



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS  
CAMPUS ENSENADA**



**“CONDICIONES HIDROGRÁFICAS Y PROPIEDADES QUÍMICAS  
FRENTE A LAS COSTAS DEL SUR DE CALIFORNIA Y DE LA  
PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA (FEBRERO 2012, ABRIL 2013)”**

**TESIS**

**PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL  
TÍTULO DE OCEANÓLOGO  
PRESENTA:**

**Jonathan Raúl Geraldo Noriega  
360902**

**Ensenada, Baja California  
A 12 de Junio, 2025.**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS  
CAMPUS ENSENADA



**“CONDICIONES HIDROGRÁFICAS Y PROPIEDADES QUÍMICAS FRENTE A LAS COSTAS  
DEL SUR DE CALIFORNIA Y DE LA PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA (FEBRERO 2012,  
ABRIL 2013)”**

TESIS

PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**OCEANÓLOGO**

**PRESENTA:**

**Jonathan Raúl Geraldo Noriega  
360902**

A quien el Comité de Tesis autoriza el trabajo terminal, después de haber efectuado una revisión minuciosa del mismo y de acuerdo con el Art. 19 del R.G.E.P.E.P, las y los señores profesores emiten los siguientes votos aprobatorios mediante rubrica:

**Dr. Rubén Castro Valdez  
DIRECTOR**

**Dr. Mauro Wilfrido Santiago García  
SINODAL**

**Dr. Víctor Froylan Camacho Ibar  
SINODAL**

“Por la Realización Plena del Ser”

C.c.p.- Archivo  
C.c.p.- Minutario

## Resumen

El Sistema de la Corriente de California (SCC) es una corriente de frontera oriental del Pacífico nororiental que transporta agua subártica en dirección sur. Está compuesto por dos flujos principales: la Corriente de California (CC), que fluye superficialmente hacia el ecuador, y la Subcorriente de California (*California Undercurrent*, CU), que transporta Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) en dirección norte debajo de los ~150 m. La variación estacional en la intensidad de ambas corrientes regula las condiciones físicas y químicas del SCC, que favorece surgencias semipermanentes en la región. Para observar estas diferencias estacionales, se presentan resultados de dos cruceros oceanográficos realizados entre el sur de California y la entrada del Golfo de California: Western-Flyer (febrero, 2012) y PESCAR24 (abril, 2013). El estudio incluye diagramas de temperatura conservativa ( $\Theta$ ) - salinidad absoluta ( $S_A$ ), mapas de distribución de variables ( $\Theta$ ,  $S_A$ , densidad potencial ( $\sigma_\theta$ ), spiciness ( $\pi$ ), oxígeno disuelto (OD), profundidad (Z)) sobre capas de profundidad e isopícnas. Además, se adicionaron mapas de corrientes en base a topografía dinámica absoluta, superficiales y subsuperficiales derivadas de reanálisis (*Copernicus*), y observaciones de perfiladores acústicos (LADCP-SADCP). En el crucero PESCAR24 se realizaron análisis de nutrientes ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ), recolectados mediante botellas oceanográficas para realizar perfiles verticales, relaciones  $\text{NO}_4:\text{PO}_4$ , trazador  $\text{N}^*$  y diagramas entre variables. Se observó una mayor intensidad del SCC en primavera comparado con invierno, denotado como un flujo más fuerte de la CC hacia el sur y menor actividad de mesoescala superficial. Se evidenció una modificación progresiva de la CC en dirección norte-sur debido a un incremento en  $S_A$  y  $\Theta$ . La CU transporta ASsSt desde regiones subtropicales hasta el sur California, con baja concentración de OD y altos niveles de nutrientes. El análisis de nutrientes en PESCAR24 indicó un ambiente más oligotrófico en el Océano Pacífico (OP), con una distribución vertical típica de nutrientes y una deficiencia de nitrógeno tanto en el OP como en la entrada del Golfo de California. observar la evolución de las propiedades físicas, así como contribuir al estudio de propiedades químicas mediante una descripción general para definir el tipo de ambiente que caracteriza al SCC.

**Palabras clave:** *Corriente de California, California Undercurrent, nutrientes, corrientes, estacionalidad.*

## **Dedicatoria**

*A mi familia, por enseñarme el trabajo duro, la constancia, honestidad y la dedicación. Gracias por confiar en mí y apoyarme con todas mis metas desde un inicio.*

*A Kamyla, por enseñarme lo que es el amor verdadero e incondicional, y por su gran soporte durante la realización de este trabajo.*

*A mi amigo Carlos, porque con poca presencia me enseñaste lo que es el verdadero significado de amistad, por tu gran carisma y dedicación por apoyar a toda persona que lo necesite. Gracias por permitirme participar en tus primeros buceos, descansa en paz...*

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer al Dr. Rubén Castro Valdez, pues más que un director de tesis fue un excelente líder, profesor y amigo durante la realización de este trabajo, a lo largo de todos estos años. Agradezco cada uno de sus comentarios, sus observaciones, correcciones, pláticas y toda la paciencia, dedicación y confianza puesta sobre mí. Igualmente, agradezco a mi comité, el Dr. Mauro Wilfrido Santiago García y el Dr. Víctor Froylan Camacho Ibar, por sus acertados comentarios y observaciones, así como todas sus aportaciones que lograron que este trabajo fuese de la mejor calidad posible.

Agradezco eternamente a mi madre, padre, hermano, abuelos y abuelas que estuvieron presentes durante todo este proceso, por su apoyo incondicional y por hacer todo lo que fuese posible para poder brindarme una vida y educación de calidad. Muchas gracias por todo.

Agradezco a mi novia, Kamyla, por iluminar mi vida con su llegada y por estar presente durante los últimos momentos de esta tesis. Gracias por apoyarme, aguantarme y cuidarme.

A mi gato, lebron, que sin saber qué hacía, se reposaba sobre mis piernas para intentar calmarme durante momentos de estrés y cansancio.

Finalmente, agradezco a todos mis amigos: Ivan, Ivar, Agustín, Eisa, Amir, Ignacio, Fernando, Melo, Susuki, Ismael, Adrian, Meling, Katherine, Mar y muchos más por todas las risas, apoyo y momentos compartidos durante toda mi carrera universitaria.

# Tabla de contenido

	Página
Resumen.....	1
Dedicatoria.....	2
Agradecimientos .....	3
Lista de Anexos.....	8
<b>1. Introducción.....</b>	<b>9</b>
1.1    Hipótesis.....	13
1.2    Objetivos.....	13
1.2.1 <i>Objetivo general</i> .....	13
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	13
<b>2. Metodología.....</b>	<b>14</b>
<b>Capítulo 1: Resultados y comparación hidrográfica entre cruceros Western-Flyer y PESCAR24</b> .....	<b>17</b>
3.1    Distribución de propiedades frente a las costas del sur de California y Baja California .....	17
3.2    Distribución de las corrientes frente a las costas del sur de California y península de Baja California .....	27
3.2.1 <i>Corrientes geostróficas superficiales</i> .....	27
3.2.2 <i>Corrientes medidas con ADCP</i> .....	30
3.2.3 <i>Distribución de las corrientes y la salinidad a través de reanálisis Copernicus (Capas entre 50-100 m y 250-300 m)</i> .....	32
3.3    Distribución de las propiedades físicas sobre las superficies de densidad potencial en las secciones radiales .....	36
3.4    Distribución de propiedades físicas en la sección de la entrada al Golfo de California.....	40
<b>4. Discusión .....</b>	<b>44</b>
<b>Capítulo 2.    Resultados: Propiedades químicas del crucero P24 .....</b>	<b>59</b>
5. Distribución de propiedades químicas y Nutrientes Inorgánicos Disueltos frente las costas del sur de California y la eGC.....	59
<b>6. Discusión: Propiedades químicas y nutrientes inorgánicos disueltos (P24) .....</b>	<b>68</b>
<b>7. Conclusiones.....</b>	<b>73</b>
Referencias.....	76
Anexos .....	81

## Lista de Figuras

**Figura 1.** Localización geográfica de las estaciones hidrográficas durante los cruceros PESCAR24 (a) y Western-Flyer (b). Estaciones de muestreos en la boca del Golfo de California y la pPBC (c). La escala de colores indica la batimetría (m). La línea en negro muestra la isobata de 1000 m. La región de Punta Eugenia (PEu; ~28°N) distingue dos provincias, una al norte y otra al sur de la misma. .... 15

**Figura 2.** Diagrama  $\Theta$ - $S_A$  de los cruceros W-F (Febrero 2012;  $\circ$ ) y P24 (Abril 2013;  $\bullet$ ) para los lances del Pacífico y frente a la pPBC (Figs. 1a-b). Los recuadros encierran los rangos termohalinos de las masas de agua en base a la clasificación de Portela *et al.* (2016). ACC, Agua de la Corriente de California; AGC, Agua del Golfo de California; ASsSt, Agua Subsuperficial Subtropical; AIP, Agua Intermedia del Pacífico. Las isolíneas negras (café) indican las isopícnas (spiciness). Se incluyen también los rangos entre isopícnas (magenta) reportados en Kurczyn *et al.* (2019) para la clasificación de masas de agua: AIP (27.76-27.31 kg m<sup>-3</sup>), Agua Subsuperficial Ecuatorial (ASsE) (26.26-26.76 kg m<sup>-3</sup>) y el Agua Subártica (ASA) (<26.26 kg m<sup>-3</sup>). El ASsE y el ASA son referidas en Portela *et al.* (2016) como ASsSt y ACC. .... 19

**Figura 3.** Secciones transversales frente a las costas de California y de la PBC (Figs. 1a-b), para los cruceros W-F (panel izquierdo) y P24 (panel derecho). Los puntos negros indican la posición de los lances con respecto a la distancia recorrida, el número la latitud del lance y profundidades cada 50 m en la vertical. (A, B) Temperatura conservativa, (C, D) Salinidad absoluta, (E, F) Densidad potencial, (G, H) Oxígeno disuelto, (I, J) spiciness. .... 20

**Figura 4.** Distribución de (A) Salinidad Absoluta ( $S_A$ ; g kg<sup>-1</sup>), (B) Temperatura Conservativa ( $\Theta$ ; °C), (C) Oxígeno Disuelto (OD;  $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) y (D) spiciness ( $\pi$ ; kg m<sup>-3</sup>) sobre superficies de densidad potencial ( $\sigma_\theta$ ; kg m<sup>-3</sup>), para los lances realizados frente a las costas del sur de California y de la PBC para el crucero Western Flyer (Febrero, 2012). .... 23

**Figura 5.** Distribución de (A) Salinidad Absoluta ( $S_A$ ; g kg<sup>-1</sup>), (B) Temperatura Conservativa ( $\Theta$ ; °C), (C) Oxígeno Disuelto (OD;  $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) y (D) spiciness ( $\pi$ ; kg m<sup>-3</sup>) sobre superficies de densidad potencial ( $\sigma_\theta$ ; kg m<sup>-3</sup>), para los lances realizados frente a las costas del sur de California y de la PBC para el crucero P24 (Abril, 2013). .... 26

**Figura 6.** Topografía Dinámica Absoluta (TDA, m) del reanálisis *Copernicus* promediada para los días de los cruceros oceanográficos W-F y P24. Los vectores indican las corrientes geostróficas superficiales (m s<sup>-1</sup>) asociadas a la TDA. Los puntos blancos indican las estaciones muestreadas por cada respectivo crucero. .... 28

**Figura 7.** Mapa de corrientes medidas con el SADCP-LADCP durante el crucero P24 promediadas entre: (A) 50-100 m de profundidad y (B) entre 250-300 m de profundidad para la región oeste de la PBC. La longitud de la flecha indica la magnitud de la corriente y la orientación de la punta su dirección. .... 31

**Figura 8.** Mapa de corrientes y  $S_A$  promediadas en la capa entre 50-100 m de profundidad obtenidas del reanálisis *Copernicus* para W-F (a; 04-13 de febrero, 2012) y P24 (b; 19 abril 04 de mayo, 2013). La escala de colores indica la  $S_A$  ( $g\ kg^{-1}$ ) y los vectores la dirección y magnitud de las corrientes ( $m\ s^{-1}$ )..... 34

**Figura 9.** Mapa de corrientes y  $S$  promediadas en la capa entre 250-300 m de profundidad obtenidas del reanálisis *Copernicus* para W-F (a; 04-13 de febrero, 2012) y P24 (b; 19 abril 04 de mayo, 2013). La escala de colores indica la  $S_A$  ( $g\ kg^{-1}$ ) y los vectores la dirección y magnitud de las corrientes ( $m\ s^{-1}$ )..... 36

**Figura 10.** Distribución de  $S_A$  ( $g\ kg^{-1}$ ) (a),  $\Theta$  ( $^{\circ}C$ ) (b),  $\pi$  ( $kg\ m^{-3}$ ) (c) y profundidad (m) (d) sobre la isopícnica de  $24.5\ kg\ m^{-3}$  en la sección radial para el crucero P24. La barra de colores indica el valor asociado a cada variable, mientras que los puntos ubican la posición de los lances (estaciones 14-67). ..... 37

**Figura 11.** Distribución de  $S_A$  ( $g\ kg^{-1}$ ) (a),  $\Theta$  ( $^{\circ}C$ ) (b),  $\pi$  ( $kg\ m^{-3}$ ) (c) y profundidad (m) (d) sobre la isopícnica de  $25.25\ kg\ m^{-3}$  en la sección radial para el crucero P24. La barra de colores indica el valor asociado a cada variable, mientras que los puntos ubican la posición de los lances (estaciones 14-67). ..... 39

**Figura 12.** Diagrama  $\Theta$ - $S_A$  de la entrada del GC para el crucero P24 (2013). La barra de color muestra la concentración de OD. Se emplearon los lances 1-20 (Fig. 1c) y la clasificación de Portela *et al.* (2016) para la identificación de masas de agua. Las isolíneas negras (café) segmentadas (continuas) indican las isopícnas ( $\pi$ ) con unidades de  $kg\ m^{-3}$ . ..... 41

**Figura 13.** Secciones transversales de  $S_A$  (a),  $\Theta$  (b), OD (c) y  $\pi$  (d) sobre  $\sigma_{\Theta}$  para la sección de la entrada al Golfo de California del crucero P24 (Fig. 1c; lances 1-20)..... 42

**Figura 14.** Perfiles verticales de  $H_4SiO_4$  (A, D),  $NO_x$  ( $NO_3+NO_2$ ; B, E) y  $PO_4$  (C, F) para el crucero P24. La barra de colores indica la concentración de OD ( $\mu mol\ kg^{-1}$ ) asociada a cada lance. Los lances de la eGC componen las estaciones 1-20 mientras que la sección del Pacífico las estaciones 67-77 (Fig. 1). La sección del Pacífico se ve dividida entre las del norte (●) y del sur (▲) de PEu, mientras que la línea gris indica la estación ubicada a la altura de esta..... 61

**Figura 15.** Diagramas de  $H_4SiO_4$ - $NO_x$  (a-d),  $\pi$ -OD (b-e) y SA-  $H_4SiO_4$  (c-f) para el crucero P24. La barra de colores indica la profundidad (m) asociada a cada lance. Los lances de la eGC componen las estaciones 1-20 mientras que la sección del Pacífico las estaciones 67-77. La sección del Pacífico se ve dividida en aquellas al norte (●) y sur (▲) de PEu, mientras que la línea gris indica la estación ubicada a la altura de esta..... 63

**Figura 16.** Relación  $PO_4$ - $NO_3$  para la eGC (a) y la sección del OP (b). La barra de colores indica la profundidad asociada al lance (hasta los 1000 m), mientras que la línea recta el ajuste lineal del

conjunto de datos. Los lances de la eGC componen las estaciones 1-20 mientras que la sección del Pacífico las estaciones 67-77. .... 64

**Figura 17.** Perfiles de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4$  (a, c) y  $\text{N}^*$  (b, d) respecto a profundidad. La barra de colores indica la concentración de OD. Los lances de la eGC componen las estaciones 1-20 mientras que la sección del Pacífico las estaciones 67-77. La sección del Pacífico se ve dividida en aquellas al norte (●) y sur (▲) de PEu, mientras que la línea gris indica la estación ubicada a la altura de esta. .... 66

**Figura 18.** Perfiles de AOU de la eGC (a) y el OP (b) respecto a profundidad. Los lances de la eGC componen las estaciones 1-20 mientras que la sección del Pacífico las estaciones 67-77. La barra de colores indica la concentración de OD ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ )..... 67

**Figura 19.** Esquema de los principales rasgos físicos y de circulación observados en el presente estudio después del análisis de los cruceros Western-Flyer (febrero, 2012) y PESCAR24 (abril, 2013). El grosor (tamaño) de los rasgos es indicativo de su intensidad o magnitud..... 75

## Lista de Anexos

<b>Anexo 1.</b> Corrientes medidas con ADCP, promediadas entre 50-100 m, para la entrada al Golfo de California referentes al crucero PESCAR24. ....	81
<b>Anexo 2.</b> Límites termohalinos empleados para la clasificación de masas de agua. ....	81
<b>Anexo 3.</b> Mapa de distribución de OD en la sección radial a 10, 50, 75 y 100 m de profundidad para el crucero PESCAR24. La barra de colores indica la concentración de OD ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ). Se complementa con las corrientes sobre cada capa, donde la longitud y punta indican la magnitud y dirección, respectivamente. ....	82
<b>Anexo 4.</b> Diagrama $\theta$ - $S_A$ para la sección radial frente a la PBC. La barra de colores indica la concentración de OD ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) y se empleó la clasificación de Portela <i>et al.</i> , (2016). ....	83
<b>Anexo 5.</b> Distribución de OD a diferentes profundidades (10, 50, 75 y 100 m) frente a la pPBC para el crucero PESCAR24. La barra de colores indica la concentración de OD ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ), mientras que las flechas indican la magnitud y dirección de las corrientes a dicha capa. ....	84
<b>Anexo 6.</b> Distribución de $S_A$ ( $\text{g kg}^{-1}$ ) (a), $\theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) (b), $\pi$ ( $\text{kg m}^{-3}$ ) (c) y profundidad (m) (d) sobre la isopícna de $24 \text{ kg m}^{-3}$ en la sección radial para el crucero P24. La barra de colores indica el valor asociado a cada variable, los puntos ubican la posición de los lances (estaciones 14-67) y los vectores la magnitud e intensidad de las corrientes promediadas entre 5-35 m. ....	85
<b>Anexo 7.</b> Distribución de $S_A$ ( $\text{g kg}^{-1}$ ) (a), $\theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) (b), $\pi$ ( $\text{kg m}^{-3}$ ) (c) y profundidad (m) (d) sobre la isopícna de $25 \text{ kg m}^{-3}$ en la sección radial para el crucero P24. La barra de colores indica el valor asociado a cada variable, los puntos ubican la posición de los lances (estaciones 14-67) y los vectores la magnitud e intensidad de las corrientes promediadas entre 25-65 m. ....	85

# 1. Introducción

---

El Sistema de la Corriente de California (SCC) representa una corriente de frontera oriental que se extiende desde Alaska hasta el sur de la Península de Baja California (PBC), que transporta agua de origen subártico hacia zonas tropicales (Lynn y Simpson, 1987; Checkley y Barth, 2009; Durazo, 2015). Debido a su gran extensión latitudinal, el SCC presenta cambios en sus patrones de circulación, lo que resulta en la identificación de dos bifurcaciones; uno que gira hacia el oeste entre  $\sim 15\text{-}18^\circ\text{N}$  para integrarse a la corriente Nor-Ecuatorial, mientras que el otro continúa como un flujo hacia el ecuador hasta la punta de la PBC (pPBC) y a la zona de la entrada al Golfo de California (eGC) (Kessler, 2006; López-Avilés et al., 2024). Este último brazo, debido a su extensión hacia zonas tropicales, se denomina Brazo Tropical de la Corriente de California (BTCC) (Godínez et al., 2010; Kurczyn et al., 2012; López-Avilés et al., 2024).

El SCC es dominado por un flujo superficial lento ( $\sim 0\text{-}200$  m; velocidades medias de  $\sim 20$  cm s<sup>-1</sup>) de la Corriente de California (CC) en dirección hacia el ecuador, la cual transporta agua subártica de bajas temperaturas ( $10\text{-}21^\circ\text{C}$ ), bajas salinidades ( $33.0 - 34.6$  g kg<sup>-1</sup>) y un elevado contenido de oxígeno disuelto (OD), principalmente durante invierno, primavera y verano (Wyrki, 1965; Lynn, 1967; Lynn y Simpson, 1987; Bograd et al., 2001; Durazo, 2015; Portela et al., 2016; Gómez, 2016). Durante la mayor parte del año, se presenta una recirculación de la CC en dirección norte por debajo de los 50 m, principalmente por la extensión sureña del *Southern California Bight Eddy* (SCBE) (Owen, 1980; Checkley y Barth, 2009). Este retorno ocurre a la altura del sur de Punta Concepción, California ( $\sim 34.5^\circ\text{N}$ ), hasta Ensenada, Baja California ( $\sim 32^\circ\text{N}$ ), y su intensidad se ve incrementada (reducida) durante el verano (primavera) como respuesta a vientos regionales, además de contar con una gran importancia ecológica aunada a que favorece la interacción y crecimiento de especies marinas (Schwartzlose, 1963; Hickey, 1979; Owen, 1980; Checkley y Barth, 2009; Kurczyn et al., 2019).

Así mismo, a la altura de la zona sur de California se presenta un flujo acelerado en dirección sur denominado “*jet costero*”, el cual persiste durante gran parte del año y es el resultado del flujo de masa inducido por surgencias y el levantamiento de

isopícnas a lo largo de la línea de costa. Este fenómeno causa el enfriamiento de las aguas superficiales y consiguio una disminución de la altura estérica del mar, lo que resulta en el flujo de una corriente por balance del gradiente de presión (Gill, 1982; Linacre *et al.*, 2010; López-Avilés *et al.*, 2024).

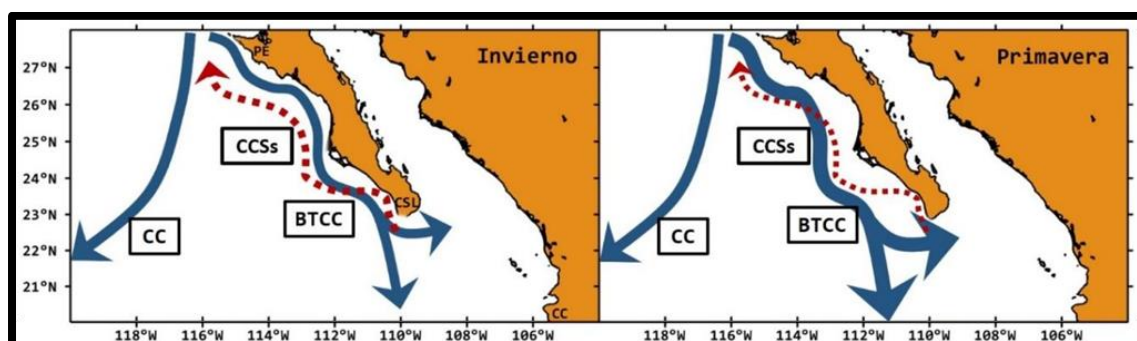
Adicionalmente, el SCC se complementa por la Contracorriente Superficial de California (CSC; también llamada Contracorriente de California), la cual exhibe un flujo predominante hacia el norte con mayor intensidad en verano. Esta corriente se caracteriza por el transporte de Agua Tropical Superficial (ATS) y Agua Transicional (AT) desde el sureste y a lo largo de la Corriente Costera Mexicana, donde ambas exponen características termohalinas de elevada temperatura y salinidad (López-Aviles *et al.*, 2024).

