Shore Fishes of the Gulf of California. John Wiley and Sons, New York. pp. 302.
- Torres-Delgado, E. V. 2008. Efecto de la mezcla vertical sobre la distribución de nutrientes inorgánicos en la región de las Grandes Islas del Golfo de California. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas – Instituto de Investigaciones Oceanológicas. UABC. pp. 75.
- Torres-Delgado, V. E., Delgadillo-Hinojosa, F., Camacho-Ibar, V. F., Huerta-Díaz, M. A., Segovia-Zavala, J. A., Hernández-Ayón, J. M., Galindo-Bect, S. 2013. Enriquecimiento invernal de nutrientes inorgánicos en el canal de Ballenas, golfo de California. *Ciencias Marinas*. 39 (2): 165-182.
- Torres-Orozco, E. 1993. Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de Maestría. CICESE, Ensenada, México. pp. 80.
- Torres-Valdés, S., 2000. Distribución especial y variabilidad temporal de nutrientes en el Golfo de California. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas – UABC, Ensenada, México. pp. 62.
- Thunell, R., Pride, C., Ziveri, P., Muller-Karger, F., Sancetta, C., Murray, D. 1996. Plankton response to physical forcing in the Gulf of California. *Journal of Plankton Research*. 18, 2017-2026.
- Thunell, R. 1998. Seasonal and annual variability in particle fluxes in the Gulf of California: a response of climate forcing. *Deep Sea-Research I*. 45, 2059-2083.

- Varela, R. M., Cruzado, A., Tintoré, J., García-Ladona, E. 1992. Modeling the deep chlorophyll maximum: a coupled physical-biological approach. *Journal of Marine Research*. 50, 441-463
- Weston, K., Fernand, L., Mills, D. K., Delahunty, R., Brown, J. 2005. Primary production in the deep chlorophyll maximum of the central North Sea. *Journal of Plankton Research*. 27 (90), 909-922.
- White, A. E., Prahl, F. G., Letelier, R. M., Popp, B. N. 2007. Summer surface waters in the Gulf of California: Prime habitat for biological N₂ fixation. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, GB2017.
- White, A. E., Foster, R. A., Benitez-Nelson, C. R, Masqué, P., Verdeny, E., Popp, B. N., Arthur, K. E., Prahl, F. G. 2013. Nitrogen fixation in the Gulf of California and Eastern Tropical North Pacific. *Progress in Oceanography*. 109, 1-17.
- Wu, J., Sunda, W., Boyle, E. A., Karl, D. M. 2000. Phosphate depletion in the western North Atlantic Ocean. *Science*. 289, 759-762.
- Zamudio, L., Hogan, P., Metzger, E. J. 2008. Summer generation of the Southern Gulf of California Eddy train. *Journal of Geophysical Research*. 113, 1-21.
- Zeitzschel, B. 1969. Primary productivity in the Gulf of California. *Marine Biology*. 3, 201-207.