Subsuperficialmente, se ha reportado la presencia de la *California Undercurrent* (CU), cuyo flujo es en sentido opuesto de la CC y a una profundidad entre los 200 y 300 m. Persiste durante gran parte del año, aunque se intensifica (disminuye) durante los periodos de primavera (invierno) (Durazo, 2015; López-Aviles *et al.*, 2024). La principal masa de agua que transporta esta CU es el Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt), la cual contiene características biogeoquímicas específicas, tales como un contenido mínimo de OD, temperaturas de entre 9-18°C, valores de salinidad de entre 34.6-35.1 g kg<sup>-1</sup> y un elevado contenido de nutrientes inorgánicos disueltos (Griffiths, 1968; Bograd *et al.*, 2001; Durazo, 2015; Portela *et al.*, 2016; Kurczyn *et al.*, 2019; López-Aviles *et al.*, 2024).

Los cambios en la intensidad de la CC son una respuesta directa del campo de vientos propiciado por el Centro de Alta Presión del Pacífico Norte (CAPN), el cual tiene su mayor (menor) intensidad durante primavera-verano (otoño-invierno) (Castro y Martínez, 2010; Durazo, 2015). Estos vientos provienen del nor-noroeste y fluyen paralelos a la costa de California y la PBC, mecanismo responsable de la elevada productividad primaria por favorecer los eventos de surgencias costeras por divergencia de Ekman. Específicamente, Bograd *et al.* (2001) caracterizan a la región sur del SCC como una zona fuente de materia orgánica y sumidero de nutrientes, principalmente por los flujos verticales de agua subsuperficial. El rotacional del esfuerzo del viento positivo es otro factor que complementa y favorece a la alta productividad en la región, tanto en su extremo norte como sur (Castro y Martínez, 2010; Durazo, 2015).

Parte del efecto del viento regional en la zona costera del SCC radica en la presencia prácticamente permanente de remolinos oceánicos de mesoescala y submesoescala, meandros y frentes oceánicos de dimensiones variables resultantes de la interacción de agua superficial con agua de surgencia (Flament *et al.*, 1985; Strub y James, 1995; Gómez-Valdivia, 2016). Uno de estos se denomina frente de California y se encuentra adyacente a la zona sur de California. Es formado por la interacción de masas de agua de origen subártico, tropicales y subtropicales, por los cambios abruptos tanto de temperatura como de salinidad (Gómez, 2016).

El BTCC fluye a lo largo de Baja California Sur (BCS) en dirección hacia el ecuador, donde parte de este brazo interactúa con las masas de agua de la región de la eGC, así como de la región de convergencia tropical-subtropical de México, principalmente en épocas de invierno-primavera (Castro *et al.*, 2017; Trucco-Pignata *et al.*, 2019; López-Avilés *et al.*, 2024). Se ha reportado que un forzante local sobre el BTCC es el rotacional del esfuerzo del viento, sin embargo, el comportamiento estacional, transporte de volumen y la estructura vertical siguen en discusión hasta la fecha (Durazo, 2015; López-Avilés *et al.*, 2024). Otras masas de agua superficiales, además del ACC, son el ATS, la cual se caracteriza por altas temperaturas ( $>25.1^{\circ}\text{C}$ ) y bajas salinidades ( $<34.6 \text{ g kg}^{-1}$ ), así como el Agua del Golfo de California (AGC) ( $>12^{\circ}\text{C}$ ;  $>35.1 \text{ g kg}^{-1}$ ), además de contar con la presencia del ASsSt. Bajo estas aguas se encuentran el Agua Intermedia del Pacífico (AIP) y el Agua Profunda del Pacífico (APP) (Portela *et al.*, 2016; Castro *et al.*, 2017).



Esquema de las principales corrientes e intensidades del SCC para invierno y primavera. Modificada de López-Avilés (2024).

En cuanto al intercambio de aguas entre el Pacífico y el GC, se ha reportado en una sección de la entrada, entre la punta este de la PBC y Sinaloa, un intercambio

ciclónico entre el AGC que fluye cerca de la PBC y las aguas del Pacífico (ACC, ATS) que ingresan por la parte central-este (Castro *et al.*, 2000; Collins y Castro, 2022), aunque también se ha reportado un intercambio anticiclónico (Castro *et al.*, 2017; Larios-Muñiz *et al.*, 2022). Parte de esta circulación se ve implicada en la exportación de nutrientes desde el GC hacia zonas adyacentes del OP durante todo el año, así como la presencia de procesos de desnitrificación en la eGC descritos por Bustos-Serrano y Castro-Valdez (2006).

El flujo del ACC hacia latitudes sureñas es de suma importancia, pues influye en la ventilación de aguas subóxicas subsuperficiales del GC, así como de la región Central del Pacífico Mexicano, lugar donde se presenta una de las Zonas de Mínimo Oxígeno (ZMO) de mayor extensión a nivel mundial (Griffiths, 1968; Cepeda-Morales *et al.*, 2013; Trucco-Pignata *et al.*, 2019; López-Avilés *et al.*, 2024). Esta ZMO fue descrita por Warsh *et al.* (1973) como una capa entre los 200 y 800 m de profundidad donde los valores de OD disminuyen progresivamente, acompañado de un enriquecimiento de nutrientes. Dichos autores reportaron los primeros estudios con variables cuasi conservativas, tales como nutrientes y OD, para identificar, describir y caracterizar las masas de agua presentes en la eGC como forma complementaria a las propiedades termohalinas. Además, Warsh *et al.* (1973) aportaron a la identificación de masas de agua mediante sus características fisicoquímicas, enfocado principalmente en el contenido de nutrientes como silicato, fosfato y propiedades termohalinas a lo largo de la columna de agua. Así mismo, Bustos-Serrano y Castro-Valdez (2006) indicaron la existencia de una salida de nitrato/fosfato y amonio de la eGC mediante aproximaciones geostróficas de cinco cruceros oceanográficos.

Estudios previos han reportado un incremento en la temperatura de las masas de agua superficiales del SCC y de la intensidad en la estratificación (Bograd y Lynn, 2003; Snyder *et al.*, 2003; Chasco *et al.*, 2022). Este cambio en las propiedades termohalinas puede tener repercusiones en la intensidad de los procesos de surgencia del SCC y, además, modificar los límites para la identificación y clasificación de las masas de agua (Snyder *et al.*, 2003). La importancia de realizar el presente trabajo radica en complementar los rangos de las propiedades termohalinas descritas previamente por diversos autores (Portela *et al.*, 2016 y referencias incluidas) con parámetros geoquímicos tales como fosfato, nitrato y OD, para facilitar la

identificación y el trazado de las masas de agua en trabajos futuros. Esto se realiza con la suposición de que existen diferencias en la estructura hidrográfica y las propiedades químicas de las masas de agua superficiales y subsuperficiales en la región sur del SCC y en la eGC.

## **1.1 Hipótesis**

Existen diferencias en la estructura hidrográfica y propiedades químicas de las masas de agua superficiales (0-150 m) y subsuperficiales (150-300 m) entre la región del Sur de California-Baja California y la zona de la entrada al Golfo de California para los dos periodos de muestreo; febrero 2012 y abril 2013.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 *Objetivo general***

Describir y analizar las propiedades físicas y químicas frente a las costas del sur de California, la Península de Baja California y la entrada al Golfo de California para el periodo del 4 al 13 de febrero de 2012 y del 19 de abril al 2 de mayo de 2013.

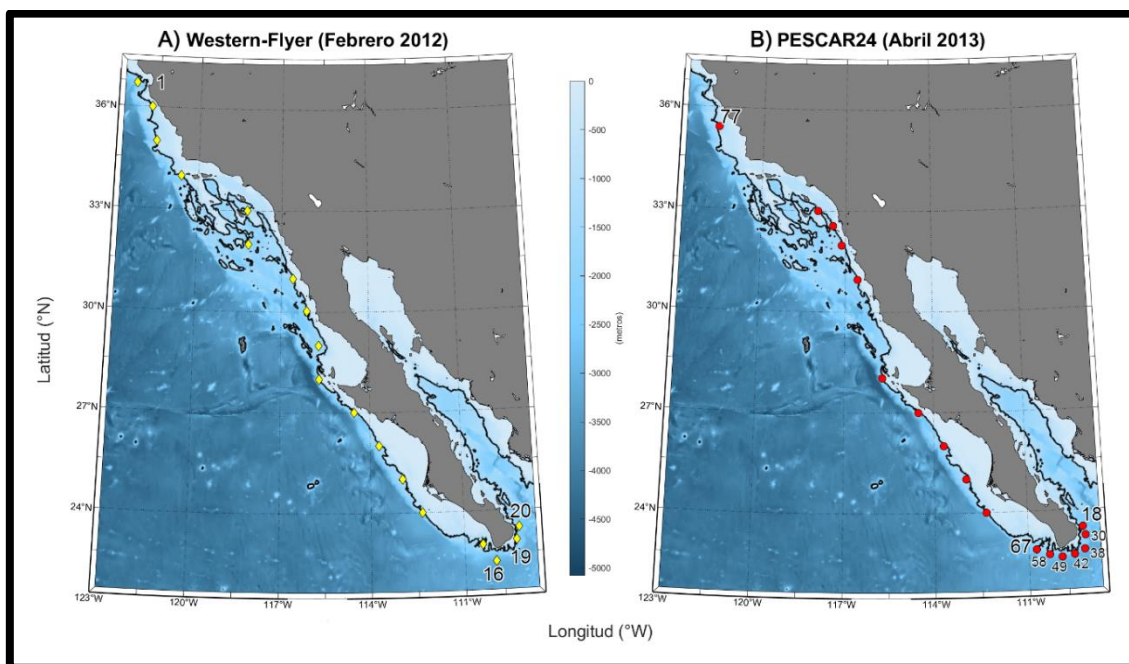
### **1.2.2 *Objetivos específicos***

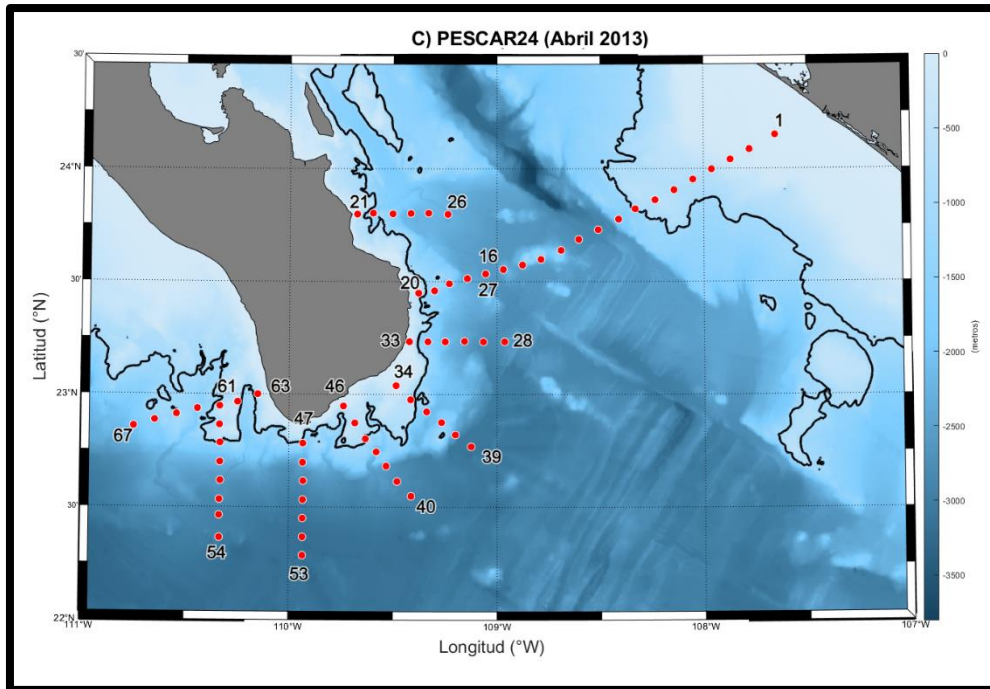
- Comparar la estructura hidrográfica entre los cruceros de febrero de 2012 y abril de 2013, así como identificar las masas de agua presentes.
- Identificar masas de agua con límites termohalinos existentes y con las corrientes principales del Sistema de la Corriente de California para la temporada de invierno-primavera.
- Describir y analizar la circulación superficial y subsuperficial a través de observaciones y de datos de reanálisis, así como su relación con propiedades termohalinas.
- Describir las propiedades químicas del Sistema de la Corriente de California y la entrada al Golfo de California para la temporada de primavera.

## 2. Metodología

Durante el periodo del 04 al 13 de febrero de 2012 se realizó una expedición oceanográfica a bordo del *R/V Western Flyer* (W-F) (MBARI, 2012) que zarpó desde la bahía de Monterey, CA, EE.UU., hasta la eGC (Fig. 1a). En este crucero, se colectaron 21 lances hidrográficos con un perfilador CTD (Conductivity, Temperature, Depth, por sus siglas en inglés), además de incluir sensores de OD y de fluorescencia (no mostrados). Dichos datos fueron promediados en la vertical cada 1 dbar (~1 m) y se extendieron hasta 1000 m de profundidad.

Posteriormente, entre el 19 de abril y el 02 de mayo de 2013, se realizó el crucero oceanográfico PESCAR24 (P24) en el *R/V Point Sur*. P24 fue un crucero de oportunidad en el regreso del *R/V Point Sur* de la Antártida a Moss Landing, CA (Rago *et al.*, 2013). En este crucero se efectuaron 77 estaciones: los lances 1-20 se realizaron entre Sinaloa y la punta este de la PBC, las estaciones 21-67 fueron secciones radiales que rodearon la pPBC (Fig. 1c), y los lances 67-77 frente a la PBC y al sur de California del lado del Pacífico (Fig. 1b). Durante este crucero se obtuvieron mediciones con CTD, así como sensores de OD y fluorescencia (no mostrados). Además, se colectaron muestras para nutrientes (Rago *et al.*, 2013). Los datos fueron promediados cada 1 m hasta los 1000 m de profundidad, con la excepción de las estaciones 1-20, los cuales se extendieron desde la superficie hasta cerca del fondo.





**Figura 1.** Localización geográfica de las estaciones hidrográficas durante los cruceros PESCAR24 (a) y Western-Flyer (b). Estaciones de muestreo en la boca del Golfo de California y la pBc (c). La escala de colores indica la batimetría (m). La línea en negro muestra la isobata de 1000 m. La región de Punta Eugenia (PEu; ~28°N) distingue dos provincias, una al norte y otra al sur de la misma.

Para complementar las observaciones, se extrajeron los datos diarios de temperatura potencial ( $\Theta$ ; °C), salinidad práctica, altura del nivel del mar y velocidad de las corrientes ( $m s^{-1}$ ) de la base global del reanálisis *Copernicus Marine GLOBAL\_MULTIYEAR\_PHY\_001\_030*, con resolución de  $1/12^{\circ}$  y 50 profundidades ([https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL\\_MULTIYEAR\\_PHY\\_ENS\\_001\\_031/services](https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_ENS_001_031/services)) para las fechas de los cruceros.

Las temperatura *in situ* y la salinidad práctica obtenidos con el CTD fueron convertidas a temperatura conservativa ( $\Theta$ , °C) y salinidad absoluta ( $S_A$ ,  $g kg^{-1}$ ) a través de la Ecuación Termodinámica Internacional-10 (TEOS-10) (IOC *et al.*, 2010). Posteriormente, con estas funciones se calculó la anomalía de densidad potencial ( $\sigma_{\Theta}$ ,  $kg m^{-3}$ ), la velocidad geostrofica ( $m s^{-1}$ ) y la variable *spiciness* ( $\pi$ ,  $kg m^{-3}$ ) referida a 0 dbar.  $\pi$  está asociada a las variaciones espaciales de las propiedades termohalinas de las masas de agua ( $\Theta$  y  $S_A$ ) en una misma isopícna (McDougall y Krzysik, 2015). Los datos de temperatura potencial y salinidad práctica del reanálisis también fueron convertidos a  $\Theta$  y  $S_A$ . Debido a la amplia distribución latitudinal de los datos de ambos cruceros, la identificación de masas de agua en el área de estudio fue realizada mediante los rangos termohalinos propuestos por Portela *et al.* (2016)

para la región sur ( $< 27^\circ\text{N}$ ), y la clasificación reportada en [Kurczyn \*et al.\* \(2019\)](#) para las estaciones más norteñas.

Con la finalidad de medir las corrientes, el crucero P24 fue equipado con dos Perfiladores de Corrientes Acústico Doppler (SADCP, por sus siglas en inglés) ubicados en el casco del barco (1 Ocean Surveyor de 75 kHz y 1 Workhorse Mariner de 300 kHz) y un Perfilador de Corrientes Acústico Doppler orientado hacia abajo (LADCP), el cual se bajó en la columna de agua junto con la roseta y el CTD. Posteriormente, se combinaron los datos de SADCP y se extrajeron las componentes zonales y meridionales en cada estación y durante el derrotero del buque, así como de la componente vertical, cuyo intervalo de muestreo fue de cada 8 m ([ver Rago \*et al.\*, 2013; Castro \*et al.\*, 2017](#)).

Las muestras para las variables químicas, tales como los nutrientes (Nitrato;  $\text{NO}_3$ , Nitrito;  $\text{NO}_2$ , Fosfato;  $\text{PO}_4$ , Ácido Silícico:  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) fueron obtenidas solo para el crucero P24 mediante botellas Niskin de 5L. Posteriormente, éstas muestras fueron procesadas en el laboratorio de *Monterey Bay Aquarium Research Institute* (MBARI) ([Rago \*et al.\*, 2013](#)). En la sección de la eGC (P24; Lances 1-20; Fig. 1c), los muestreos de los nutrientes se extendieron hasta el fondo, y en el resto de las estaciones solo se incluyeron los lances 26, 28, 39, 40, 53, 54, 67-77, hasta 1000 m de profundidad. La Utilización Aparente de Oxígeno (AOU) fue calculada en base a las ecuaciones de [Garcia y Gordon \(1992\)](#) presentes en el WOA 2018 ([Garcia \*et al.\*, 2019](#)) como  $AOU = [O_2^*] - [O_2]$ , donde  $[O_2^*]$  es la concentración de solubilidad del  $\text{O}_2$ . Además, el trazador de Nitrógeno ( $N^*$ ) fue calculado con la ecuación propuesta por [Paul \*et al.\* \(2024\)](#), tal que  $N^* = \text{NO}_3 - (16 \times \text{PO}_4) + 2.9$ .

La circulación geostrófica superficial durante los cruceros se obtuvo a través de la topografía dinámica absoluta (TDA) de la base de datos Copernicus (<http://marine.copernicus.eu>), que a su vez se complementó con las corrientes superficiales de los ADCP y del reanálisis. Se eligieron algunas capas en base a la distribución de las características termohalinas de las secciones verticales de los cruceros.

# Capítulo 1: Resultados y comparación hidrográfica entre cruceros Western-Flyer y PESCAR24

---

## 3.1 Distribución de propiedades frente a las costas del sur de California y Baja California

En esta sección se comparan la distribución vertical de las propiedades físicas y químicas de ambos cruceros a lo largo de sus respectivos transectos (W-F, febrero 2012; P24, abril 2013). Igualmente, se incluyen diagramas e imágenes que permiten la identificación de masas de agua y flujos de las corrientes presentes.

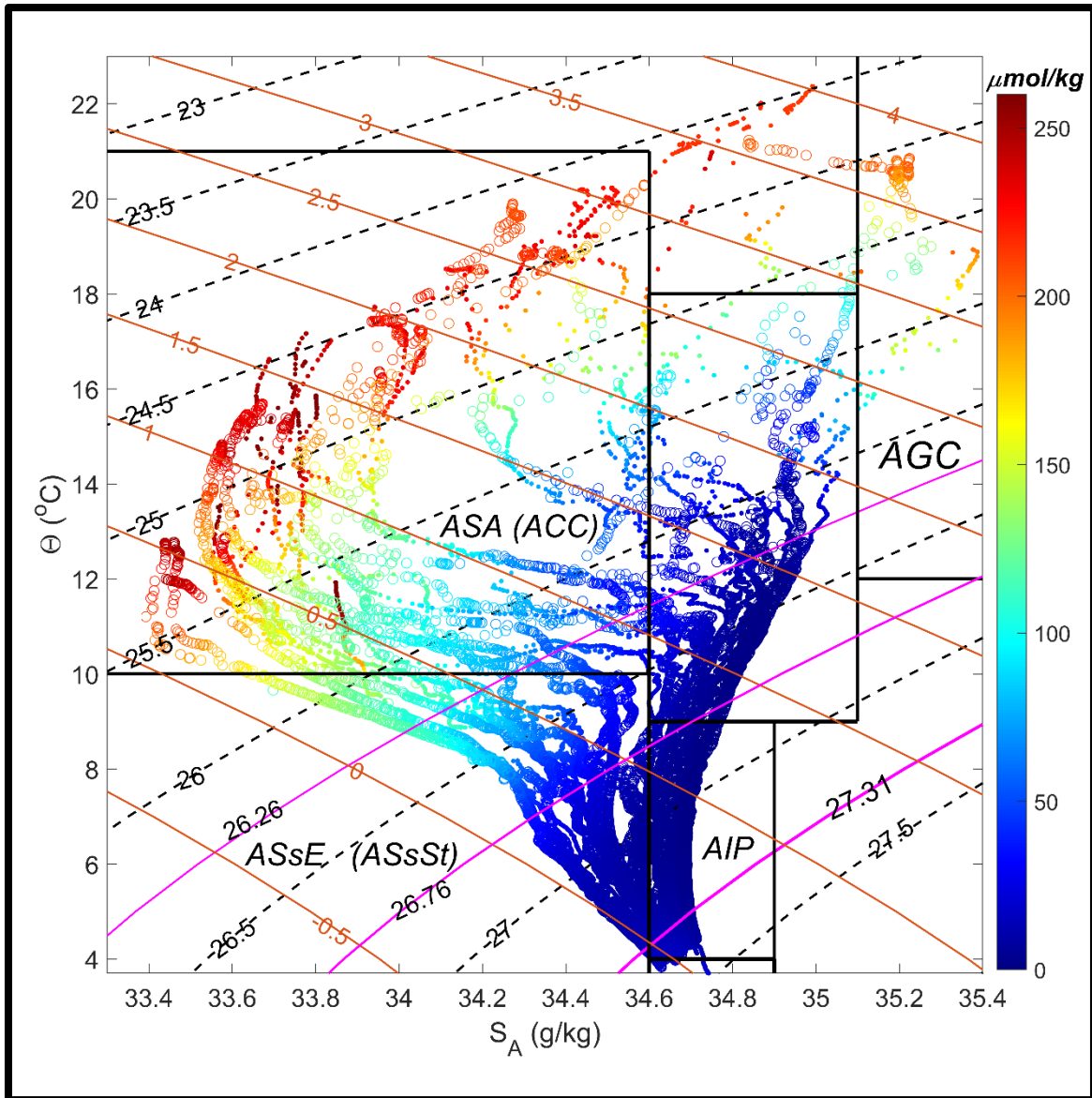
Las características termohalinas y del OD, de las masas de agua de los lances de lado del Pacífico y frente a la pPBC para ambos cruceros (Figs. 1a-b), se muestran en el diagrama  $\Theta$ - $S_A$  (Fig. 2), donde además se incluyen los límites termohalinos propuestos en [Portela et al. \(2016\)](#). Debido a que en dicho estudio solo se consideraron lances hidrográficos para latitudes  $<27^\circ\text{N}$ , también se incluyeron las delimitaciones en base a rangos entre isopícnas sugeridas en [Kurczyn et al. \(2019\)](#), donde se estudiaron las masas de agua sobre la plataforma continental al norte de Baja California ( $\sim 31$ - $32^\circ\text{N}$ ).

El lance más al norte del crucero W-F (P24) alcanzó  $\sim 36.7^\circ\text{N}$  ( $35.4^\circ\text{N}$ ) y el lance más al sur,  $\sim 22.5^\circ\text{N}$  (Figs. 1a-b). Debido a ésta distribución latitudinal, se observa como las aguas se esparcen con amplios rangos de  $S_A$  y  $\Theta$ , sobre todo para densidades  $\leq 26.5 \text{ kg m}^{-3}$  (Fig. 2). Al seguir esta isopícnica a lo largo del diagrama, la  $S_A$ , la  $\Theta$  y el OD variaron entre  $34.1$ - $34.9 \text{ g kg}^{-1}$ ,  $8$ - $11.47^\circ\text{C}$  y  $70$ - $25 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1}$ , respectivamente. Esta distribución delimitó los lances del norte y del sur y se encuentra dentro de los rangos del ASsSt, también llamada Agua Subsuperficial Ecuatorial (ASsE) en [Kurczyn et al. \(2019\)](#). En este último estudio, los límites del ASsE se encuentran entre  $26.26 \geq \sigma_\theta \leq 27.76$ , los cuales cubrieron de manera adecuada los rangos termohalinos de las estaciones de los lances norteños ubicados en el diagrama (Fig. 2). Se destaca que las aguas más frías y menos salinas tienen mayor concentración de OD, lo cual es más notorio para aguas con  $\sigma_\theta \leq 26.26 \text{ kg m}^{-3}$  que se encuentran dentro de los rangos del Agua Subártica (ASA), nombrada ACC en [Portela et al. \(2016\)](#). Esto no ocurre para los lances con  $S_A \geq 34.6 \text{ g kg}^{-1}$  (lances sureños),

donde el ASsSt predomina con bajas concentraciones de OD ( $\sim 50 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ). Las aguas con  $\sigma_\theta$  entre  $26.76\text{-}27.31 \text{ kg m}^{-3}$  se encuentran caracterizadas por una menor variabilidad de  $S_A$  ( $34.3\text{-}34.7 \text{ g kg}^{-1}$ ) y concentraciones de OD  $< 25 \mu\text{mol kg}^{-1}$ , correspondientes al AIP, misma que se encuentra tanto en los límites de [Portela \*et al.\* \(2016\)](#), para el sur de la PBC, y [Kurczyn \*et al.\* \(2019\)](#) para las estaciones del norte de la PBC y el sur de California. Se menciona que algunos lances alcanzaron rangos termohalinos del AGC y de Agua Transicional (AT), y las concentraciones más altas de OD ( $\sim 250 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) ocurrieron para las aguas superficiales en la interacción con la atmósfera.

Los contornos de  $\pi$  (isolíneas de  $0\text{-}0.5 \text{ kg m}^{-3}$ ) fueron relativamente paralelos al diagrama para salinidades y temperaturas bajas, así como para aguas cálidas y saladas superficiales entre los contornos de  $\pi$   $3.5\text{-}4 \text{ kg m}^{-3}$ .

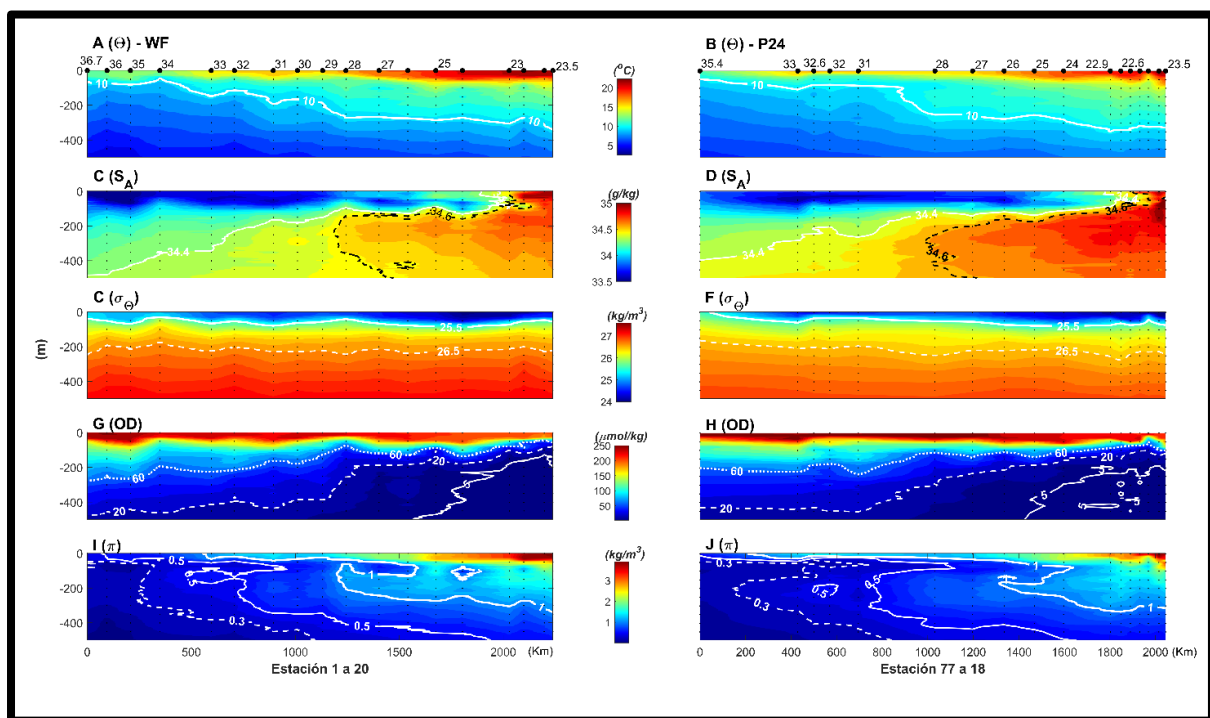
Respecto a la distribución de propiedades en las secciones del Pacífico, la  $\Theta$  mostró un patrón similar entre los cruceros W-F y P24 (Fig. 3a y 3b). Las aguas en la superficie en la parte norte, fueron más frías para el crucero W-F ( $\sim 12^\circ\text{C}$ ) y relativamente más cálidas para el P24 ( $\sim 15\text{-}16^\circ\text{C}$ ). En el sur, ambos cruceros registraron temperaturas superficiales de  $\sim 20\text{-}21^\circ\text{C}$ , aunque en P24 se obtuvieron temperaturas de hasta  $22^\circ\text{C}$  en la región más sureña. La capa superficial más cálida fue en aumento en profundidad hacia el sur donde alcanzó  $\sim 100\text{-}150 \text{ m}$  ( $12^\circ\text{C}$ ). El comportamiento vertical de las isotermas muestra una pendiente que se hundió hacia el sur. Esto es notorio en la isoterma de  $10^\circ\text{C}$ , la cual en la región norte se extiende entre los  $\sim 50\text{-}60 \text{ m}$ , con un incremento gradual de la profundidad hasta los  $\sim 380 \text{ m}$  en la contraparte sureña, donde además las capas subsuperficiales aumentaron su temperatura.



**Figura 2.** Diagrama  $\Theta$ - $S_A$  de los cruceros W-F (Febrero 2012;  $\circ$ ) y P24 (Abril 2013;  $\bullet$ ) para los lances del Pacífico y frente a la pPBC (Figs. 1a-b). Los recuadros encierran los rangos termohalinos de las masas de agua en base a la clasificación de [Portela et al. \(2016\)](#). ACC, Agua de la Corriente de California; AGC, Agua del Golfo de California; ASsSt, Agua Subsuperficial Subtropical; AIP, Agua Intermedia del Pacífico. Las isolíneas negras (café) indican las isopícnas (spiciness). Se incluyen también los rangos entre isopícnas (magenta) reportados en [Kurczyn et al. \(2019\)](#) para la clasificación de masas de agua: AIP (27.76-27.31  $\text{kg m}^{-3}$ ), Agua Subsuperficial Ecuatorial (ASsE) (26.26-26.76  $\text{kg m}^{-3}$ ) y el Agua Subártica (ASA) (<26.26  $\text{kg m}^{-3}$ ). El ASsE y el ASA son referidas en [Portela et al. \(2016\)](#) como ASsSt y ACC.

En cuanto a la  $S_A$  (Figs. 3c y 3d), se observó que en ambos cruceros los valores más bajos se presentaron hacia el norte de las secciones. Tanto en W-F como en P24, la  $S_A$  de la capa superficial (<130 m) varió entre  $\sim 33.5$ - $34.1 \text{ g kg}^{-1}$  con características del ACC, acompañado del flujo de lengüetas y núcleos subsuperficiales hacia el sur con valores entre  $33.8$ - $33.9 \text{ g kg}^{-1}$  que alcanzan los  $\sim 24$ -

26°N a ~90-100 m de profundidad. Esto último evidencia la incursión del ACC hacia la zona tropical. Por otro lado, al sur de ~23.5°N la salinidad mostró un incremento drástico. En W-F se detectó un núcleo de 34.9 g kg<sup>-1</sup> por arriba de 100 m de profundidad, mientras que en P24 este mismo núcleo se detectó hasta los ~230 m. Las mayores salinidades se encontraron en P24 en su contraparte sur, con una mayor extensión tanto en la vertical como latitudinal. También, resalta la distribución de lengüetas con S<sub>A</sub> entre 34.6-34.7 g kg<sup>-1</sup> con extensión y dirección de sur a norte, principalmente entre los ~120-450 m en ambos cruceros. Algo característico fue el comportamiento inverso de las isohalinas respecto a las isotermas (Fig. 3a y 3b). En particular, la isohalina de 34.4 g kg<sup>-1</sup> se detectó entre los 400-500 m de profundidad en la región norte, y ascendió a la superficie (~100 m) a los ~23°N, donde se encontró con agua más salina de la región sur que le impidió el paso hacia latitudes más bajas.



**Figura 3.** Secciones transversales frente a las costas de California y de la PBC (Figs. 1a-b), para los cruceros W-F (panel izquierdo) y P24 (panel derecho). Los puntos negros indican la posición de los lances con respecto a la distancia recorrida, el número la latitud del lance y profundidades cada 50 m en la vertical. (A, B) Temperatura conservativa, (C, D) Salinidad absoluta, (E, F) Densidad potencial, (G, H) Oxígeno disuelto, (I, J) spiciness.

El comportamiento de la densidad potencial ( $\sigma_{\theta}$ ) (Fig. 3e y 3f) fue relativamente homogéneo a lo largo de ambos transectos. Las densidades más bajas se encuentran en la capa superficial y aumentan con la profundidad. La isopícna de 25.5 g kg<sup>-1</sup>

separa las capas superficial y subsuperficial, y su profundidad varía a lo largo del transecto, lo que muestra hundimientos y ascensos, especialmente durante el crucero W-F. En P24, esta isopícnica fue más somera en el norte (cerca de 0 m) y se profundiza hasta unos 100 m en el sur, donde llega a presentar leves hundimientos y ascensos. El rasgo del hundimiento subsuperficial norte-sur que se observó en varias isotermas, así como la distribución de isohalinas de sur a norte no se denota claramente en la densidad. Es decir, no es posible detectar un hundimiento de la isopícnas en dirección norte-sur, o viceversa, tal como se observó con los contornos de temperatura y salinidad. Esto sugiere que la distribución de aguas relativamente más salinas provenientes del sur debajo de los 100 m de profundidad, se compensan con el ascenso de las isotermas al sur de 31°N.

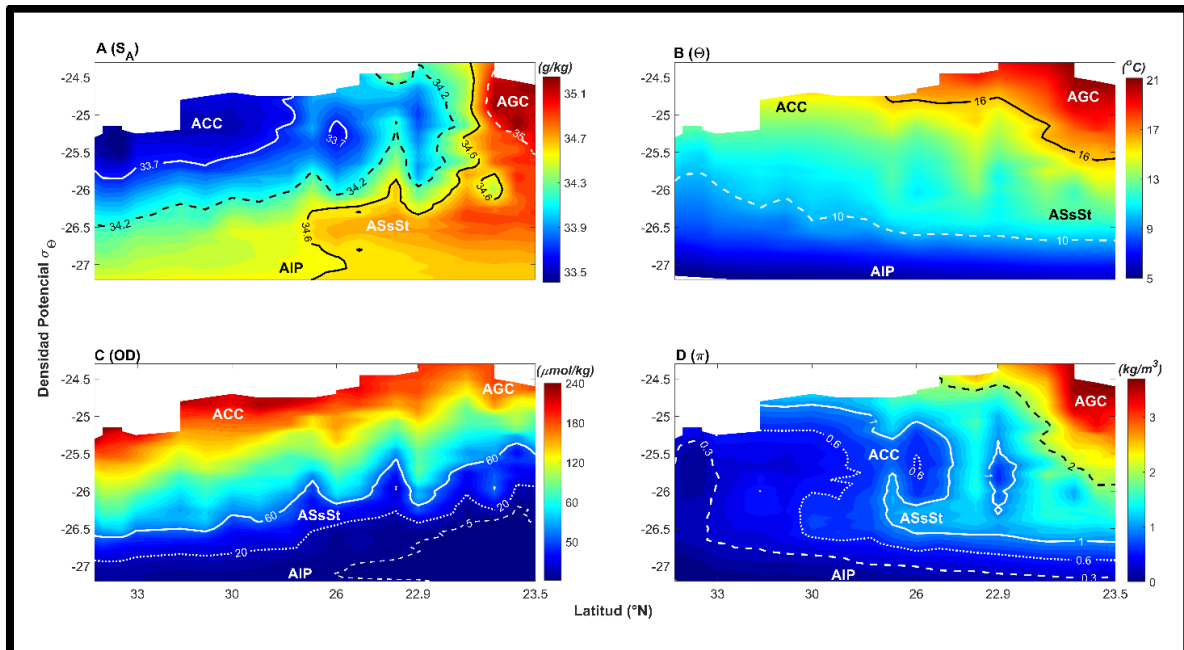
El OD (Figs. 3g y 3h) se caracterizó por concentraciones elevadas ( $>120 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) en los primeros 100 m de la columna de agua, con una disminución rápida hacia valores cercanos menores que  $5 \mu\text{mol kg}^{-1}$  por debajo de los 150 m en la región sur. Las mayores concentraciones de OD se registraron en la sección norte, con un máximo para el crucero P24 de  $\sim 250 \mu\text{mol kg}^{-1}$ , en una capa superficial de  $\sim 25\text{-}50$  m de profundidad. Esta isolínea se extendió hasta  $\sim 26.5^\circ\text{N}$  en P24, mientras que las mayores concentraciones en W-F se localizaron únicamente hasta los  $\sim 35.5^\circ\text{N}$  a 50 m de profundidad. En el extremo sur de ambos transectos, las concentraciones de OD superficial fueron de  $\sim 200 \mu\text{mol kg}^{-1}$ , lo que muestra una ligera pérdida (menor saturación) por la presencia de AGC, en comparación con el extremo norte dominado por ASA. Las isolíneas de 60 y  $20 \mu\text{mol kg}^{-1}$  indican el límite superior e inferior de la Zona Limitante de Oxígeno (ZLO), planteada por [Gilly et al. \(2013\)](#), debajo de la cual se encuentra la ZMO. Estas isolíneas exponen un hundimiento de sur a norte (inverso a la temperatura), con un cambio de la extensión vertical de la ZLO de  $\sim 100\text{-}150$  m en el sur a  $\sim 300\text{-}500$  m en el extremo más norteño. Lo mismo indica una expansión de la ZLO en el norte, debido a la mayor concentración de OD en la columna de agua en comparación con la zona sur frente a la punta de la península. Adicionalmente, la isolínea de  $5 \mu\text{mol kg}^{-1}$  presenta el mismo comportamiento que la ZLO, con la diferencia de que esta se encuentra únicamente en la región sur de ambos transectos, ubicada entre los 150-200 m de profundidad, con una extensión hasta los  $\sim 26^\circ\text{N}$  en ambos cruceros. Las isolíneas de oxígeno se encuentran más someras en el sur, por lo que se tienen concentraciones  $<60 \mu\text{mol kg}^{-1}$  a partir de los 50 m, indicativo de las

condiciones hipóxicas de la zona, en contraste con la región norte cuya isolínea de oxígeno de  $60 \mu\text{mol kg}^{-1}$  se encuentra a los  $\sim 250$  m.

Finalmente, la  $\pi$  (Fig. 3i y 3j) presentó un incremento de norte a sur, con los mayores valores superficiales ( $\sim 3.5 \text{ kg m}^{-3}$ ) frente a la pPBC y la eGC. La isolínea de  $1 \text{ kg m}^{-3}$  delimitó las aguas superficiales de las subsuperficiales, y denota la intrusión superficial de ACC hacia el sur y la mezcla con el agua cálida y salada del Golfo para dar origen al AT con valores de  $\pi \sim 2 \text{ kg m}^{-3}$ . La extensión de  $\pi$  con valores  $< 1$  desde el norte hasta el sur, debajo de los  $\sim 250$  m, es referente al AIP, la cual mostró valores bajos de temperatura y salinidad ( $\Theta = 4\text{-}9^\circ\text{C}$ ,  $S_A = 34.6\text{-}34.9 \text{ g kg}^{-1}$ ). En ambos cruceros, fue posible observar una lengüeta de agua con  $\pi > 1$  entre  $\sim 150$  y  $250$  m, en medio del ACC (superficial) y el AIP (intermedia) con valores menores a  $1 \text{ kg m}^{-3}$ . Esta lengüeta corresponde al ASsSt con distribución en dirección norte a través de la CU y puede seguirse con las isolíneas de  $0.5$  y  $0.3 \text{ kg m}^{-3}$ , debido a que el ASsSt pierde progresivamente sus características de valores altos de  $\pi$  conforme incursiona al norte (pierde temperatura). Lo mencionado anteriormente se observa también con el ACC y el AIP, pues al incursionar al sur aumentan progresivamente su temperatura y, por ende, su valor de  $\pi$ .

Para facilitar el análisis de la distribución de las masas de agua en toda la columna de agua, se presentan los resultados de las propiedades físicas y químicas respecto a superficies de densidad potencial ( $\sigma_\Theta$ ). Esto se logró mediante interpolaciones lineales de las propiedades ( $S_A$ ,  $\Theta$ ,  $OD$ ,  $\pi$ ) sobre la  $\sigma_\Theta$ . Para el caso del crucero W-F, existe una expansión del agua deficiente de oxígeno, y de propiedades físicas, hacia el sur del transecto (Fig. 4). Se observa que las densidades más altas en superficie ( $\sim 25.6 \text{ kg m}^{-3}$ ) ocurrieron en la parte más al norte y las más bajas al sur ( $\sim 24.4 \text{ kg m}^{-3}$ ). La distribución de la  $S_A$  sobre  $\sigma_\Theta$  (Fig. 4a), donde se destaca que las isohalinas tienen una distribución de un flujo aparente hacia el sur del ACC, representado por baja salinidad y delimitado por las isohalinas de  $33.6 \text{ g kg}^{-1}$  (núcleo) y  $34.2 \text{ g kg}^{-1}$  (límite superior). Esta masa de agua interrumpe su distribución a los  $\sim 23.2^\circ\text{N}$  al interactuar con aguas de mayor salinidad, como el AGC y el ASsSt ( $S_A > 35 \text{ g kg}^{-1}$  y  $> 34.6 \text{ g kg}^{-1}$ , respectivamente), entre las isopícnas de  $\sim 24.5$  y  $26 \text{ kg m}^{-3}$ . El núcleo del AGC se encuentra únicamente en la parte sur ( $\sim 23.2\text{-}25^\circ\text{N}$ ), entre las isopícnas de  $\sim 24.5$  y  $25.5 \text{ kg m}^{-3}$ , donde interactúa con el ACC para formar AT. Se

observa la distribución del ASsSt hacia el norte mediante una lengüeta con  $S_A \geq 34.6$   $\text{g kg}^{-1}$  en sentido contrario al ACC, entre las isopícnas de 26 y 27  $\text{kg m}^{-3}$  y hasta los  $\sim 27^\circ\text{N}$ , lo que sugiere un flujo relacionado con la CU durante el periodo de invierno.



**Figura 4.** Distribución de (A) Salinidad Absoluta ( $S_A$ ;  $\text{g kg}^{-1}$ ), (B) Temperatura Conservativa ( $\Theta$ ;  $^\circ\text{C}$ ), (C) Oxígeno Disuelto (OD;  $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) y (D) spiciness ( $\pi$ ;  $\text{kg m}^{-3}$ ) sobre superficies de densidad potencial ( $\sigma_\Theta$ ;  $\text{kg m}^{-3}$ ), para los lances realizados frente a las costas del sur de California y de la PBC para el crucero Western Flyer (Febrero, 2012).

El comportamiento de  $\Theta$  sobre  $\sigma_\Theta$  (Fig. 4b) mostró un patrón típico de altas temperaturas en la capa superficial y un descenso progresivo conforme aumenta la  $\sigma_\Theta$ , lo que sugiere que la  $\Theta$  predomina sobre la  $S_A$  para controlar la densidad. La isoterma de  $16^\circ\text{C}$  presentó un hundimiento desde la superficie hasta los  $25.5 \text{ kg m}^{-3}$  en el extremo sur del transecto, asociado a la presencia de una capa de agua cálida procedente del sur ( $>20^\circ\text{C}$ ), mientras que en latitudes norteñas su distribución más somera se asocia a las características del ACC. Por otro lado, la isoterma de  $10^\circ\text{C}$  presentó también un hundimiento, con menor densidad ( $\sim 25.8\text{-}26 \text{ kg m}^{-3}$ ) en la región norte y se continuó sobre la isopícna de  $\sim 26.5 \text{ kg m}^{-3}$  en el sur. Esto indica una mayor cantidad de agua relativamente fría en el norte en comparación de su contraparte sureña debido a la diferencia de masas de agua en ambas zonas.

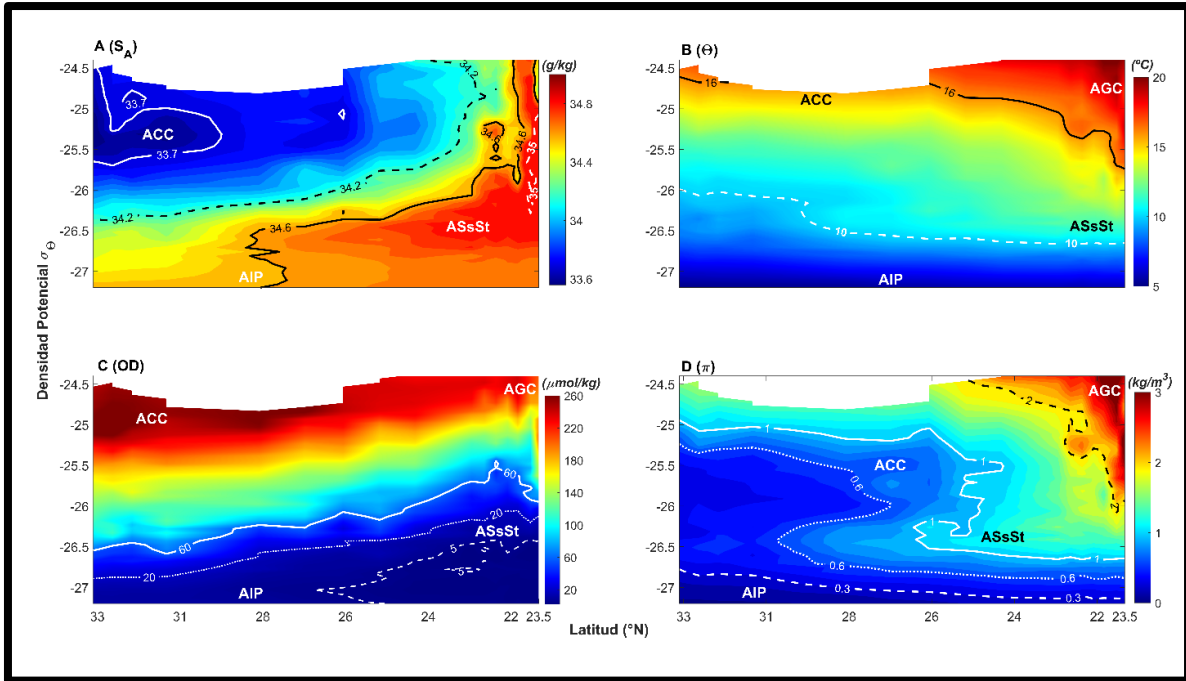
El OD (Fig. 4c) presentó altas concentraciones ( $>200 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) en la capa superficial a lo largo de todo el transecto, para  $\sigma_\Theta < 25.4$  ( $<24.5 \text{ kg m}^{-3}$ ) en el norte (sur). Sin embargo, en la región norte, la capa con valores de  $\text{OD} > 100 \mu\text{mol kg}^{-1}$  se

encuentra sobre la superficie de  $\sigma_\theta \sim 26 \text{ kg m}^{-3}$ , en comparación con el extremo sur donde se extiende hasta  $\sigma_\theta \sim 25.5 \text{ kg m}^{-3}$ . Esto es debido al origen de las masas de agua dominantes, pues afecta a la solubilidad del oxígeno. Las isolíneas de 60 y 20  $\mu\text{mol kg}^{-1}$  indican el límite superior e inferior de la ZLO (Gilly *et al.*, 2013). Esta ZLO se encuentra en aguas menos densas en la zona sur ( $\sim 25.7\text{-}26.2 \text{ kg m}^{-3}$ ) que, en el norte, donde la capa se hundió hasta  $\sim 26.5\text{-}27 \text{ kg m}^{-3}$ , lo que sugiere una mayor influencia del ASsSt en la región sureña. Esta ZLO es muy estrecha a lo largo de todo el transecto a excepción de la región norte, donde se demostró una expansión de la misma. Debajo de esta ZLO, la ZMO ( $<20 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) se distribuye con el mismo patrón, con un hundimiento en dirección sur-norte, lo que muestra las condiciones hipóxicas asociadas al ASsSt y un ligero incremento en la concentración de OD conforme se distribuye hacia el polo e interactúa con el extremo norteño del SCC. Así mismo, la isolínea de 5  $\mu\text{mol kg}^{-1}$  se ve limitada a la región sur hasta los  $\sim 26^\circ\text{N}$ , que define las condiciones anóxicas del sur del transecto entre los  $\sim 26.5$  y  $>27 \text{ kg m}^{-3}$  entre la zona del ASsSt y el AIP.

La variable  $\pi$  (Fig. 4d) sobre superficies de  $\sigma_\theta$  a lo largo del transecto presentó características más claras de la distribución de las masas de agua. Valores de  $\pi \leq 1 \text{ kg m}^{-3}$  sugieren la distribución del ACC hacia el sur, denotado como un incremento de  $\pi$  en dicha dirección. Este flujo interactúa con el AGC, que presenta valores de  $\pi > 2 \text{ kg m}^{-3}$  a los  $\sim 23^\circ\text{N}$ , donde la mezcla produce AT con valores de  $\pi$  de  $\sim 1.5 \text{ kg m}^{-3}$ . El AGC se localizó únicamente en la parte sur del transecto ( $\sim 23.5^\circ\text{N}$ ), donde la isolínea de 2 se hundió por un incremento en la cantidad de agua cálida y salada. Entre los  $\sim 26$  y  $27 \text{ kg m}^{-3}$  se muestra una lengüeta de agua con  $\pi > 1$  en dirección norte, lo que indica el flujo del ASsSt por medio de la CU. Dicho flujo se observa también con las isolíneas de 0.6 y 0.3  $\text{kg m}^{-3}$ , debido a que el ASsSt modifica sus propiedades termohalinas al incursionar hacia el polo e interactuar con el ACC. Debajo de la isopícnica de  $27 \text{ kg m}^{-3}$ , los valores bajos de  $\pi$  hacen referencia al AIP, con los valores más bajos en el norte que en el sur por la modificación de la misma en su flujo hacia el ecuador. En específico, valores menores a 0.6  $\text{kg m}^{-3}$  son característicos del AIP, debido a que el límite planteado por Durazo y Baumgartner (2002) entre el ASsSt y AIP corresponde al valor de 0.6  $\text{kg m}^{-3}$ .

El crucero P24 (Abril, 2013) mostró un comportamiento general similar al crucero W-F en la distribución de propiedades sobre superficies de  $\sigma_\theta$  (Fig. 5). La  $S_A$  (Fig. 5a) mostró rasgos de la distribución superficial del ACC hacia la zona sur, entre 24.5 y 26.5  $\text{kg m}^{-3}$ , denotado por las isohalinas de 33.7 (núcleo) y 34.2  $\text{g kg}^{-1}$ , donde esta última alcanzó los 22.8°N entre 24.4-25.5  $\text{kg m}^{-3}$ . La  $S_A$  incrementó rápidamente a los ~22°N, pues la isohalina de 34.6  $\text{g kg}^{-1}$  se distribuyó verticalmente entre 24.2-25.8  $\text{kg m}^{-3}$ , y para aguas más densas incursionó hacia el norte. La parte más sureña del transecto (dentro del golfo) se caracterizó por dos núcleos con salinidades de 34.4 (35)  $\text{g kg}^{-1}$  entre 24.3-25  $\text{kg m}^{-3}$  (25.1-25.6  $\text{kg m}^{-3}$ ). La mezcla AGC, junto al ACC, da origen al AT con salinidades de entre 34.4 a 34.8  $\text{g kg}^{-1}$  en el extremo sur del transecto. Subsuperficialmente, entre ~26.5-27.3  $\text{kg m}^{-3}$ , se observa la distribución del ASsSt en dirección norte, lo cual se denota por una lengüeta con salinidades >34.6  $\text{g kg}^{-1}$  en sentido opuesto al ACC. Las salinidades disminuyen conforme fluye hacia el norte e interactúa con ACC y aguas intermedias con salinidades menores. En densidades mayores a ~27.3  $\text{kg m}^{-3}$  es posible observar levemente el AIP sin variaciones notables de salinidad, a excepción de un ligero aumento en dirección norte-sur, posiblemente por la interacción y presencia de aguas subtropicales.

El patrón de isotermas mostró aguas cálidas en la capa superficial, con una disminución progresiva de la temperatura conforme se incrementan los valores de densidad (Fig. 5b). La isoterma de 16°C presentó un hundimiento hacia el sur entre 26.4-23.5°N y densidades entre 24.6-25.7  $\text{kg m}^{-3}$ , debido a la mayor presencia de aguas tropicales frente a la pPBC y la entrada al golfo (Fig. 1b). Este comportamiento fue similar con la isoterma de 10°C, la cual se encuentra a ~26  $\text{kg m}^{-3}$  en la zona más norte y se subduce a partir de los ~29°N, hasta la isopícna de ~27  $\text{kg m}^{-3}$  en la región más sureña. Debajo de los 10°C, la temperatura no presenta variaciones notables a lo largo del transecto, ya que latitudinalmente se mantiene relativamente homogénea y se asocia al AIP.



**Figura 5.** Distribución de (A) Salinidad Absoluta ( $S_A$ ;  $g\ kg^{-1}$ ), (B) Temperatura Conservativa ( $\Theta$ ;  $^{\circ}C$ ), (C) Oxígeno Disuelto (OD;  $\mu mol\ kg^{-1}$ ) y (D) spiciness ( $\pi$ ;  $kg\ m^{-3}$ ) sobre superficies de densidad potencial ( $\sigma_{\theta}$ ;  $kg\ m^{-3}$ ), para los lances realizados frente a las costas del sur de California y de la PBC para el crucero P24 (Abril, 2013).

En cuanto al OD (Fig. 5c), la mayor concentración ocurrió en las capas superficiales, con valores  $>200\ \mu mol\ kg^{-1}$  para  $\sigma_{\theta} < 25.5\ kg\ m^{-3}$  en la mitad norte del transecto y  $\sigma_{\theta} < 24.8\ kg\ m^{-3}$  en la parte sur. El comportamiento de las isolíneas presentó un levantamiento de las mismas en dirección norte-sur, debido a que la región norte presenta mayor OD por la dominancia de ACC. Este comportamiento coincide para los límites superior e inferior ( $\pi$ ) de la ZLO (Gilly *et al.*, 2013), de 60 y 20  $\mu mol\ kg^{-1}$ , respectivamente, pues esta se encuentra en aguas menos densas en la región sur ( $\sim 25.3\text{-}26.3\ kg\ m^{-3}$ ) que en el norte ( $\sim 25.5\text{-}26.5\ kg\ m^{-3}$ ). Debajo de esta capa, la ZMO se distribuye a lo largo de todo el transecto, con un hundimiento en dirección sur-norte debido al transporte de ASsSt con bajas concentraciones de OD por medio de la CU. La isolínea de 5  $\mu mol\ kg^{-1}$  desaparece en dirección sur-norte hasta los  $\sim 26^{\circ}N$ .

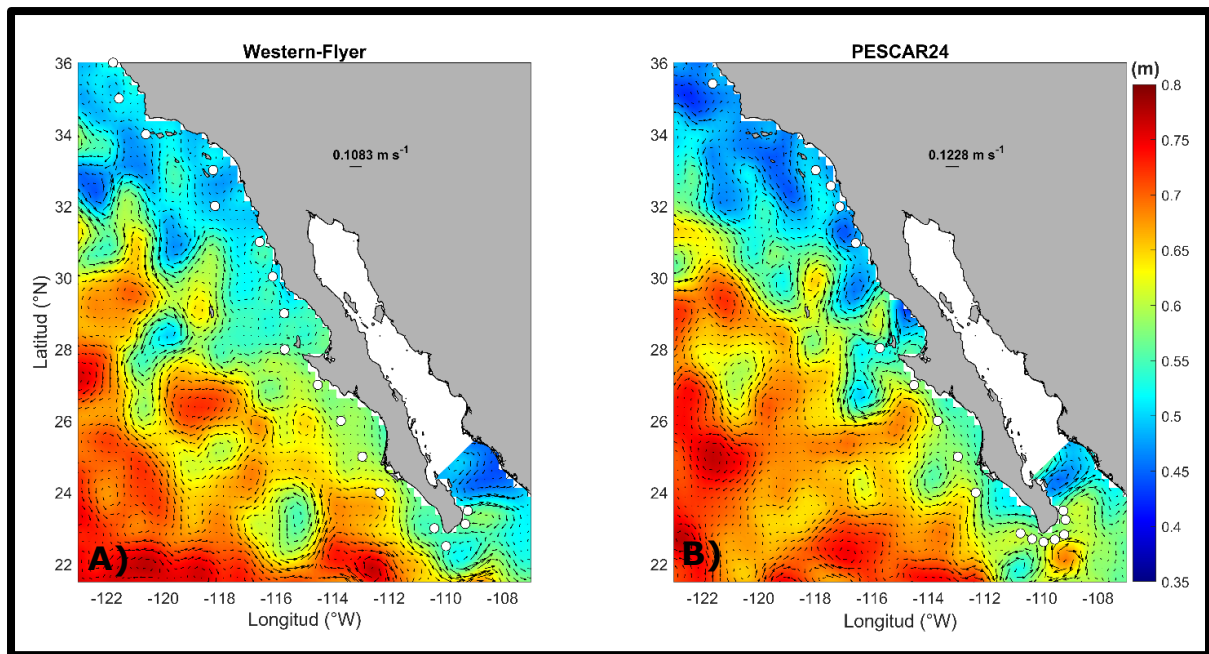
La distribución de  $\pi$  sobre superficies de densidad (Fig. 5d), muestra la distribución del ACC hacia el sur con valores  $\pi < 1\ kg\ m^{-3}$  entre los  $\sim 25$  y  $26\ kg\ m^{-3}$ . En el extremo sur se observan aguas cálidas y saladas del Golfo, denotadas por la isolínea  $>2\ kg\ m^{-3}$ . Dicha masa de agua interactúa con el ACC para formar un AT con

valores de entre 1 y 1.5 kg m<sup>-3</sup>. En la capa subsuperficial, la distribución de  $\pi > 1$  sugiere el flujo de la CU con ASsSt con a lo largo de la isopícna de ~26.5-27 kg m<sup>-3</sup> hacia el norte y su posterior interacción (mezcla) con agua subártica intermedia norteña, como lo muestra la isolínea de 0.6 kg m<sup>-3</sup>. Debajo de la isopícna de 27 kg m<sup>-3</sup>, el AIP no presentó variaciones notables en la columna de agua, con valores de  $\pi$  menores a 1 kg m<sup>-3</sup>, con un leve incremento norte-sur denotado por el hundimiento de las isolíneas de 0.3 y 0.6 kg m<sup>-3</sup> en dicho sentido. Esta última isolínea (0.6 kg m<sup>-3</sup>), define el límite entre ASsSt y el AIP de acuerdo a [Durazo y Baumgartner \(2002\)](#), donde el AIP posee valores de  $\pi$  menores a 0.6 kg m<sup>-3</sup>.

## **3.2 Distribución de las corrientes frente a las costas del sur de California y península de Baja California**

### **3.2.1 Corrientes geostróficas superficiales**

La circulación superficial en la región de estudio se analizó mediante la Topografía Dinámica Absoluta (TDA), la cual fue promediada para el período de cada uno de los cruceros, para posteriormente obtener las corrientes geostróficas superficiales asociadas (Fig. 6). La TDA presentó valores que fluctuaron entre 0.35 y 0.8 m, con una tendencia de valores más bajos hacia la zona costera y los más altos se distribuyeron hacia la región oceánica adyacente. En ambos períodos se observó una gran cantidad de estructuras de mesoescala como meandros y remolinos, además del flujo de la CC hacia el sureste, que parece “zigzaguear” a través de dichas estructuras y puede ser detectada hasta la pPBC. Esto último fue relacionado con el BTCC. Cabe mencionar que las velocidades geostróficas no corresponden como tal a las condiciones de muestreo, sino un aproximado de reanálisis que nos permite dar una idea y observar las estructuras presentes en la región.



**Figura 6.** Topografía Dinámica Absoluta (TDA, m) del reanálisis *Copernicus* promediada para los días de los cruceros oceanográficos W-F y P24. Los vectores indican las corrientes geostróficas superficiales ( $\text{m s}^{-1}$ ) asociadas a la TDA. Los puntos blancos indican las estaciones muestreadas por cada respectivo crucero.

En el periodo del crucero W-F la TDA se caracterizó por dos zonas contrastantes separadas por la región de Punta Eugenia (PEu;  $\sim 28^\circ\text{N}$ ). Al norte de esta, la TDA fluctuó entre los 0.5 y 0.55 m a lo largo de la zona costera y oceánica, con excepción de una estructura entre los  $28$  y  $32^\circ\text{N}$  al oeste de  $118^\circ\text{W}$  cuya TDA fue superior ( $\sim 0.6$ - $0.65$  m) al presentar una circulación anticiclónica con velocidades entre  $0.15$ - $0.25 \text{ m s}^{-1}$ . También se observó un remolino ciclónico ( $122^\circ\text{W}$ ;  $\sim 32$ - $33^\circ\text{N}$ ) con velocidades bajas en su centro y  $\sim 0.15 \text{ m s}^{-1}$  en su periferia. Al sur de PEu, la TDA cerca de la costa y oceánica fue mayor, con valores de  $\sim 0.6$  y  $\sim 0.7$  m, respectivamente. La zona costera se caracterizó por un flujo de la CC hacia el sur asociado al BTCC, el cual mostró una circulación en forma de “zigzagueo” por la interacción con la periferia entre remolinos ciclónicos y anticiclónicos con velocidades de  $0.15 \text{ m s}^{-1}$ . Al sur de  $24^\circ\text{N}$  el flujo se acercó más a la costa, a  $\sim 111^\circ\text{W}$ - $22^\circ\text{N}$ , viró ciclónicamente hacia el este y alrededor de  $108.3^\circ\text{W}$  giró hacia el sur. Note que frente a la pPBC se detectaron dos remolinos, uno ciclónico (anticiclónico) con TDA de  $\sim 0.5$  m ( $\sim 0.6$  m), respectivamente. Estos remolinos causaron en parte el desvío del BTCC fuera de la zona costera, que rodeó el remolino ciclónico, mientras que en la zona de la entrada al golfo ( $\sim 23^\circ\text{N}$ ), el remolino anticiclónico interactuó con el flujo de salida de aguas del interior del golfo. La contraparte oceánica del sur de PEu se vió

caracterizada por los mayores valores de TDA, así como la presencia de los remolinos, tanto ciclónicos como anticiclónicos más grandes del periodo de muestreo. Se detectaron estructuras anticiclónicas con TDA de  $\sim 0.8$  m desde al oeste  $\sim 112^\circ\text{W}$  y entre los  $\sim 21$ - $23^\circ\text{N}$ , así como un remolino anticiclónico entre los  $26$ - $28^\circ\text{N}$  con las mismas características de TDA. Igualmente, entre  $\sim 114$  y  $\sim 116^\circ\text{W}$  y  $\sim 22$  y  $\sim 24^\circ\text{N}$  se identificó un remolino de tipo ciclónico con magnitudes de hasta  $0.3 \text{ m s}^{-1}$  ( $0.1 \text{ m s}^{-1}$ ) en su periferia (centro). Independientemente de la presencia de estructuras de mesoescala y meandros, el flujo neto de la CC fue en dirección sur hasta la pPBC y una posterior interacción con la eGC.

El crucero P24 también mostró rasgos similares en las dos regiones, al norte y sur de PEu con menor ( $\sim 0.45$ - $0.5$  m) y mayor ( $\sim 0.5$ - $0.55$  m) TDA, respectivamente. Sin embargo, la zona al norte de PEu mostró una mayor cantidad de estructuras de mesoescala en la zona costera que en el crucero W-F. Entre  $\sim 116$ - $119^\circ\text{W}$  y  $\sim 28$ - $31^\circ\text{N}$  se presentaron dos remolinos anticiclónicos separados por un remolino ciclónico, todos con velocidades de hasta  $0.3 \text{ m s}^{-1}$  en sus periferias. Hacia el norte, la región fue dominada por valores de TDA de  $0.5$  m, donde los valores más bajos ( $0.35$  m) se ubicaron al norte de los  $32^\circ\text{N}$ . Este patrón complejo de remolinos ciclónicos costeros y anticiclónicos causó un “zigzagueo” en el flujo de la CC hacia el sur, que, si bien el flujo principal hasta PEu se mantuvo hacia latitudes sureñas como parte del BTCC, esta se desplazó dentro y fuera de la zona costera por la interacción con dichas estructuras de mesoescala. Por otro lado, al sur de PEu dominó la capa superficial con mayor TDA, principalmente en la zona costera. Frente a PEu,  $\sim 116$ - $118^\circ\text{W}$  y  $\sim 26$ - $28^\circ\text{N}$ , se observa la presencia de un remolino ciclónico con velocidades de hasta  $0.3 \text{ m s}^{-1}$  en la periferia de su extremo sur. El flujo del BTCC continuó a lo largo de su contorno hacia el sur cerca de la zona costera. El BTCC siguió con el “zigzagueo” por la presencia de meandros costeros y estructuras anticiclónicas y ciclónicas hasta la pPBC, donde parece se discontinuó por la presencia de dos remolinos: uno ciclónico ( $\sim 0.5$  m) y otro anticiclónico ( $\sim 0.65$  m) a los  $\sim 111$  y  $\sim 109^\circ\text{W}$  y con velocidades en sus periferias de  $\sim 0.2$  y  $\sim 0.15 \text{ m s}^{-1}$ , respectivamente. Parte del BTCC fluyó cerca de la península para ingresar a la zona de la entrada al Golfo por el extremo oeste y posteriormente formar parte de un meandro con circulación anticiclónica (TDA  $\sim 0.2$  m) que continuó hacia el sureste cerca de la plataforma de Sinaloa. Los rasgos de la corriente en la contraparte oceánica al sur de PEu presentó valores promedio de TDA de  $\sim 0.65$  m con una gran (aunque menor que en W-F) cantidad de estructuras de

mesoescala. Destaca un remolino anticiclónico entre  $\sim 116-118^{\circ}\text{W}$  y  $\sim 22-24^{\circ}\text{N}$ , así como dos más unidos entre  $\sim 119-123^{\circ}\text{W}$  y  $\sim 24-27^{\circ}\text{N}$  con valores de TDA de 0.8 m y velocidades de  $\sim 0.15 \text{ m s}^{-1}$  en su periferia. Igualmente, la parte oceánica presentó pocos remolinos ciclónicos, donde uno de los más grandes consta de una estructura en forma de “Y” entre los  $\sim 120-122^{\circ}\text{W}$  y  $\sim 26-28^{\circ}\text{N}$  con TDA (velocidades) de  $\sim 0.6 \text{ m}$  ( $\sim 0.2 \text{ m s}^{-1}$  en su periferia oeste).

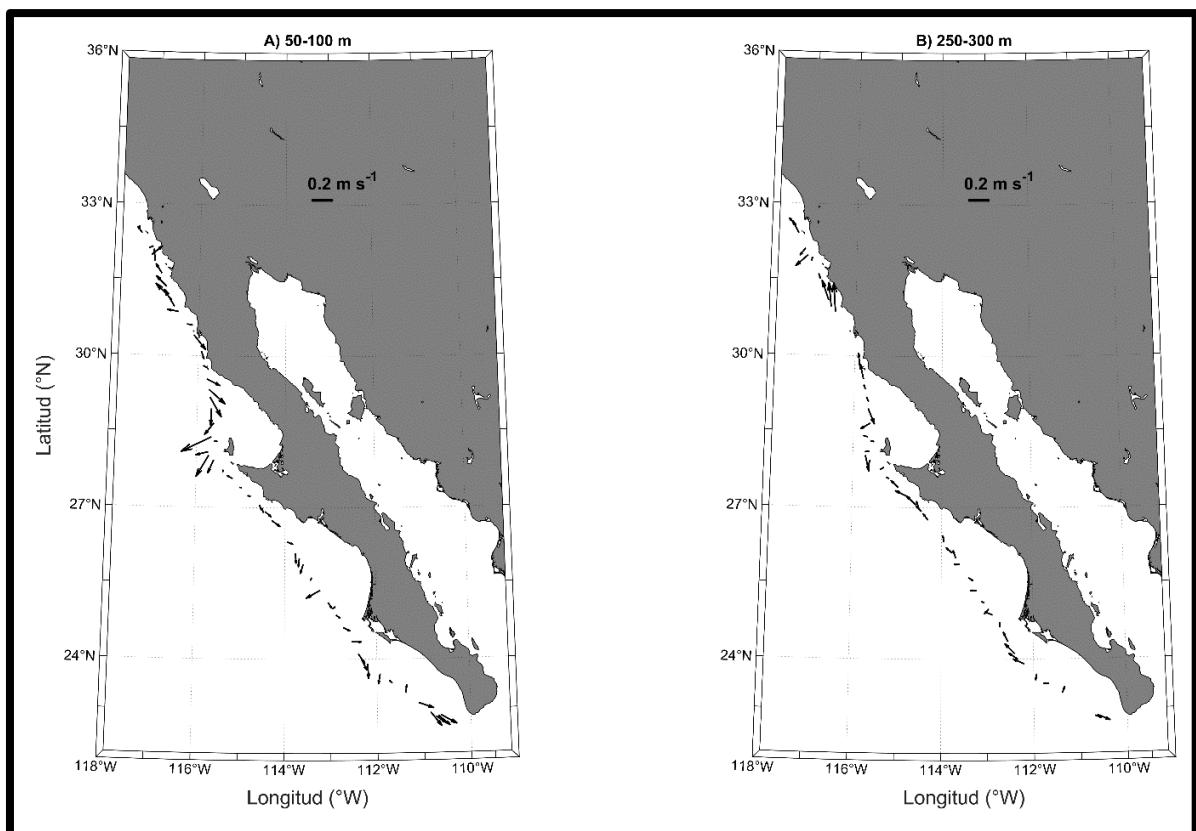
En ambos casos, la dinámica oceánica está dominada por estructuras de mesoescala que modifican el flujo/trayectoria de la CC, aunque independientemente esta última posee un flujo neto hacia el sur. De forma complementaria, en ambos cruceros se registraron valores bajos de TDA en la eGC ( $\sim 0.5-0.55 \text{ m}$ ), mismo que probablemente se encuentre relacionado con el intercambio de aguas con el Pacífico, así como la interacción con los vientos asociados al CAPN en ambos periodos.

### **3.2.2 Corrientes medidas con ADCP**

El comportamiento de la distribución de las propiedades físicas y químicas (Figs. 3-5), sugirió ciertas características de las corrientes en la columna frente a las costas del sur de California y la PBC. Con el propósito de observar dichos rasgos en las corrientes, se graficaron vectores de la velocidad medidas con el SADCP-LADCP con el derrotero del crucero P24. Para esto, se obtuvo el promedio de las corrientes en capas de profundidad. Para detectar la CC (Fig. 7a) se promedió debajo de la capa de Ekman (Kämpf y Chapman, 2016) entre 50-100 m de profundidad, mientras que para detectar la presencia del flujo de la CU se promedió entre los 250-300 m de profundidad (Fig. 7b) (López-Avilés, 2024).

Las corrientes en la capa entre 50-100 m muestran claramente rasgos del flujo de la CC hacia sur a partir de los  $30^{\circ}\text{N}$  hasta la pPBC (Fig. 7a). A la altura de PEu, una parte de la CC fluye hacia el oeste con velocidades  $>20 \text{ cm s}^{-1}$ , mientras que la otra parte continúa hacia latitudes tropicales como parte del BTCC. La velocidad promedio de la CC a estas profundidades es menor a los  $20 \text{ cm s}^{-1}$ , a excepción de ciertos puntos al norte de PEu donde la magnitud de la corriente aumenta levemente. Para latitudes  $>30^{\circ}\text{N}$  las corrientes mostraron un contraflujo de la CC hacia el norte, posiblemente asociado al SCBE que recircula parte de la CC en forma ciclónica y genera una contracorriente hacia latitudes mayores (Kämpf y Chapman, 2016). A

pesar de que el flujo de la CC fue predominantemente hacia el sur, en ciertas regiones, principalmente al sur de PEu, los vectores de corrientes tienen direcciones hacia el este y oeste, lo que podría ser causado por la interacción con estructuras de mesoescala presentes en la zona (ver Fig. 8a). Por otro lado, la contraparte subsuperficial entre 250-300 m (Fig. 7b), mostró un comportamiento predominantemente opuesto, con la mayor cantidad de vectores que indican un flujo hacia el norte. Esto se relacionó con el flujo hacia el polo de la CU que acarrea ASsSt (Figs.3c-d, 4a-5a). Algunos vectores, como aquellos en la punta de la península a la altura de PEu y a los  $\sim 32^\circ\text{N}$  poseen un flujo contrario (hacia el sur) o hacia el este u oeste, mismo que puede ser asociado a estructuras de mesocala presentes a lo largo del transecto (ver Fig. 8b). Las corrientes de esta capa son débiles, menores a  $20\text{ cm s}^{-1}$  en la mayor parte del recorrido a excepción de aquellas reportadas al norte de  $30^\circ\text{N}$ , donde se resalta el flujo con velocidades iguales o mayores.



**Figura 7.** Mapa de corrientes medidas con el SADCP-LADCP durante el crucero P24 promediadas entre: (A) 50-100 m de profundidad y (B) entre 250-300 m de profundidad para la región oeste de la PBC. La longitud de la flecha indica la magnitud de la corriente y la orientación de la punta su dirección.

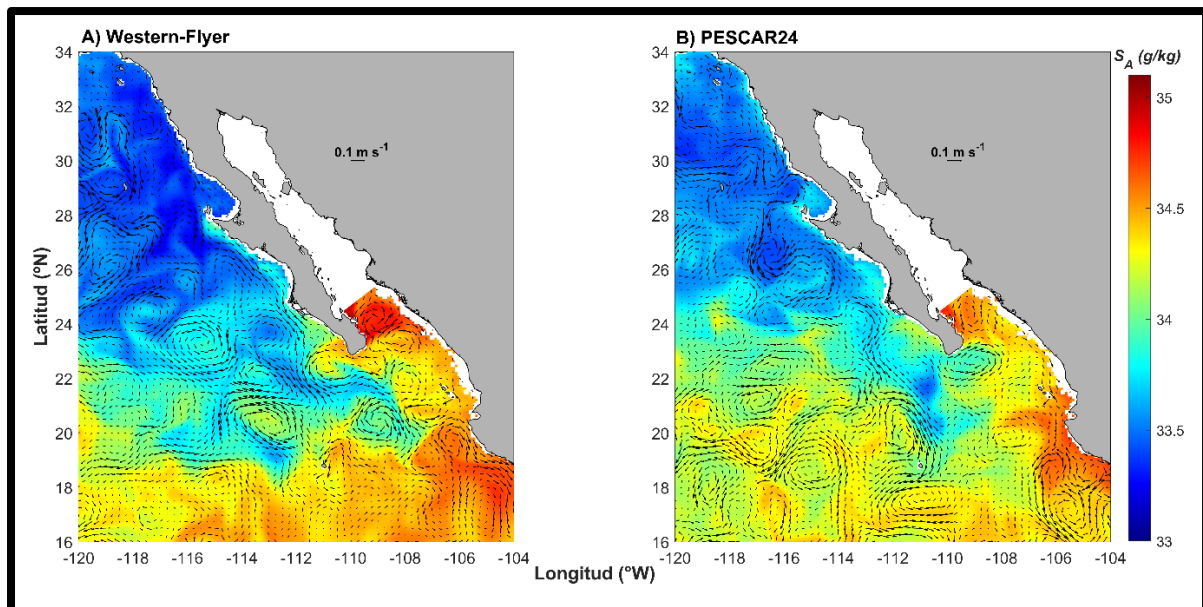
### **3.2.3 Distribución de las corrientes y la salinidad a través de reanálisis Copernicus (Capas entre 50-100 m y 250-300 m)**

Para complementar los rasgos asociados a la distribución de las propiedades del agua (Figs. 3-5), así como de las corrientes observadas (Fig. 8), se extrajeron datos de salinidad y de las componentes de velocidad provenientes del reanálisis Copernicus (ver método), para los días de cada crucero. Se consideraron promedios en la capa de 50-100 m (250-300 m) para ver detalles del flujo de la CC (CU).

La distribución de las corrientes de reanálisis durante febrero de 2012 (W-F; Fig. 8a) mostró una fuerte intrusión de la CC a lo largo de toda la zona costera y oceánica hasta latitudes tropicales ( $\sim 19^{\circ}\text{N}$ ), denotado por aguas con baja  $S_A$  ( $< 34 \text{ g kg}^{-1}$ ) desde latitudes norteñas hacia el sur, indicado también por la dirección de los vectores de velocidad. El núcleo de la CC se extendió desde los  $34^{\circ}\text{N}$  hasta los  $\sim 24^{\circ}\text{N}$ , observable por valores de salinidad de  $\sim 33\text{-}33.5 \text{ g kg}^{-1}$ , que pierde sus características subárticas de baja salinidad al incursionar hacia el sur, donde su extremo más sureño ( $\sim 19\text{-}20^{\circ}\text{N}$ ) fluctuó alrededor de  $34 \text{ g kg}^{-1}$ . Latitudinalmente, debajo del flujo de la CC las salinidades aumentan rápidamente hacia valores por encima de  $\sim 34.3$  y hasta  $35 \text{ g kg}^{-1}$  en la eGC, referente a la presencia de AGC que fluye hacia el exterior del mismo. La presencia de estas rápidas diferencias de salinidad es uno de los mecanismos formadores de frentes salinos en la zona de estudio, que a su vez modifica el flujo del agua mediante meandros y/o remolinos de mesoescala. Estos últimos destacan por ser altamente abundantes durante este periodo, pues se distribuyen desde las latitudes más norteñas hasta los  $\sim 19^{\circ}\text{N}$ , mientras que al sur de los  $18^{\circ}\text{N}$  la actividad de mesoescala no fue tan intensa. Destacaron los remolinos y flujos ciclónicos a los  $\sim 116^{\circ}\text{W}\sim 23^{\circ}\text{N}$ ,  $\sim 113^{\circ}\text{W}\sim 21^{\circ}\text{N}$  (con mayor salinidad en el centro que en su periferia),  $\sim 111^{\circ}\text{W}\sim 22^{\circ}\text{N}$ , donde este fluye parte de la CC con dirección al interior del golfo al rodear un centro de mayor salinidad, y un último remolino ciclónico con salinidades de  $35 \text{ g kg}^{-1}$  ubicado en la eGC ( $\sim 109^{\circ}\text{W}$ ,  $\sim 24^{\circ}\text{N}$ ), que define el tipo de intercambio de aguas entre el Océano Pacífico y el Golfo de California. Si bien el flujo dominante de la CC fue en dirección sur, las corrientes mostraron un comportamiento de “zigzagueo” durante su incursión al interactuar con la periferia de los remolinos y estructuras de mesoescala.

La distribución de las corrientes para el reanálisis del crucero P24 (Fig. 8b) también mostró el flujo de la CC hacia el ecuador a lo largo de toda la PBC, con ciertas diferencias de valores de salinidad relativamente mayores (menores) dentro (fuera) del flujo predominante de la CC. La extensión de la CC hacia el sur abarcó entre  $\sim 34\text{-}24^{\circ}\text{N}$ , donde la salinidad aumentó rápidamente de  $\sim 33.5$  a valores mayores que  $34 \text{ g kg}^{-1}$ . Una excepción fue el flujo a lo largo de un meandro estrecho de baja salinidad ( $\sim 33.7 \text{ g kg}^{-1}$ ) que se extendió hasta los  $\sim 19^{\circ}\text{N}$ , con una pérdida gradual de sus características halinas. Parte de este meandro complementó el flujo de la CC hacia la eGC, el cual fue más notable durante este periodo al relacionarse con la presencia de un remolino anticiclónico de salinidad ( $33.9\text{-}34 \text{ g kg}^{-1}$ ) frente a la pPBC ( $\sim 109^{\circ}\text{W}$ ,  $\sim 22.25^{\circ}\text{N}$ ), no presente durante W-F (Fig. 8a). El intercambio entre el Pacífico y el GC fue débil, con la presencia de un remolino ciclónico en la porción sur del golfo, aunque con menores salinidades ( $\sim 34.6 \text{ g kg}^{-1}$ ) que las de invierno (Fig. 8a;  $35 \text{ g kg}^{-1}$ ). La dinámica de mesoescala fue evidente, aunque menor durante este periodo que en W-F (Fig. 8a), además de que en primavera se mostró un aumento de remolinos al sur de  $22^{\circ}\text{N}$ . Sin embargo, uno de los remolinos más notorios registrados fue el ciclónico a los  $\sim 117^{\circ}\text{W}$ ,  $\sim 26^{\circ}\text{N}$  con salinidades de  $33 \text{ g kg}^{-1}$ , que presentó la salinidad más baja registrada durante este crucero. A su vez, este remolino al parecer modificó el flujo de la CC hacia el sur, así como meandros y otros remolinos al norte y sur de este.

En ambos cruceros, las características subárticas de la CC se perdieron rápidamente al llegar a la pPBC, pues su interacción con aguas tropicales y AGC resultó en la formación de AT con salinidades intermedias entre ambas ( $\sim 34\text{-}34.2 \text{ g kg}^{-1}$ ), motivo por el cual no fue tan notable seguir el rastro de la CC en estas latitudes ( $\sim 23^{\circ}\text{N}$ ) por medio de su salinidad.



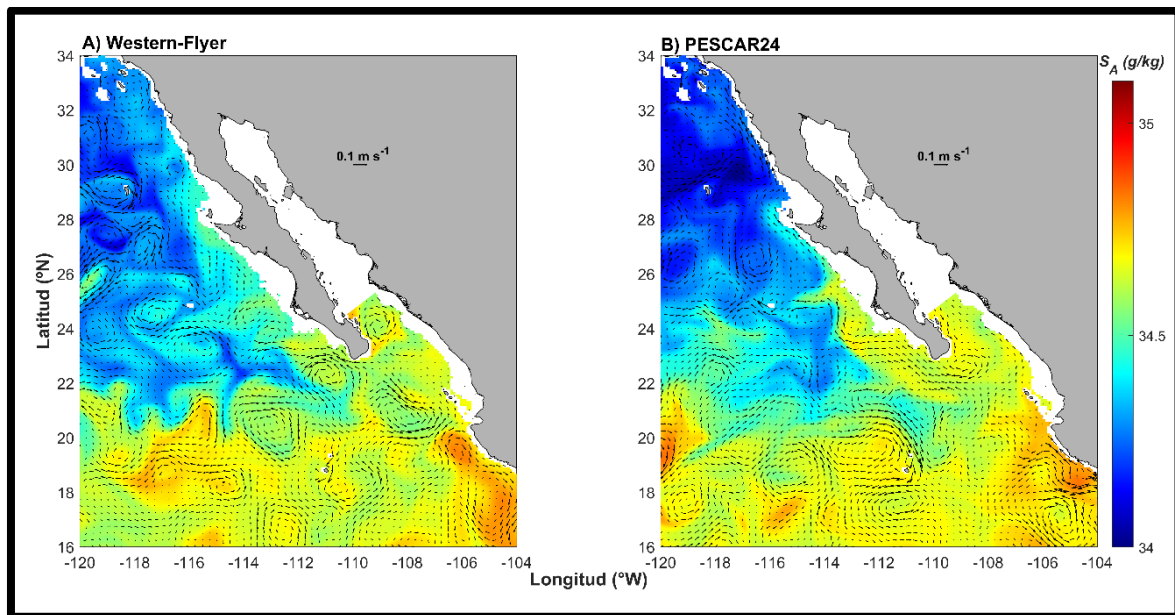
**Figura 8.** Mapa de corrientes y  $S_A$  promediadas en la capa entre 50-100 m de profundidad obtenidas del reanálisis *Copernicus* para W-F (a; 04-13 de febrero, 2012) y P24 (b; 19 abril 04 de mayo, 2013). La escala de colores indica la  $S_A$  ( $\text{g kg}^{-1}$ ) y los vectores la dirección y magnitud de las corrientes ( $\text{m s}^{-1}$ ).

La capa subsuperficial entre 250 y 300 m (Fig. 9) mostró rasgos semejantes en la distribución de  $S_A$  respecto a su contraparte superficial durante el crucero W-F (Fig. 8a). Las menores salinidades se distribuyeron desde los  $34^\circ\text{N}$  hasta los  $21^\circ\text{N}$  con un aumento progresivo hacia el sur, con la diferencia de que los valores más bajos registrados fueron de  $\sim 34 \text{ g kg}^{-1}$  en comparación con los  $33 \text{ g kg}^{-1}$  de la capa superficial (Fig. 8a). Las extensiones de estas bajas salinidades no cruzaron la PBC, ya que no hubo un flujo de la CC en dirección sur, sino que se presentó un flujo hacia el norte a través de la CU con transporte de ASsSt. Esto se observó a través de la dirección de los vectores de las corrientes, los cuales tienen un sentido opuesto a la CC, que indica un transporte hacia el norte desde latitudes más sureñas. Este flujo de la CU al se distribuyó por la periferia de dos remolinos ciclónicos de alta salinidad ( $\sim 34.7 \text{ g kg}^{-1}$ ), uno ubicado en la eGC (que se extendió desde los 50-100 m; Fig. 8a) y otro a los  $\sim 111^\circ\text{W}$   $\sim 22^\circ\text{N}$ , que favorecieron a la CU en su flujo hacia el norte. Sin embargo, entre  $\sim 24$ - $27^\circ\text{N}$  es posible observar ciertos vectores en dirección opuesta (hacia el sur), que puede ser resultado de la interacción con frentes salinos y remolinos presentes en la zona, pues esta capa se vió caracterizada por la abundancia de estructuras de mesoescala (remolinos, frentes y meandros), principalmente en la zona oceánica a lo largo de toda el área estudiada. Algunos de

los remolinos registrados son extensión de aquellos vistos en la capa superficial (Fig. 8a), mientras que otros se registraron únicamente en esta capa. Las mayores salinidades ( $35 \text{ g kg}^{-1}$ ) se observaron frente a las costas de Jalisco ( $\sim 16\text{-}20^\circ\text{N}$ ) como resultado de la interacción de dos remolinos anticiclónicos frente a su zona costera. Durante el período del crucero P24 (Fig. 9b), se presentó un comportamiento más homogéneo del agua norteña de baja salinidad ( $\sim 34 \text{ g kg}^{-1}$ ), ya que se distribuyó en toda la zona (costera y oceánica) hasta los  $\sim 25^\circ\text{N}$ . Las bajas salinidades se interrumpieron hasta los  $19^\circ\text{N}$ , donde el extremo este ( $\sim 110.5^\circ\text{W}$ ) fluyó hacia el sur para mezclarse con un remolino anticiclónico, y la parte oeste fluyó en forma de filamento estrecho hasta los  $\sim 19^\circ\text{N}$  en forma diagonal, con un aumento progresivo de su salinidad. El flujo de la CU en dirección norte fue más evidente y homogéneo por la zona costera por una menor presencia de remolinos, por lo que se puede ver la salida de agua del interior del GC por el extremo oeste del golfo, su reflujó en forma anticiclónica en la pPBC ( $\sim 109^\circ\text{W}$ ,  $\sim 21^\circ\text{N}$ ) y su continuación no interrumpida por la zona costera oeste de la PBC hasta el norte con agua salina ( $\sim 34.6\text{-}34.7 \text{ g kg}^{-1}$ ). A la altura de los  $25^\circ\text{N}$ , parte de la CU (extremo oeste de la corriente) interactúa con el agua de menor salinidad, lo que causa movimiento del ASsSt a lo largo de meandros y frentes, mientras que aquella más apegada a la costa continúa sin modificaciones ni desvíos hacia el norte sobre agua de menor salinidad. Nuevamente, al igual que en W-F (Fig. 9b), las mayores salinidades ( $\sim 34.8 \text{ g kg}^{-1}$ ) se registraron frente a las costas de Jalisco ( $\sim 16\text{-}20^\circ\text{N}$ ), aunque no se observó un flujo anticiclónico, solo un movimiento de las aguas de forma con mayor velocidad en dirección norte.

Las mayores salinidades se registraron en la capa subsuperficial (250-300 m; Fig. 9a y 9b) que sobre la capa superficial (50-100 m; Fig. 8a y 8b), debido a que el núcleo de la CC viaja de forma somera hacia el sur con salinidades de  $33 \text{ g kg}^{-1}$ . En subsuperficie, se observa parte de este núcleo en las regiones más norteñas, aunque con mayor salinidad ( $34 \text{ g kg}^{-1}$ ), debido a que el ACC se puede extender hacia profundidades mayores por estar más cerca de su zona de formación. Es notorio en ambas figuras como esta agua de baja salinidad evoluciona conforme viaja al sur, lo que se refleja como un aumento en la salinidad por la interacción con aguas subtropicales y del GC. Independientemente, es posible observar el flujo de la CC en dirección sur con ACC en las capas superficiales (Fig. 8a y 8b), y el movimiento de la

CU con ASsSt hacia el norte en la parte subsuperficial (Fig. 9a y 9b) así como se registró en las figuras con mediciones *in situ* de ADCP y LADCP de P24 (Figs. 7a-b).



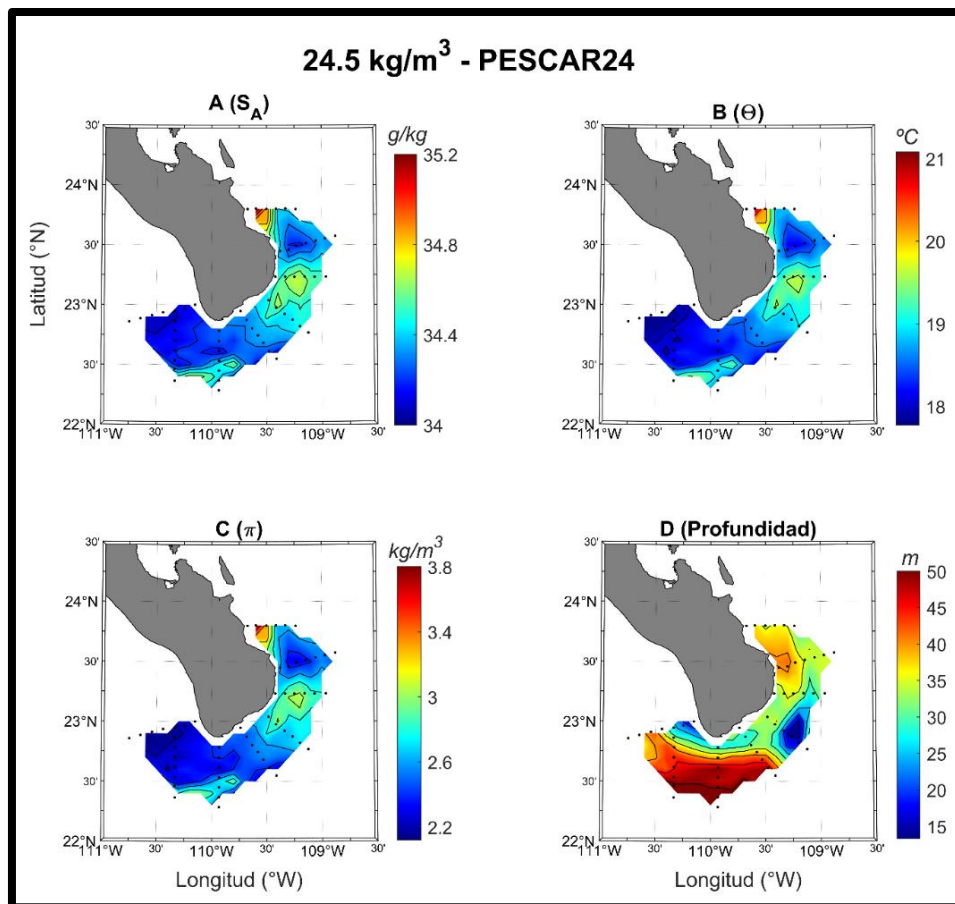
**Figura 9.** Mapa de corrientes y  $S$  promediadas en la capa entre 250-300 m de profundidad obtenidas del reanálisis *Copernicus* para W-F (a; 04-13 de febrero, 2012) y P24 (b; 19 abril 04 de mayo, 2013). La escala de colores indica la  $S_A$  ( $\text{g kg}^{-1}$ ) y los vectores la dirección y magnitud de las corrientes ( $\text{m s}^{-1}$ ).

### 3.3 Distribución de las propiedades físicas sobre las superficies de densidad potencial en las secciones radiales

Para observar detalles en la distribución del flujo relacionado con el BTCC hacia la eGC, se graficaron las propiedades físicas sobre superficies de densidad potencial ( $\sigma_\theta$ ). Para esto, se utilizaron los lances perpendiculares a la costa de forma radial que rodean la punta de la península, desde el golfo hacia el Pacífico, entre 22.25-23.7°N (Figs. 1c, Fig. 10). Solo se consideraron las superficies sobre las isopícnas de 24.5 y 25.25  $\text{kg m}^{-3}$ .

Las distribuciones de  $S_A$ ,  $\Theta$  y  $\pi$  sobre la superficie de  $\sigma_\theta = 24.5 \text{ kg m}^{-3}$  mostraron rasgos similares (Figs. 10a-c). Al este de  $\sim 109.6^\circ\text{W}$  y sur de  $23.5^\circ\text{N}$  se observaron las aguas más salinas ( $\sim 34.7\text{-}35.2 \text{ g kg}^{-1}$ ), cálidas ( $\sim 19.5\text{-}21^\circ\text{C}$ ) y de mayor  $\pi$  ( $\sim 3.2\text{-}3.8 \text{ kg m}^{-3}$ ), mientras que hacia el oeste se registró un comportamiento contrario, salinidades bajas ( $\sim 34\text{-}34.4 \text{ g kg}^{-1}$ ), relativamente más frías ( $\sim 18\text{-}19^\circ\text{C}$ ) y de menor  $\pi$  ( $\sim 2.2\text{-}2.8 \text{ kg m}^{-3}$ ). Lo anterior sugiere la interacción de dos masas de agua; el ACC es

acarreada por el BTCC e incursiona desde el oeste de la PBC hacia la eGC y la distribución del AGC desde el interior del golfo hacia el exterior. Se identificaron dos estructuras con salinidades distintas a las del agua circundante: una localizada a  $\sim 110^{\circ}\text{W}/22.4^{\circ}\text{N}$  con  $S_A \sim 34.5 \text{ g kg}^{-1}$  y  $\Theta \sim 19^{\circ}\text{C}$ , superiores a las del ACC, y otra a los  $109^{\circ}\text{W}, 23.5^{\circ}\text{N}$  con  $S_A \sim 34.7 \text{ g kg}^{-1}$  y  $\Theta \sim 19.5^{\circ}\text{C}$  inferiores a las del AGC (más notorio en el interior del golfo). La variable  $\pi$  (Fig. 10c) resaltó los rasgos de  $\Theta$  y  $S_A$ . El ACC se caracterizó por valores bajos de  $\pi$  ( $< 2.6 \text{ kg m}^{-3}$ ), mientras que el AGC presentó valores elevados ( $> 3.6 \text{ kg m}^{-3}$ ) hacia el interior del golfo. La estructura en  $110^{\circ}\text{W}$  presentó valores relativamente altos ( $\sim 2.8 \text{ kg m}^{-3}$ ), mientras que la situada a los  $109^{\circ}\text{W}$ , valores más bajos de  $\sim 3 \text{ kg m}^{-3}$ , ambos con valores un poco más elevados que las aguas circundantes. Nótese como estas estructuras parecen interrumpir el curso del ACC hacia el interior del golfo, ya que posterior a estos se presentan aguas con las mismas características que el ACC hasta encontrar con el AGC en forma de un cambio brusco de aumento de  $S_A$  y  $\Theta$ .



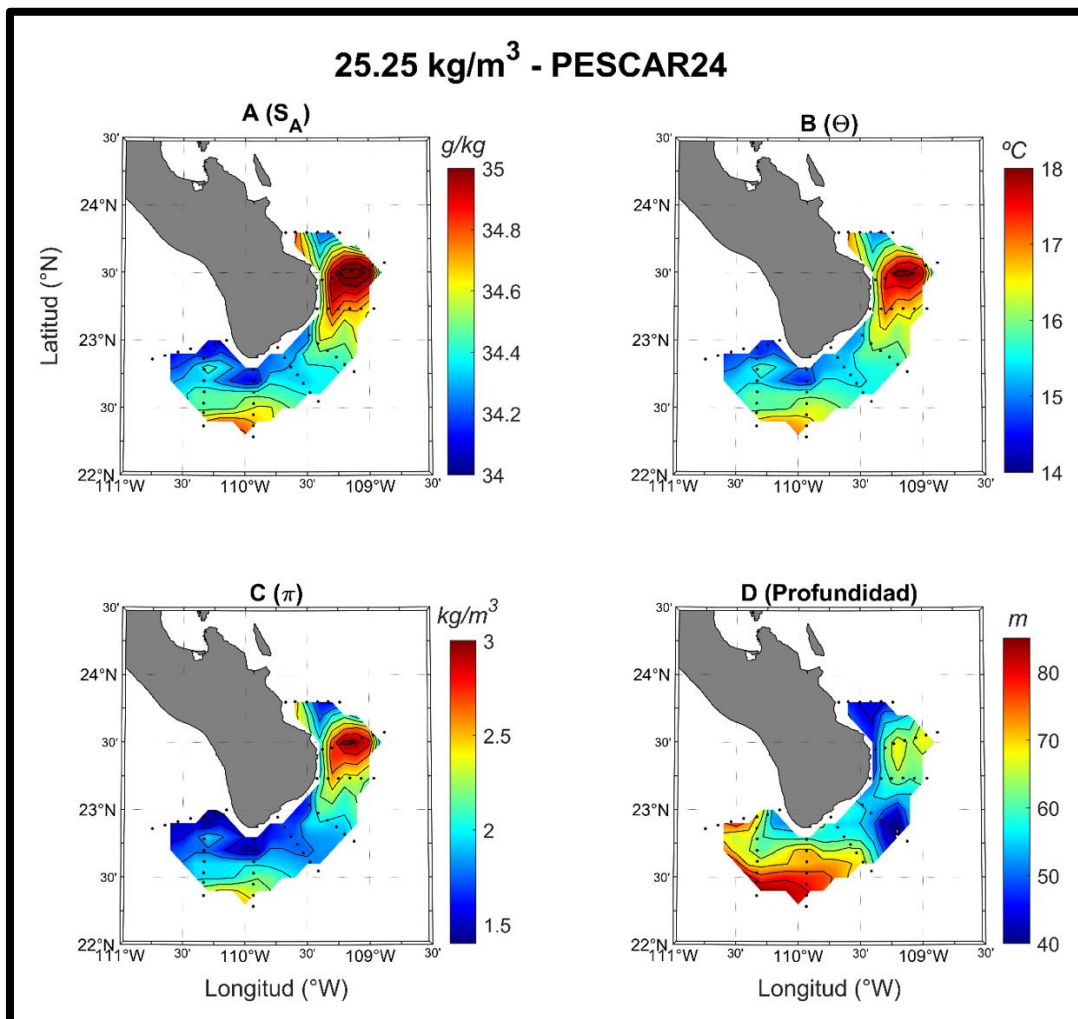
**Figura 10.** Distribución de  $S_A$  ( $\text{g kg}^{-1}$ ) (a),  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) (b),  $\pi$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) (c) y profundidad (m) (d) sobre la isopícna de  $24.5 \text{ kg m}^{-3}$  en la sección radial para el crucero P24. La barra de colores indica el valor asociado a cada variable, mientras que los puntos ubican la posición de los lances (estaciones 14-67).

La superficie de  $24.5 \text{ kg m}^{-3}$  se distribuyó entre los 15 y 50 m de profundidad (Fig. 10d). En la estructura a los  $\sim 109\text{-}109.5^\circ\text{W}$ - $23^\circ\text{N}$  se detectó hasta  $\sim 15$  m, lo que parecería indicar que se trata de un remolino ciclónico frente a la pPBC. Las profundidades disminuyeron también en una región de la zona oeste costera de la PBC, lo que podría indicar un ascenso por interacción con la topografía. Destaca la zona de la estructura ubicada a  $\sim 110^\circ\text{W}$ - $22.4^\circ\text{N}$ , donde la isopícnica se hundió hasta  $\sim 50$  m, lo que indica la posible presencia de un remolino anticiclónico, pues estos tienden a hundir las isopícnicas y a tener un núcleo con  $\Theta$  y  $S_A$  ( $\pi$ ) elevadas en comparación a las aguas circundantes. Note también como este hundimiento hasta  $\sim 50$  m no fue solo en la zona del remolino anticiclónico, sino que abarcó una zona más extensa que incluye el flujo de la CC hacia el este. Al interior del golfo las profundidades volvieron a aumentar, entre 35-40 m, referente a la distribución del AGC.

La distribución de las propiedades termohalinas sobre la isopícnica de  $25.25 \text{ kg m}^{-3}$ , también presentó un comportamiento similar a las observadas sobre la isopícnica de  $24.5 \text{ kg m}^{-3}$  (Fig. 11 a-c). Se observan dos rasgos distintivos en el transecto; al oeste de  $\sim 109.3^\circ\text{W}$  la  $S_A$ ,  $\Theta$  y  $\pi$  presentaron valores relativamente bajos ( $S_A \sim 34\text{-}34.4 \text{ g kg}^{-1}$ ;  $\Theta \sim 14\text{-}16^\circ\text{C}$ ;  $\pi \sim 1.5\text{-}2 \text{ kg m}^{-3}$ ) debido a la presencia del ACC hacia el interior del GC, mientras que al este de la misma longitud se observan valores más altos ( $S_A \sim 34.6\text{-}35 \text{ g kg}^{-1}$ ;  $\Theta \sim 16.5\text{-}18^\circ\text{C}$ ;  $\pi \sim 2.5\text{-}3 \text{ kg m}^{-3}$ ) referentes a la presencia de AGC. Estas observaciones complementan lo descrito para la isopícnica de  $24.5 \text{ kg m}^{-3}$  (Fig. 10), ya que también se denota el flujo del ACC a mayor profundidad, así como una mayor presencia y extensión del AGC sobre esta isopícnica (ver Fig. 10). A los  $110^\circ\text{W}$ , destacan los rasgos de la estructura con flujo aparentemente anticiclónico descrito en la Fig. 10, aunque en esta capa presenta salinidades cercanas a  $35 \text{ g kg}^{-1}$   $\Theta$  de  $\sim 17^\circ\text{C}$  y  $\pi$  de  $\sim 2.5 \text{ kg m}^{-3}$ . Si bien no es posible observar rasgos de un flujo como tal a los  $\sim 109^\circ\text{W}$  mediante las figuras de  $S_A$ ,  $\Theta$  y  $\pi$  para esta capa (Figs. 11 a-c), en la misma posición los valores de  $S_A$ ,  $\Theta$  y  $\pi$  se mantienen bajos ( $S_A \sim 34.3 \text{ g kg}^{-1}$ ;  $\Theta \sim 15.5^\circ\text{C}$ ; y  $\pi \sim 1.7 \text{ kg m}^{-3}$ ), que pareciera indicar la continuación de un núcleo o estructura presente en la isopícnica de  $24.5 \text{ kg m}^{-3}$ .

La profundidad de esta isopícnica (Fig. 11d) presentó tres patrones diferenciados. Al suroeste de la punta de la PBC, el ACC y el remolino anticiclónico

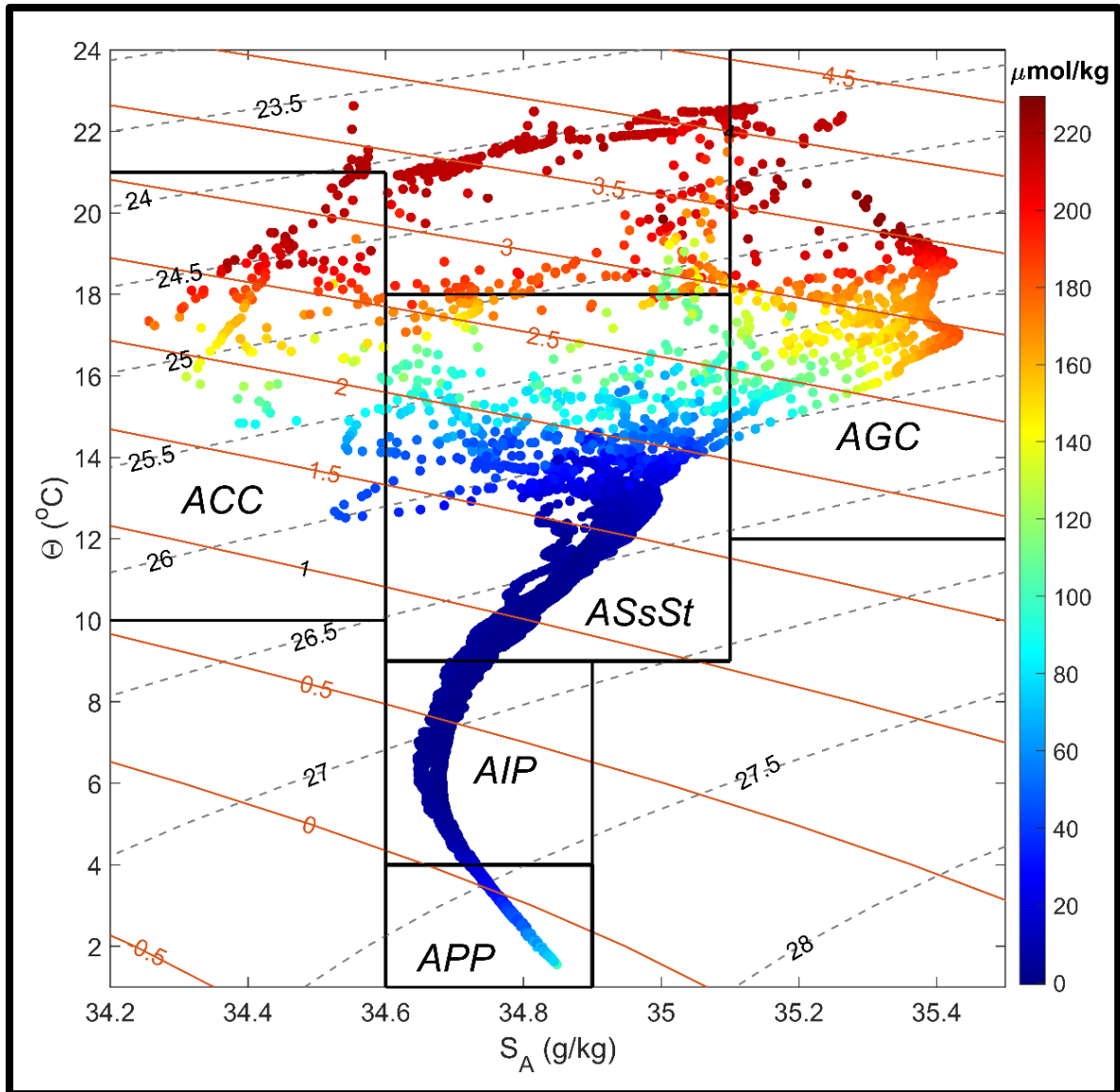
provocaron el hundimiento de la isopícna hasta los 70-80 m. En contraste, en el interior del GC, y en asociación con el AGC, la isopícna se encuentra a profundidades de entre 60 y 65 m. Frente a la PBC, se observa el remolino ciclónico descrito en la figura 10 (ver Fig. 10d) que eleva la isopícna hasta los 40 m. Este remolino también fue identificado previamente por [Larios-Muñiz et al. \(2022\)](#), y su presencia no se evidencia en las figuras de  $S_A$ ,  $\Theta$  y  $\pi$  (Fig. 11 a-c). Por otro lado, en el interior del golfo también se observan profundidades de ~40 m después de la presencia del AGC, mismo que se podría asociar a la entrada de ACC hacia el golfo, ya que además de profundidades más someras (así como se vió en la isopícna de  $24.5 \text{ kg m}^{-3}$ ), la  $S_A$ ,  $\Theta$  y  $\pi$  también disminuyen un poco en este punto, con valores semejantes a los del ACC en el oeste de la PBC en esta isopícna ( $S_A \sim 34.2 \text{ g kg}^{-1}$ ;  $\Theta \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\pi \sim 1.5 \text{ kg m}^{-3}$ ).



**Figura 11.** Distribución de  $S_A$  ( $\text{g kg}^{-1}$ ) (a),  $\Theta$  ( $^\circ\text{C}$ ) (b),  $\pi$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) (c) y profundidad (m) (d) sobre la isopícna de  $25.25 \text{ kg m}^{-3}$  en la sección radial para el crucero P24. La barra de colores indica el valor asociado a cada variable, mientras que los puntos ubican la posición de los lances (estaciones 14-67).

### 3.4 Distribución de propiedades físicas en la sección de la entrada al Golfo de California

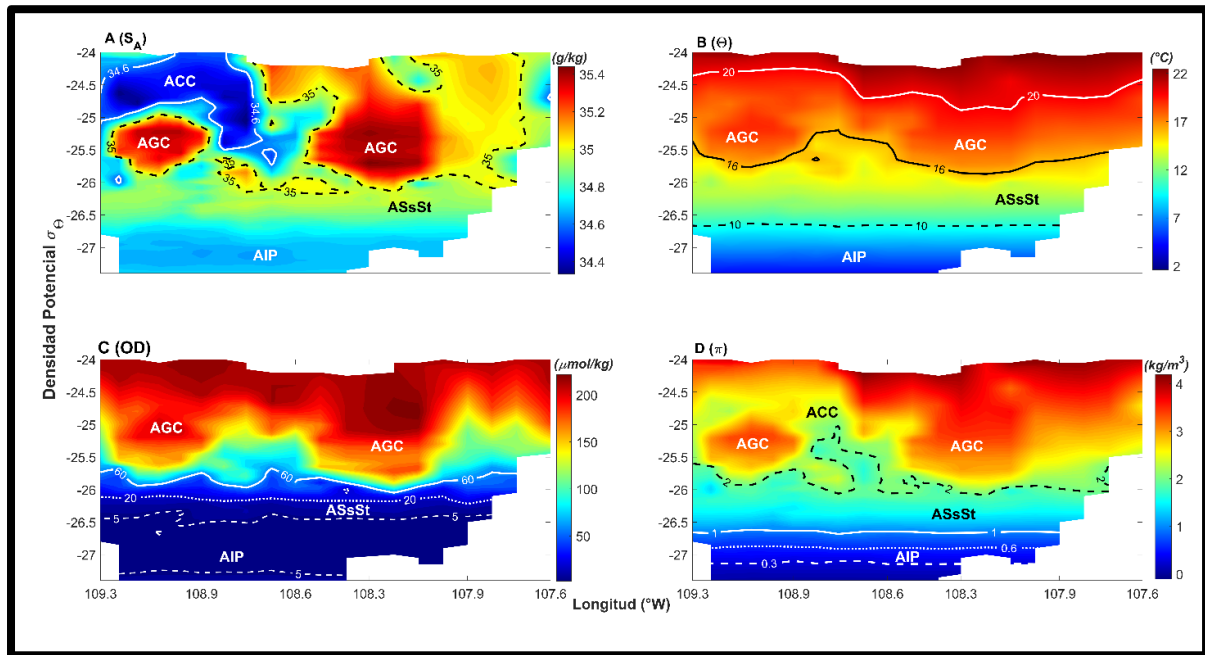
En el diagrama  $\Theta$ - $S_A$  de la sección de la eGC se muestra la presencia de cuatro masas de agua según la clasificación termohalina propuesta por [Portela \*et al.\* \(2016\)](#) (Fig. 12). La capa superficial presentó una gran presencia del AGC y el ACC, ambas con concentraciones de OD que fluctuaron desde 60-70  $\mu\text{mol kg}^{-1}$  sobre la isopícna de  $\sim 26 \text{ kg m}^{-3}$  y concentraciones  $> 200 \mu\text{mol kg}^{-1}$  sobre la isopícna de  $\sim 24.1 \mu\text{mol kg}^{-1}$ , aunque con valores de  $S_A$  altos y bajos, respectivamente. Entre las isopícnas de  $\sim 25$ - $26 \text{ kg m}^{-3}$  también se distribuyó el ASsSt con amplio rango termohalino y OD entre 40-150  $\mu\text{mol kg}^{-1}$ , mientras que, para aguas más densas ( $\sim 26.1$ - $26.7 \text{ kg m}^{-3}$ ), el OD fluctuó entre  $\sim 40$ - $0 \mu\text{mol kg}^{-1}$ . El OD para el AIP fue muy bajo, con valores cercanos a  $0 \mu\text{mol kg}^{-1}$  y temperaturas bajas (4-9 °C). Por último, para aguas más frías (1-4 °C) y con un aumento relativo de  $S_A$ , se detectó el Agua Profunda del Pacífico (APP) ([Castro \*et al.\*, 2017](#)), la cual mostró un leve enriquecimiento de OD ( $\sim 80 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) debido a su origen de rápido hundimiento profundo y a la circulación termohalina. El rango de  $\pi$  varió entre  $\sim -0.27$ -  $0 \text{ kg m}^{-3}$  para el APP, entre 0.1-0.6  $\text{kg m}^{-3}$  para el AIP y fue  $>4 \text{ kg m}^{-3}$  para las aguas más cálidas y saladas del AGC. La isolínea de  $\pi \sim 1.5 \text{ kg m}^{-3}$  dividió la capa superficial de la subsuperficial y profunda, a partir de la cual las propiedades termohalinas comienzan a ser más variables por las características contrastantes de las masas de agua presentes.



**Figura 12.** Diagrama  $\Theta$ - $S_A$  de la entrada del GC para el crucero P24 (2013). La barra de color muestra la concentración de OD. Se emplearon los lances 1-20 (Fig. 1c) y la clasificación de [Portela et al. \(2016\)](#) para la identificación de masas de agua. Las isopícnas negras (café) segmentadas (continuas) indican las isopícnas ( $\pi$ ) con unidades de  $\text{kg m}^{-3}$ .

En la Fig. 13 se presenta la distribución espacial de propiedades sobre la anomalía de densidad potencial ( $\sigma_\theta$ ) para la sección de la eGC. Los rasgos de la distribución de la  $S_A$  revelaron ubicación de las masas de agua (Fig. 13a); dos superficiales y dos subsuperficiales/intermedias. El ACC se distinguió por un núcleo elongado de baja salinidad ( $<34.6 \text{ g kg}^{-1}$ ) ubicado al extremo occidental de la sección, el cual se extendió al oeste de  $\sim 108.65^\circ\text{W}$  y desde la superficie ( $24 \text{ kg m}^{-3}$ ) hasta  $\sigma_\theta = 25.5 \text{ kg m}^{-3}$ . Por su parte, el AGC mostró dos núcleos de alta salinidad ( $>35 \text{ g kg}^{-1}$ ); uno en la parte oeste ( $\sim 109^\circ\text{W}$ ) por debajo del núcleo del ACC entre  $25.1$ - $25.8 \text{ kg m}^{-3}$ , el otro núcleo fue de mayor tamaño ( $\sim 108.1$ - $108.5^\circ\text{W}$ ) y entre  $24.2 < \sigma_\theta < 26 \text{ kg m}^{-3}$ . El ASsSt presentó una distribución más homogénea de salinidad a lo largo del

traveso ( $\sim 34.8 \text{ g kg}^{-1}$ ), entre las isopícnas de  $\sim 26\text{-}26.5 \text{ kg m}^{-3}$ . Así mismo, los rasgos de salinidad del AIP y el APP se presentan como masas de agua más homogéneas a lo largo de la sección con salinidades  $< 34.8 \text{ g kg}^{-1}$  y densidades superiores a  $27 \text{ kg m}^{-3}$ .



**Figura 13.** Secciones transversales de  $S_A$  (a),  $\Theta$  (b), OD (c) y  $\pi$  (d) sobre  $\sigma_\theta$  para la sección de la entrada al Golfo de California del crucero P24 (Fig. 1c; lances 1-20).

La temperatura conservativa ( $\Theta$ ) (Fig. 13b) mostró un patrón en el cual las mayores temperaturas están asociadas a las isopícnas de menor valor y disminuyen gradualmente conforme aumenta la densidad. Sin embargo, el patrón presentó cierta variabilidad a lo largo del transecto, principalmente en la capa de  $\sigma_\theta > 26 \text{ kg m}^{-3}$ , tal como ocurrió con la  $S_A$  (Fig. 13a). La isoterma de  $20^\circ\text{C}$  se hundió en la parte central de la sección y ascendió tanto en la parte occidental como oriental. Por otro lado, la isoterma de  $16^\circ\text{C}$  presentó dos hundimientos hasta la isopícula de  $\sim 25.7 \text{ kg m}^{-3}$  por debajo de los núcleos de alta salinidad. Para densidades entre  $26$  y  $26.5 \text{ kg m}^{-3}$ , el ASsSt no presentó variaciones notables a lo largo del transecto, con temperaturas de  $11\text{-}12^\circ\text{C}$ . Igualmente, la isoterma de  $10^\circ\text{C}$  no presenta variaciones con la densidad en todo el transecto sobre la isopícula de  $\sim 27.3 \text{ kg m}^{-3}$ , lo cual indica la baja variabilidad que presenta el AIP en la zona sur del GC.

El OD (Fig. 13c) muestra sus mayores (menores) concentraciones en las isopícnas de menor (mayor) valor, correspondientes a las masas de agua superficiales (subsuperficiales), comportamiento similar al de la temperatura (Fig. 13b). Los dos núcleos del AGC, identificados previamente, se distinguen por sus elevados valores de OD ( $\sim 150 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ). Debajo de esta capa con alta concentración de OD, la ZLO se presentó como una capa delgada entre  $25.6$  y  $26 \text{ kg m}^{-3}$  en todo el transecto, con ciertos levantamientos y hundimientos del límite superior de la misma ( $60 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ). Por su parte, la ZMO ( $< 60 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) se extendió desde los  $26 \text{ kg m}^{-3}$  hacia densidades de mayor valor, donde la isolínea de  $5 \mu\text{mol kg}^{-1}$  se encuentra a los  $\sim 26.5 \text{ kg m}^{-3}$  en todo el transecto. Debajo de los  $27 \text{ kg m}^{-3}$  ( $\sim 27.4 \text{ kg m}^{-3}$ ), es posible observar nuevamente la isolínea de  $5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ , lo que indica que entre  $\sim 26.5$  y  $\sim 27.4 \text{ kg m}^{-3}$  las concentraciones de OD son menores y, después de  $27.4 \text{ kg m}^{-3}$  vuelven a aumentar levemente por encima del valor de  $5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ .

La variable  $\pi$  (Fig. 13d) evidenció la presencia de los dos núcleos del AGC, denotados por valores de  $\pi > 3$  al ser agua con alta salinidad y temperatura. En este caso, al ser aguas cálidas y saladas, la isolínea de  $2 \text{ kg m}^{-3}$  define el límite entre aguas superficiales y subsuperficiales, donde estas últimas se caracterizan por ser más frías, lo que reduce el valor de  $\pi$ . De forma subsuperficial y profunda, las isolíneas de  $1$ ,  $0.6$  y  $0.3 \text{ kg m}^{-3}$  no presentan variaciones con la densidad a lo largo del transecto, pues se mantienen homogéneas. En específico, la isolínea de  $0.6 \text{ kg m}^{-3}$  define el límite entre el ASsSt y el AIP, donde esta última se encuentra a valores  $< 0.6 \text{ kg m}^{-3}$  tal como fue descrito por [Durazo y Baumgartner \(2002\)](#).

## 4. Discusión

---

- Secciones del Pacífico

- *Diagrama  $\Theta$ - $S_A$*

En este estudio se revisó la variabilidad espacial de una sección frente a las costas del sur de California y Baja California, para esto se utilizaron los lances hidrográficos colectados en dos cruceros oceanográficos W-F (febrero, 2012) y P24 (abril, 2013) (Fig. 1a-b). En el diagrama  $\Theta$ - $S_A$  (Fig. 2) se observa una amplia distribución termohalina y de OD, lo cual se debe a la variación latitudinal de los lances (~22.5-36.7°N). Para identificar las masas de agua se utilizaron dos clasificaciones. En este caso, se consideró la zona geográfica de PEu para distinguir entre los lances norteños y sureños. Para los lances del norte, se utilizó la clasificación reportada en [Kurczyn \*et al.\* \(2019\)](#), ya que en este estudio investigaron las masas de agua en zonas aledañas a la Bahía Todos Santos (31-32°N) y en la línea 100 de IMECOCAL (~31°N). Estos autores usaron el criterio de rangos entre isopícnas para identificar las masas de agua (Fig. 2). Por otro lado, los límites termohalinos de las masas de agua de [Portela \*et al.\* \(2016\)](#) favorecieron la identificación para los lances sureños, ya que estos autores utilizaron datos entre ~10-27.5°N. El aplicar estas dos clasificaciones permitió identificar objetivamente todos los lances y su análisis, ya que de otra forma muchos de estos quedaban fuera de una u otra clasificación. Entonces, al norte de PEu, la influencia del ACC dominó, y hacia el sur, hay una fuerte dominancia de masas de ASsSt, además de AGC hacia la zona de la entrada al golfo. Note que el ASsSt se alcanzó a detectar hasta el sur de California. La separación de rasgos termohalinos al norte y sur de PEu fue reportado también en [Durazo \(2015\)](#) y [Pitz \*et al.\* \(2020\)](#). En este último estudio argumentan sobre características del flujo y de la estructura de la comunidad marina, con Punta Concepción y PEu como zonas de transición. Además, estos dos sitios son zonas de formación de remolinos (Figs. 6 y 8) ([Kurczyn \*et al.\*, 2012](#)).

El OD fue otra variable importante para observar los cambios latitudinales en las masas de agua. Los lances más norteños presentaron mayores concentraciones de OD hasta los ~500 m de profundidad en los límites del AIP, mientras que, en la contraparte sur, los valores altos (~>200  $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) de OD se restringieron entre los

primeros 100-150 m de la columna de agua. En la capa superficial (<50 m) los lances del norte mostraron mayores concentraciones ( $\sim 250 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) que las estaciones del extremo sur ( $>200 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ). Esto posiblemente es debido a los cambios en las propiedades termohalinas del ACC conforme incursiona al sur, pues la ganancia de temperatura conlleva una pérdida de OD, así como su consumo durante el flujo (Gilly *et al.*, 2013; Trucco-Pignata *et al.*, 2019; Larios-Muñiz *et al.*, 2022; López-Avilés *et al.*, 2024). En la zona de estudio, el ASsSt se considera una modificación del agua de los  $13^{\circ}\text{C}$  y es acarreada desde la zona ecuatorial hasta el Pacífico Este a través del Jet Norteño de Tsuchiya y posteriormente hacia el norte a través de la CU (Lavín *et al.*, 2008). Además, es una extensión de la ZMO del Pacífico Tropical Mexicano hasta la CC, con agua hipóxica ( $<20 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) y en mayores profundidades agua subóxica ( $<5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) (Trucco-Pignata *et al.*, 2019; Sánchez-Velazco *et al.*, 2017). La presencia de AGC en el diagrama  $\Theta$ - $S_A$  es resultado de la ubicación de los lances, pues algunos se situaron en la eGC, además de contar con valores de OD elevados por ser una masa de agua superficial (ver Fig. 1).

Por otro lado, la variable  $\pi$ , es una variable de estado que representa las diferencias de temperatura y salinidad a lo largo de contornos de densidad constante, por lo tanto, generalmente es perpendicular al campo de densidad, esto último es más notable en masas de agua con salinidades y temperaturas relativamente bajas (ver Fig. 2) (Durazo y Baumgartner, 2002; Kurczyn *et al.*, 2019). Al ser una combinación de ambas variables, los valores de  $\pi$  se pueden asociar a las características termohalinas de las masas de agua, aguas frías y frescas, como el ACC en los lances más al norte, presenta valores bajos ( $\pi \leq 1 \text{ kg m}^{-3}$ ); aguas cálidas y saladas como el AGC y el ASsSt en la parte sur se caracterizan por valores altos ( $\pi > 1.5 \text{ kg m}^{-3}$ ) (Durazo y Baumgartner, 2002; Kurczyn *et al.*, 2019). El ACC presenta un rango de  $\pi$  entre  $\sim 0.1$ - $3.2 \text{ kg m}^{-3}$  (Fig. 2), debido a que si bien su extremo más norte se caracteriza por valores de temperatura y salinidad bajos, conforme incursiona hacia el sur modifica sus propiedades termohalinas. Lo anterior se denota por un aumento en ambas variables y una pérdida de OD al interactuar con agua salina y cálida del sur, así como por calentamiento por el sol y la evaporación (Durazo y Baumgartner, 2002; Durazo, 2015). Este comportamiento también se observó con el ASsSt (nombrada ASsE en la región más norte por Kurczyn *et al.*, 2019), ya que presenta un proceso

similar pero inverso conforme incursiona al norte y se mezcla con el ACC, pérdida de calor y ganancia de OD al interactuar con masas de agua subárticas.

- *Distribución de propiedades en las secciones transversales*

Las secciones de  $S_A$  y  $\pi$  con respecto a la profundidad (0-500 m) (Fig. 3c-3d; 3i-3j) se complementan con las figuras sobre la distribución de densidad (Figs. 4a-4d; 5a-5d), ya que estas últimas muestran un comportamiento similar pero con mayor detalle de la variabilidad en toda la columna de agua. En ambos cruceros se observó el movimiento hacia el sur de la CC y la incursión de la CU hacia el norte por debajo de los 100-150 m (Figs. 3c-3d), lo cual también fue registrado con ADCP (Figs. 7-8). Sin embargo, el flujo subsuperficial de la CU ha sido poco documentado mediante observaciones. Igualmente, algo interesante es que fue posible observar valores de salinidad altos y bajos asociados a isopícnas de menor o mayor valor (Figs. 4a; 5a), que indica que la densidad en las capas superficiales y subsuperficiales en ambos cruceros se ve dominada por la temperatura. Esto se contrasta con las zonas polares o profundas, donde pequeños cambios en salinidad modifican la densidad (Millero, 2013).

En el crucero W-F (Figs. 3c-4a), la distribución superficial de salinidad asociada al flujo de la CC presentó un asomeramiento de la isohalina de  $34.2 \text{ g kg}^{-1}$  en dirección norte-sur, en parte debido a la interacción subsuperficial con la CU que fluye en dirección norte. Esto se complementa con el diagrama  $\Theta$ - $S_A$  (Fig. 2), que expone la presencia de mayores densidades en el norte ( $< 26 \text{ kg m}^{-3}$ ) que en el sur ( $< 24.5 \text{ kg m}^{-3}$ ), lo que también explica este cambio de profundidad. Es decir, en el norte, la isohalina de  $34.2 \text{ g kg}^{-1}$  se asocia a isopícnas de mayor valor (más profundas) que, en el sur, donde se someriza (menor densidad). Igualmente, la salinidad aumentó hacia el sur ( $\sim 33.5$  a  $\sim 34.2 \text{ g kg}^{-1}$ ) por la interacción con aguas más cálidas y salinas, además de la evaporación y calentamiento solar (Durazo, 2015). Posteriormente, en el extremo sur es evidente la presencia del AGC con salinidades  $> 35 \text{ g kg}^{-1}$  (Portela et al., 2016), que interactúa con el ACC para formar AT. Estas observaciones se complementan con ascensos y descensos de isohalinas a los  $\sim 23^\circ\text{N}$  y  $\sim 27^\circ\text{N}$ , que sugiere la presencia de un remolino ciclónico, aunque no fue detectado en los mapas de reanálisis (Figs. 6a, 8a, 9a) ni en la figura de propiedades sobre profundidad (Fig. 3c).

Debajo de la CC y del AGC, el ASsSt se distribuye hacia el norte por el flujo de la CU indicado por la curvatura de la isohalina de  $34.6 \text{ g kg}^{-1}$  (Durazo, 2015; López-Avilés, 2024). En la zona más profunda ( $\sim 500 \text{ m}$ ), a lo largo de la isopícna de  $27 \text{ kg m}^{-3}$  se observan rasgos del flujo del AIP en dirección sur. Esta masa de agua proviene de Japón como resultado de un mínimo de salinidad vertical en la región de mezcla entre aguas cálidas y saladas de Kuroshio y frescas y frías de Oyashio, mismo que causa una subducción por aumento de densidad entre  $500\text{-}1500 \text{ m}$  (Talley *et al.*, 1995). Dicho proceso es responsable del flujo hacia el ecuador similar a la CC, lo que igualmente causa una ganancia (pérdida) de salinidad (OD) por advección a lo largo de su transporte (Talley, 1993; Talley *et al.*, 1995). Otros autores (You, 2003) indican que el Agua Intermedia del Pacífico Norte (AIPN; NPIW por sus siglas en inglés) tiene su origen en el mar de Okhotsk, el giro subpolar oeste y el Golfo de Alaska durante invierno por difusión vertical, para posteriormente interactuar con la zona de frente subártica-tropical, definir su densidad y transportarse por hundimiento debido a mezcla lateral en forma ciclónica en el Pacífico Norte.

Por su parte, en el crucero P24 (Fig. 5a), la CC alcanzó el extremo sur con una menor presencia de AGC ( $\sim 23.5^\circ\text{N}$ ). La CU también incursiona al norte, pero más estrechamente, entre las isopícnas de  $\sim 26.6\text{-}27 \text{ kg m}^{-3}$  en P24 y  $\sim 26.3\text{-}27 \text{ kg m}^{-3}$  en el W-F. Se denota también el flujo del ASsSt a lo largo de la isohalina de  $34.6 \text{ g kg}^{-1}$ , donde debajo de esta el AIP se distribuye homogéneamente a lo largo de  $\sim 27.25 \text{ kg m}^{-3}$ , algo no tan evidente en W-F. Esto es debido a que el ASsSt se distribuye entre los  $75\text{-}400 \text{ m}$ , mientras el AIP entre  $400\text{-}1000 \text{ m}$ , esto para la región sur de la PBC y la eGC, por lo que su interacción disminuye en densidades mayores a  $27 \text{ kg m}^{-3}$ , correspondientes a profundidades mayores a  $400 \text{ m}$  (Portela *et al.*, 2016).

El comportamiento de la temperatura (Figs. 3a-3b, 4b-5b) registró la presencia de aguas más cálidas en la capa superficial, con un incremento notable conforme incursionan hacia el sur por la interacción con la radiación solar y mezcla con aguas tropicales (Durazo, 2015). La variación en la columna de agua indica una disminución de la temperatura conforme se aumenta la profundidad (densidad), con valores mínimos de  $\sim 5^\circ\text{C}$  a los  $\sim 500 \text{ m}$  ( $\sim 27 \text{ kg m}^{-3}$ ). Note como en el crucero W-F (Fig. 3a) el agua cálida superficial del extremo sur (AGC) fue más cálida que en P24 (Fig. 3b), algo que podría parecer fuera de lo esperado, pues en invierno las temperaturas suelen ser menores que en primavera. De hecho, en invierno es cuando se presentan

las temperaturas y salinidades más bajas, específicamente cercano a la eGC por la mezcla entre ACC y AGC, por lo que lo que se registró representa un comportamiento ligeramente anómalo (Portela *et al.*, 2016; Álvarez-Rodríguez, 2023). Por su parte, la distribución de las isotermas varía notablemente a lo largo del transecto, ya que estas se profundizan en dirección norte-sur. Esto se observa al seguir la isoterma de 10°C (~50-100 m en el norte), que muestra un hundimiento hacia la zona sur del GC. Esto es referente al cambio de dominancia de las masas de agua presentes, pues en el extremo norte del transecto las isotermas se encuentran más someras por la mayor presencia de agua subártica fría, mientras que en las estaciones sureñas descienden por la interacción con AGC y ASsSt, que aumentan la temperatura. Esta pendiente se encuentra más pronunciada en la figura de densidad para P24 (ver Fig. 5b) que en W-F, donde el descenso es progresivo a excepción del extremo sur (al sur de 22.9°N), donde entre los ~13°C se observan ascensos y descensos en forma ondulante, posiblemente asociado a la presencia de estructuras de mesoescala, estos rasgos no fueron detectados en las figuras sobre profundidad. De forma complementaria, el hecho de que la  $\Theta$  disminuya progresivamente conforme aumenta la densidad (profundidad) nos habla de que esta es la variable dominante para definir la densidad, tal como se mencionó en las figuras de salinidad.

El OD (Figs. 3g y 3h; 4c y 5c) mostró patrones distintivos, con concentraciones altas (bajas) en la superficie (profundidad) en ambos cruceros. Su concentración fue mayor en los primeros ~50 m debido al intercambio con la atmósfera, con una diferencia latitudinal, pues los valores más altos se encuentran en el extremo norte de ambos transectos. Esto se debe a la disminución progresiva del OD en el ACC conforme incursiona hacia el sur y a la mayor solubilidad del oxígeno en aguas frías (en este caso, subárticas) (Millero, 2013). Por otro lado, las isolíneas de oxígeno son más someras en el sur en la columna de agua por la presencia de ASsSt, caracterizada por bajos valores de OD (Durazo, 2015; Tetard, 2017). En ambos cruceros, el OD disminuyó súbitamente por debajo de los ~150-200 m (~25.5-26 kg m<sup>-3</sup>), con valores cercanos a los < 5  $\mu\text{mol kg}^{-1}$  entre 450-500 m (~27 kg m<sup>-3</sup>). La isolínea de 60  $\mu\text{mol kg}^{-1}$  marca el inicio de la ZLO (Gilly *et al.*, 2013), que se extiende hasta los 20  $\mu\text{mol kg}^{-1}$  y se encuentra presente en todo el transecto, para ambos cruceros. En el extremo norte de ambos transectos, la ZLO se encuentra más profunda y con un mayor grosor, lo que indica la mayor influencia de agua subártica,

en comparación con las estaciones sureñas, donde el predominio de la ASsSt la vuelve más somera y estrecha. Por su parte, la isolínea de  $20 \mu\text{mol kg}^{-1}$  marca el comienzo de la ZMO (Gilly *et al.*, 2013; Tetard, 2017), presente en ambos cruceros, en toda la zona de estudio. Igualmente, el agua subóxica ( $<5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) (Gilly *et al.*, 2013) se extiende hasta los  $\sim 26^\circ\text{N}$ . A los  $\sim 28^\circ\text{N}$ , el límite inferior de la ZMO se profundiza, más evidente en W-F (Fig. 3g), lo que sugiere la extensión del límite del núcleo del ASsSt y su comienzo de interacción con agua subártica. El agua subóxica no se distribuye uniformemente, ya que esta se encuentra reducida únicamente al extremo sur de ambos cruceros. Un detalle particular es que en W-F, la isolínea de  $60 \mu\text{mol kg}^{-1}$  ascendió en el campo isopícnal, de acuerdo al ascenso de la isohalina de  $34.2 \text{ g kg}^{-1}$  (Fig. 4a). Además, el que la salinidad y oxígeno atraviesen isopícnas puede indicar zonas de mezcla o intercambio de masas de agua al no seguir superficies de densidad constantes. Conocer la extensión de esta ZMO es de gran relevancia, ya que esta tiende a ser más somera y con aumento en su rango latitudinal con el paso de los años, principalmente por el aumento de la desoxigenación (Booth *et al.*, 2014; Schultz *et al.*, 2014). Únicamente entre 1986 y 2006, en la región del Southern California Bight esta ZMO se somerizó 80 m y el OD disminuyó  $\sim 20\%$  debajo de la capa de mezcla (Booth *et al.*, 2014), mismo que se acompaña de un cambio hacia una mayor presencia de ASsSt que logra expandir la ZMO, registrado desde 1993 (Schultz *et al.*, 2014).

- *Corrientes geostróficas de TDA*

Las figuras de TDA (Fig. 6) mostraron un nivel del mar más bajo hacia la zona costera que en la oceánica, especialmente durante el crucero de abril (P24) (Fig. 6b). En el crucero de febrero (W-F) (Fig. 6a), al sur de PEu, los valores de TDA son ligeramente mayores que al norte de esta provincia. Esto se debe a la interacción entre los vientos paralelos a la costa del CAPN y el transporte de Ekman, cuya intensidad depende de la estación del año en el que se encuentre, pues es mayor en primavera-verano y menor en otoño-invierno (Castro y Martínez, 2010; Durazo, 2015). El transporte de Ekman ocurre cuando los vientos, actúan continuamente durante uno o dos periodos inerciales ( $\sim 12\text{-}24$  horas según la latitud), lo que genera una fuerza de fricción sobre la llamada capa de Ekman ( $\sim 50\text{-}100$  m en la columna de agua) (McPhaden *et al.*, 2024). Adicional a la fricción y a la dirección de los vientos, la fuerza de Coriolis contribuye con igual fuerza, lo que ocasiona que el agua se mueva  $\sim 90^\circ$  a

la derecha de la dirección del viento (Kämpf y Chapman, 2016), lo que provoca un desplazamiento del agua superficial costera (~50-100 m de profundidad) hacia la contraparte oceánica. Como resultado, el agua subsuperficial asciende para reemplazar la desplazada, mecanismo que da origen a las surgencias costeras (Kämpf y Chapman, 2016; Schultz *et al.*, 2014). Este balance entre la intensidad de los vientos prolongada, su fricción asociada y la fuerza de Coriolis, denominado como balance de Ekman, explica el desnivel en la TDA y la alta productividad de las costas de California y BC, pues el agua que asciende durante este proceso corresponde al ASsSt, misma que es rica en nutrientes (Schultz *et al.*, 2014; Durazo, 2015; Kämpf y Chapman, 2016). Los gradientes de TDA entre la parte oceánica y costera son más pronunciados, además de contar con corrientes geostróficas asociadas más intensas, durante la primavera (P24), lo que ocasiona una menor presencia de meandros debido a la intensidad y persistencia de los vientos del CAPN (Durazo, 2015). Esto último no corresponde tanto con las observaciones realizadas en P24, ya que en este se logran ver más estructuras de mesoescala que en W-F, principalmente en la zona costera al norte de PEu (>28 °N), ya que en W-F prácticamente se encuentran ausentes. Por otro lado, al norte de PEu, el nivel del mar es menor que en el sur, lo que sugiere mayor intensidad del CAPN en estas latitudes. En W-F, la menor intensidad del CAPN (Durazo, 2015) puede explicar la menor variación del nivel del mar (~0.45 m), en comparación con primavera, donde los valores mínimos fueron ~0.35 m. Además, estos vientos y el transporte de Ekman favorecen la formación de estructuras de mesoescala como remolinos y meandros, lo que modifica el transporte de agua subártica a través de la CC.

El comportamiento descrito previamente coincide con la climatología mensual de TDA (1993-2019) de López-Avilés (2024). Durante febrero, la TDA muestra valores similares a W-F: 0.55-0.65 m en la costa y 0.7-0.8 m en la región oceánica, con un flujo ecuatorial del BTCC. En la eGC, la TDA es baja (~0.5 m en promedio) y disminuye a 0.35 m en W-F. No se observa un remolino definido en la eGC, pero en 2012 se registró un remolino anticiclónico hasta mayo, mientras que otro ciclónico frente a la PBC (~110°W, ~22°N) persistió hasta mayo (López-Avilés, 2024). En P24, los valores bajos de TDA (~0.5-0.55 m) son similares a la climatología de abril del mismo estudio. En este mes, el BTCC se aleja más de la costa, mientras que en febrero permanece más cercano (López-Avilés, 2024). También se observa un

remolino anticiclónico en la eGC en P24, reportado en la climatología de abril y por otros estudios (Collins y Castro, 2022; Larios-Muñiz et al., 2022). La climatología mensual refleja condiciones típicas: en febrero, el BTCC está más cerca de la costa, mientras que en abril se aleja. En invierno, no se observa remolino en la eGC, pero en abril puede alternar entre un intercambio ciclónico (Castro et al., 2000; Collins y Castro, 2022) o anticiclónico (Castro et al., 2017; Larios-Muñiz et al., 2022).

- *Corrientes LADCP-SADCP*

Las corrientes medidas con LADCP-SADCP (Fig. 7) para P24 muestran la presencia de dos corrientes: una superficial (50-150 m) y otra subsuperficial (250-300 m). El promedio sobre la capa superficial (Fig. 7a) presentó el flujo hacia el ecuador de la CC y el BTCC (al sur de 28°N), lo cual se indica por la dirección de los vectores (~20 cm s<sup>-1</sup>). La CC, a lo largo del BTCC, es un flujo semipermanente, con mayor intensidad entre invierno y verano (Wyrcki, 1965; Lynn y Simpson, 1987; Gómez, 2016; López-Avilés, 2024). Sin embargo, al norte de 30°N se observan vectores con dirección norte (Fig. 7a), algo aparentemente raro debido a la dominancia del flujo superficial de la CC (50-150 m, o hasta 300 m) (Lynn y Simpson, 1987; Portela et al., 2016). Esto puede ser causado por el retorno de la CC en dirección norte debajo de los 50 m asociado al SCBE (Owen, 1980; Checkley y Barth, 2009). Este se presenta entre los ~34.5°N (Punta Concepción, California) y los ~32°N (Ensenada, Baja California), aunque su menor intensidad es precisamente en primavera (Schwartzlose, 1963; Owen, 1980; Checkley y Barth, 2009; Durazo, 2015). Lo anterior explica la desviación de ciertos vectores norteños costeros, característico también de este flujo durante las estaciones de primavera-verano, ya que en otoño-invierno, esta corriente superficial hacia el norte se alejada de la costa y puede complementar a la CU (Kurczyn et al., 2019). De diciembre a junio, el BTCC posee velocidades de hasta 0.30 m s<sup>-1</sup>, mayores a las registradas (~0.20 m s<sup>-1</sup>) (López-Avilés, 2024). Las corrientes muestran un patrón homogéneo en el transecto, con desviaciones al interactuar con topografía (ej. PEu) o remolinos de mesoescala del SCC (Owen, 1980; Durazo, 2015). La poca variación de las corrientes superficiales se asocia a la mayor intensidad-persistencia del CAPN, ya que en primavera presenta mayor fuerza y consigo un menor “zigzaguo” en su flujo en hacia el sur (Durazo, 2015).

Las corrientes subsuperficiales mostraron el flujo hacia el norte de la CU (Fig. 7b, capa 250-300 m), esta corriente acarrea parte del ASsSt (Durazo y Baumgartner,

2002; Durazo, 2015; Portela et al., 2016; Kurczyn et al., 2019). Su núcleo se encuentra ~150-200 m, aunque en el sur (sur PBC y eGC) se puede extender entre los ~75-400 m (Portela et al., 2016; Kurczyn et al., 2019). La CU se encuentra presente todo el año, su mayor intensidad no coincide con los periodos de mayor intensidad de la CC (primavera), sino que es durante verano-otoño (definida desde primavera) cuando llega hasta latitudes más norteñas, con mayor intensidad y persistencia (Durazo, 2015; López-Avilés, 2024). En la Fig. 7b, entre los 27 y 30°N, se observa que algunos vectores de la corriente se orientaron en dirección sur, posiblemente debido a la interacción con la topografía o con alguna estructura de mesoescala local. Al sur de PEu, las corrientes parecen ser más débiles que al norte, por la diferente contribución de masas de agua en cada zona. Además, la circulación subsuperficial se encuentra dominada por el rotacional del esfuerzo del viento en la zona de la plataforma continental (Durazo, 2015), que explica las corrientes observadas, pues los lances fueron realizados en el límite de la plataforma continental (~1000 m). PEu es relevante para las corrientes, ya que tanto los cabos como las puntas pueden actuar tanto como barreras dinámicas como puntos de aceleración, aumento de flujo y transporte de la CU (Bray y Greengrove, 1993; Durazo, 2015). Esto explica los cambios en intensidad y dirección en zonas después de la interacción de la CU con PEu, donde se generan dos provincias (norte y sur) con velocidades y aparente dirección diferente (norte de PEu).

- *Corrientes de reanálisis sobre mapas de S<sub>A</sub>*

Las figuras construidas con los datos reanálisis en la capa superficial entre 50 y 100 m (Fig. 8), evidenció el flujo del ACC en dirección sur durante los periodos de medición de los cruceros W-F y P24. La distribución de salinidad, como un trazador, complementa el flujo y extensión del ACC, donde en su extensión más norteña (>26°N) sus salinidades fueron de ~33 g kg<sup>-1</sup> y aumentaron en la parte sur de la PBC y eGC hasta <34.6 g kg<sup>-1</sup>, lo que definió dos provincias del BTCC (Norte: >26°N; Sur: <26°N) (Kurczyn et al., 2019; Portela et al., 2016; Durazo, 2015). La menor presencia de los remolinos de mesoescala y flujo en forma de “zigzaguo” de la CC en febrero (W-F) que en abril (P24) se relacionó a que en primavera los vientos provenientes del noroeste son más intensos y persistentes, lo que ocasiona un flujo más constante, con velocidades mayores y una menor cantidad de estructuras de mesoescala (López-Avilés, 2024; Durazo, 2015). Ambos cruceros muestran un intercambio

anticiclónico en la eGC, aunque no tan notorio en P24, seguidos de un remolino ciclónico de mayor salinidad (mayor en W-F), por la presencia de AGC, en la porción sur del GC (López-Avilés, 2024; Larios-Muñiz *et al.*, 2022; Castro *et al.*, 2017). La figura de reanálisis durante el período de P24 (Fig. 8b), no permitió observar bien este intercambio, pero las corrientes derivadas de LADCP lo exponen claramente (Ver anexo 1), (Larios-Muñiz *et al.*, 2022; Castro *et al.*, 2017). La interacción entre ACC y ATS proveniente del sur y de la parte oceánica es el principal mecanismo formador de frentes y remolinos de mesoescala en la periferia del flujo del BTCC, debido a las altas salinidades ( $\sim 34.6 \text{ g kg}^{-1}$ ) y temperaturas ( $>25.1^\circ\text{C}$ ) que contrastan con los bajos valores de la CC en ambas variables (Kurczyn *et al.*, 2019; Portela *et al.*, 2016).

En contraste, la capa subsuperficial (250-300 m), mostró un comportamiento inverso, con flujo predominante hacia el polo, principalmente cerca de la costa durante el crucero P24 (Fig. 9). Fue posible observar rasgos del flujo del ACC, aunque con disminución de la intensidad, extensión, aunque su presencia todavía se detecta en esta capa, su flujo se ve reducido por el menor efecto de los vientos del CAPN con la profundidad (López-Avilés, 2024; Durazo, 2015). Es evidente que la corriente en la capa subsuperficial de W-F (Fig. 9a) sea aún más débil y con mayor presencia de remolinos de mesoescala y meandros en el flujo de la CC, ya que los vientos del CAPN, que son relativamente más débiles en invierno, tienen aún menor efecto en la subsuperficie (López-Avilés, 2024; Durazo, 2015). En primavera, cuando los vientos son de mayor intensidad (Castro y Martínez, 2010), se mantienen las bajas salinidades ( $\sim 34 \text{ g kg}^{-1}$ ) al norte de  $26^\circ\text{N}$  en comparación de invierno, en todo el flujo de la CC. El BTCC interactúa con la CU que transporta ASsSt desde el Pacífico Tropical Mexicano a la altura del sur de la PBC y la eGC (López-Avilés, 2024; Larios-Muñiz *et al.*, 2022; Portela *et al.*, 2016). La intensidad de la CU tiene cierta estacionalidad, donde su mayor (menor) flujo en dirección norte se presenta durante la primavera-verano (invierno) (López-Avilés, 2024; Durazo 2015). Esto se observa en las figuras de la capa subsuperficial (Fig. 9), aunque en el W-F (Fig. 9a) no está claro el flujo en dirección norte de la CU mientras que en P24 (Fig. 9b) se distingue claramente la incursión del ASsSt con salinidades  $\sim 34.6 \text{ g kg}^{-1}$  desde el sur y apegado a la zona costera oeste de la PBC hacia el norte (López-Avilés, 2024).

- *Secciones radiales sobre densidad*

La distribución de  $S_A$ ,  $\Theta$ ,  $\pi$  y profundidad sobre superficies de densidad de las secciones radiales frente a PBC a lo largo de la isopícnas muestran el flujo de ACC en dirección sur y su posterior entrada hacia el GC (Figs. 10-11). Las bajas temperaturas ( $<19^\circ\text{C}$ ; en  $25.5 \text{ kg m}^{-3}$ ) y  $S_A$  ( $<34.4 \text{ g kg}^{-1}$ ) características del ACC se distribuyeron alrededor de la pPBC, donde interaccionó con dos estructuras de mesoescala: un remolino anticiclónico a los  $\sim 110^\circ\text{W}$  (RA) y uno ciclónico a los  $\sim 109^\circ\text{W}$  (RC). Estos remolinos fueron descritos previamente por [Larios-Muñiz et al. \(2022\)](#) y [Castro et al. \(2017\)](#) y son estructuras características de este periodo de muestreo. Sin embargo, muestran diferencias en sus características físicas con el cambio en isopícnas. En la isopícnas de  $24.5 \text{ kg m}^{-3}$  (Fig. 10) ambos remolinos presentan  $\Theta$ ,  $S_A$  y  $\pi$  mayores ( $S_A \sim 34.5\text{-}34.7 \text{ g kg}^{-1}$ ,  $\Theta \sim 19\text{-}19.5^\circ\text{C}$ ,  $\pi \sim 2.8\text{-}3.2 \text{ kg m}^{-3}$ ) a las del ACC circundante, mientras que en la isopícnas de  $25.25 \text{ kg m}^{-3}$  (Fig. 11) el RA (RC) presenta valores mayores (semejantes) a las del agua presente en la capa, con  $S_A$ ,  $\Theta$  y  $\pi$  de  $35 \text{ g kg}^{-1}$ ,  $\Theta \sim 17^\circ\text{C}$  y  $\pi \sim 2.5 \text{ kg m}^{-3}$  ( $S_A \sim 34.3 \text{ g kg}^{-1}$ ;  $\Theta \sim 15.5^\circ\text{C}$ ; y  $\pi \sim 1.7 \text{ kg m}^{-3}$ ), respectivamente. Lo último descrito coincidió con lo observado por [Larios-Muñiz et al. \(2022\)](#) con la isopícnas de  $25 \text{ kg m}^{-3}$ , pues los valores de dichas variables en RA y RC fueron mayores y menores. La diferencia de las características físicas entre la capa de  $24.5 \text{ kg m}^{-3}$  (Fig. 10a-c) y la de  $25.25 \text{ kg m}^{-3}$  (Fig. 11a-c) puede deberse al cambio de profundidad de la isopícnas (alrededor de 30 m), puesto que la primera es más somera y por ende está sujeta a mayor interacción con la salida de AGC y aguas superficiales. Esto es más notorio con el RC, puesto que asciende hasta los  $\sim 15 \text{ m}$  y su interacción con agua superficial puede explicar el aumento de su  $S_A$  y  $\Theta$  a pesar de ser un remolino de núcleo frío en comparación con el RA, donde se esperan valores elevados de dichas variables por su origen y patrón de circulación. Independientemente, la profundidad de ambas isopícnas ( $24.5$  y  $25.25 \text{ kg m}^{-3}$ ) coincide con las observaciones realizadas por [Larios-Muñiz et al. \(2022\)](#), donde el RA (RC) se encuentra a mayor (menor) profundidad, debido al patrón de circulación de los mismos. El RC posee una distribución más puntual y menos extensa que el RA, con un ascenso hasta los  $\sim 15 \text{ m}$  ( $\sim 40 \text{ m}$ ) para la isopícnas de  $24.5 \text{ kg m}^{-3}$  (Fig. 10d) ( $25.25 \text{ kg m}^{-3}$ ; Fig. 11d), concordante con los  $\sim 20 \text{ m}$  de profundidad para la isopícnas de  $25 \text{ kg m}^{-3}$  ([Larios-Muñiz et al., 2022](#)). Por otro lado, el RA asciende hasta los  $\sim 50$ ,  $\sim 85$  y  $\sim 70 \text{ m}$  para las isopícnas de  $24.5$ ,  $25.25$  y  $25 \text{ kg m}^{-3}$ , respectivamente ([Larios-](#)

Muñiz *et al.*, 2022). Parte de esta mayor extensión del RA y la elevación de esta isopícnica en las tres capas se debe a la incursión de ACC en dirección sur y el ingreso hacia el GC. Así mismo, esto se ve acompañado de una alberca de agua cálida entre ~109-110°W de hasta 24°C frente a la PBC, que contribuye al RA y el descenso de las isopícnas.

- Secciones de la Entrada al Golfo de California

- *Diagrama  $\Theta$ - $S_A$*

El diagrama  $\Theta$ - $S_A$  de la sección de la eGC del crucero P24 mostró alta variabilidad en  $S_A$  para densidades  $<26.5 \text{ kg m}^{-3}$ , esto debido a la confluencia del AGC, ACC y ASsSt (Fig. 12). La variabilidad disminuyó notablemente bajo esta isopícnica ( $>26.5 \text{ kg m}^{-3}$ ), correspondiente a la capa subsuperficial/profunda conformada por las masas de agua ASsSt, AIP y APP, identificadas de acuerdo a Portela *et al.* (2016) y Castro *et al.* (2017). Para los datos de este crucero, Castro *et al.* (2017) reportaron que la variabilidad de  $S_A$  y  $\Theta$  para las masas de agua con  $\sigma < 26.5 \text{ kg m}^{-3}$  fue de  $\Delta S_p \sim 1.19 \text{ g kg}^{-1}$  y  $\Delta \Theta \sim 12.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , que es debida a la presencia de diversas masas de agua en la zona. Las salinidades mínimas (máximas) se localizaron en el lado oeste (oeste y este) de la eGC. Note como entre el ACC, ASsSt y AGC se observan puntos en el diagrama  $\Theta$ - $S_A$  sin clasificación. Estos corresponden a aguas transicionales (AT), resultado de la mezcla entre ACC, AGC y ASsSt, con propiedades termohalinas intermedias. El ACC y el AGC presentaron valores altos de OD ( $>150 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) por su carácter superficial, mientras que en las aguas subsuperficiales e intermedias (ASsSt y AIP) disminuye drásticamente hasta valores  $\sim 0 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1}$ . La ZMO (Gilly *et al.*, 2013) se observa a partir de la isopícnica de  $\sim 26 \text{ kg m}^{-3}$ , donde predomina el ASsSt, y a mayor profundidad el AIP (Álvarez-Rodríguez, 2023). Es interesante el aumento de OD ( $\sim 100 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) en el APP, pues se encuentra a profundidades  $>1000 \text{ m}$  y coincide con la ZMO. Esto se explica por el origen del APP y sus características físicas y químicas. A estas profundidades, el efecto de la presión y las bajas temperaturas ( $< 4^\circ \text{C}$ ) aumentan la solubilidad de los gases, además, la circulación de las masas de agua profundas acarrear OD cuando se forman en superficie (Webb, 2020).

Los valores de  $\pi$  en el diagrama  $\Theta$ - $S_A$  de la eGC fueron más altos que los observados frente en las costas de California (Fig. 2). En la eGC, el ACC presenta valores de  $\pi > 1 \text{ kg m}^{-3}$  debido al aumento progresivo de  $\Theta$  y  $S_A$  conforme incursiona hacia el sur (Durazo, 2015; Durazo y Baumgartner, 2002). Debido a esto, la isolínea de  $1 \text{ kg m}^{-3}$  no puede ser utilizada para separar las aguas frías y frescas del ACC de las saladas y cálidas del GC y/o ASsSt. Es a partir de la isolínea de  $1.5 \text{ kg m}^{-3}$  donde los valores de  $\pi$  se dispersan, debido al mayor rango de salinidades y temperaturas debido a la presencia de ACC, AGC y AT en la parte superficial de la eGC.

- *Secciones transversales en la eGC*

Las secciones transversales de  $S_A$ ,  $\Theta$ , OD y  $\pi$  sobre  $\sigma_\Theta$  para la eGC muestran detalles de la distribución de las masas de agua (Fig. 13). La  $S_A$  (Fig. 13a) presentó gran variabilidad lateral en la capa superficial ( $\sim 24$ - $26 \text{ kg m}^{-3}$ ) y dos masas de agua: el ACC que ingresa del lado oeste del GC ( $S_A < 34.6 \text{ g kg}^{-1}$ ) y AGC que sale (ingresa) por el lado central-este ( $S_A > 35 \text{ g kg}^{-1}$ ) (Castro et al., 2017). Estas masas de agua fueron identificadas por Larios-Muñiz et al. (2022) con datos de P24 en profundidades de entre 0 y 140 m. Igualmente, Castro et al. (2017) y Álvarez-Rodríguez (2023) también identificaron estas masas de agua, con una distribución semejante respecto a sus propiedades halinas. La circulación de las masas de agua en la eGC se apoyó de estudios con observaciones de TDA, corrientes geostóficas superficiales de AVISO (Castro et al., 2017) y mediciones de LADCP promediadas entre 8 y 56 m de profundidad (Larios-Muñiz et al., 2022), donde en ambos casos el patrón de circulación en la eGC fue anticiclónico. De forma complementaria, Castro et al., (2017) y Álvarez-Rodríguez (2023) realizaron una sección transversal de velocidad observada y geostófica para identificar las velocidades y flujos de entrada-salida del Golfo. Esta mostró el intercambio anticiclónico del golfo, pues en su extremo oeste, y en la parte central, las velocidades AGC y ACC fueron velocidades positivas (ingreso al GC), mientras que en el lado este se observaron velocidades negativas (salida del GC) (Castro et al., 2017). Debajo del AGC y ACC ( $> 26 \text{ kg m}^{-3}$ ), se observó el ASsSt ( $S_A \approx 35$ - $34.8 \text{ g kg}^{-1}$ ) para su parte somera y profunda, respectivamente (disminución de  $S_A$  con aumento de  $\sigma$ ). Larios-Muñiz et al. (2022) registraron ASsSt en el lado oeste del Golfo, posiblemente porque sus figuras son respecto a profundidad hasta 140 m, lo que no considera parte del ASsSt. Sin embargo, Castro et al. (2017) registraron

ASsSt hasta 500 m con poca variabilidad debajo de la capa superficial (~150 m). Debajo de la isopícna de  $27 \text{ kg m}^{-3}$ , el AIP ( $S_A \sim 34.7 \text{ g kg}^{-1}$ ). Al igual que el ASsSt, el AIP no presenta variación a lo largo del transecto ni con respecto a las isopícnas. La figura de  $\Theta$  (Fig. 13b) muestra temperaturas más altas (bajas) asociadas a isopícnas de menor (mayor) valor. No se distinguieron con claridad los rasgos que distinguen entre el AGC y del ACC con base en su  $\Theta$ , ya que la temperatura el ACC incrementa progresivamente conforme incursiona al sur, tanto por mezcla con AGC y/o subtropical, como por interacción con la radiación solar (Fig. 12) (Durazo y Baumgartner, 2002; Durazo, 2015). Un rasgo importante fue que donde ocurrieron los dos núcleos en salinidad del AGC (oeste y centro del GC), se presentaron hundimientos de la isoterma de  $16^\circ\text{C}$  por debajo de la isopícna de  $25.5 \text{ kg m}^{-3}$ . Castro *et al.* (2017) mencionan que estos hundimientos de la isoterma de  $16^\circ\text{C}$  ( $>12^\circ\text{C}$  en su estudio) son debidos a la circulación anticiclónica presente en la eGC durante el muestreo, acompañado del ascenso de isotermas superficiales ( $>20^\circ\text{C}$ ;  $<50 \text{ m}$ ;  $\sim 24.5 \text{ kg m}^{-3}$ ). Las mayores temperaturas registradas ( $\sim 22.5^\circ\text{C}$ ) se observaron superficialmente sobre el talud continental de Sinaloa (Castro *et al.*, 2017; Larios-Muñiz *et al.*, 2022; Álvarez-Rodríguez, 2023). Por debajo de la isoterma de  $16^\circ\text{C}$ , la temperatura es homogénea en el transecto, que indica la falta de interacción aparente del ASsSt ( $>26 \text{ kg m}^{-3}$ ). Esto no se aprecia claramente en las figuras de Castro *et al.* (2017) y Álvarez-Rodríguez (2023), pues sus resultados se muestran con respecto a la profundidad, donde el comportamiento cambia ligeramente a comparación de las superficies de densidad. Debajo del ASsSt, el AIP domina sobre  $\sigma > 26.5 \text{ kg m}^{-3}$ , con valores de  $\Theta$  inferiores a los  $10^\circ\text{C}$ . Debido a su profundidad, el AIP no presenta una interacción directa con otra masa de agua circundante, por lo que se mantiene similar en todo el transecto.

El OD (Fig. 13c) presentó sus mayores (menores) concentraciones en las isopícnas de menor (mayor) densidad. Similar a la distribución de  $\Theta$  (Fig. 13b), se observan dos núcleos del AGC, así como el hundimiento de las isolíneas de oxígeno hasta los  $25.5 \text{ kg m}^{-3}$  en el lado oeste y central de la eGC debido al remolino anticiclónico (Álvarez-Rodríguez, 2023). Los valores mayores se agruparon en el oeste y centro del golfo ( $>200 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ), mientras que cerca del talud de Sinaloa las concentraciones apenas alcanzaron los  $200 \mu\text{mol kg}^{-1}$  (Castro *et al.*, 2017; Álvarez-Rodríguez, 2023). Entre los  $25.5$  y  $26 \text{ kg m}^{-3}$  se presentó un cambio drástico en el OD;

cambió de  $\sim 170 \mu\text{mol kg}^{-1}$  a  $\sim 25 \mu\text{mol kg}^{-1}$  (Castro *et al.*, 2017). Esto se asocia a la presencia del ASsSt, ya que presenta valores muy bajos de OD por ser parte de la ZMO del Pacífico Tropical Mexicano. La capa entre 60 y 20  $\mu\text{mol kg}^{-1}$  (ZLO) (Gilly *et al.*, 2013) tiene un grosor de  $\sim 0.25 \text{ kg m}^{-3}$ , mientras que la ZMO ( $< 20 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) se extiende homogéneamente a lo largo de toda la eGC ( $> 26 \text{ kg m}^{-3}$ ). En la isopícna de  $\sim 26.5 \text{ kg m}^{-3}$ , la isolínea de  $5 \mu\text{mol kg}^{-1}$  se hace presente, con valores menores a esta hasta alcanzar  $\sim 27.5 \text{ kg m}^{-3}$ , donde hay un ligero aumento, suficiente para contar con valores superiores a los  $5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ . La región de la ZMO entre  $\sim 26.5$  y  $\sim 27.5 \text{ kg m}^{-3}$  contiene valores inferiores a  $5 \mu\text{mol kg}^{-1}$  y se compone tanto al ASsSt como al AIP.

La distribución de  $\pi$  presentó un comportamiento combinado de la  $S_A$  y de  $\Theta$ , donde valores más elevados se asocian a aquellas aguas saladas y cálidas superficiales y viceversa. Las aguas superficiales (AGC y ACC) mostraron valores de  $\pi > 2 \text{ kg m}^{-3}$ , por lo que no es factible utilizar el límite de  $1 \text{ kg m}^{-3}$  para separar ambas masas de agua (Durazo y Baumgartner, 2002). Se observan los núcleos del AGC en el extremo este-central de la eGC, como aquellos con valores de  $\pi \sim 4 \text{ kg m}^{-3}$ . El núcleo central se extendió superficialmente hasta la plataforma de Sinaloa (Castro *et al.*, 2017), mientras que el presente en el lado oeste se “encapsuló” entre las isopícnas de 25 y  $25.5 \text{ kg m}^{-3}$ , con agua con valores ligeramente menores de  $\pi$  encima de este, referente al ACC. Entre los  $\sim 108.6$ - $108.8^\circ\text{N}$  se observa un ascenso de la isolínea de  $2 \text{ kg m}^{-3}$  hasta los  $\sim 25 \text{ kg m}^{-3}$ , que indica el espacio entre los dos núcleos del AGC y el centro del remolino anticiclónico. Debajo de la isolínea de  $2 \text{ kg m}^{-3}$ , el ASsSt posee valores de  $\sim 1.5 \text{ kg m}^{-3}$  sin alterar a lo largo del transecto y, debajo de esta, el AIP posee un comportamiento homogéneo en toda la eGC con valores iguales o menores a  $1 \text{ kg m}^{-3}$ . Si bien el valor de  $0.6 \text{ kg m}^{-3}$  es utilizado para separar el ASsSt del AIP (Durazo y Baumgartner, 2002), en esta región ambas masas de agua se encuentran diferenciadas.

## Capítulo 2. Resultados: Propiedades químicas del crucero P24

---

### 5. Distribución de propiedades químicas y Nutrientes Inorgánicos Disueltos frente las costas del sur de California y la eGC

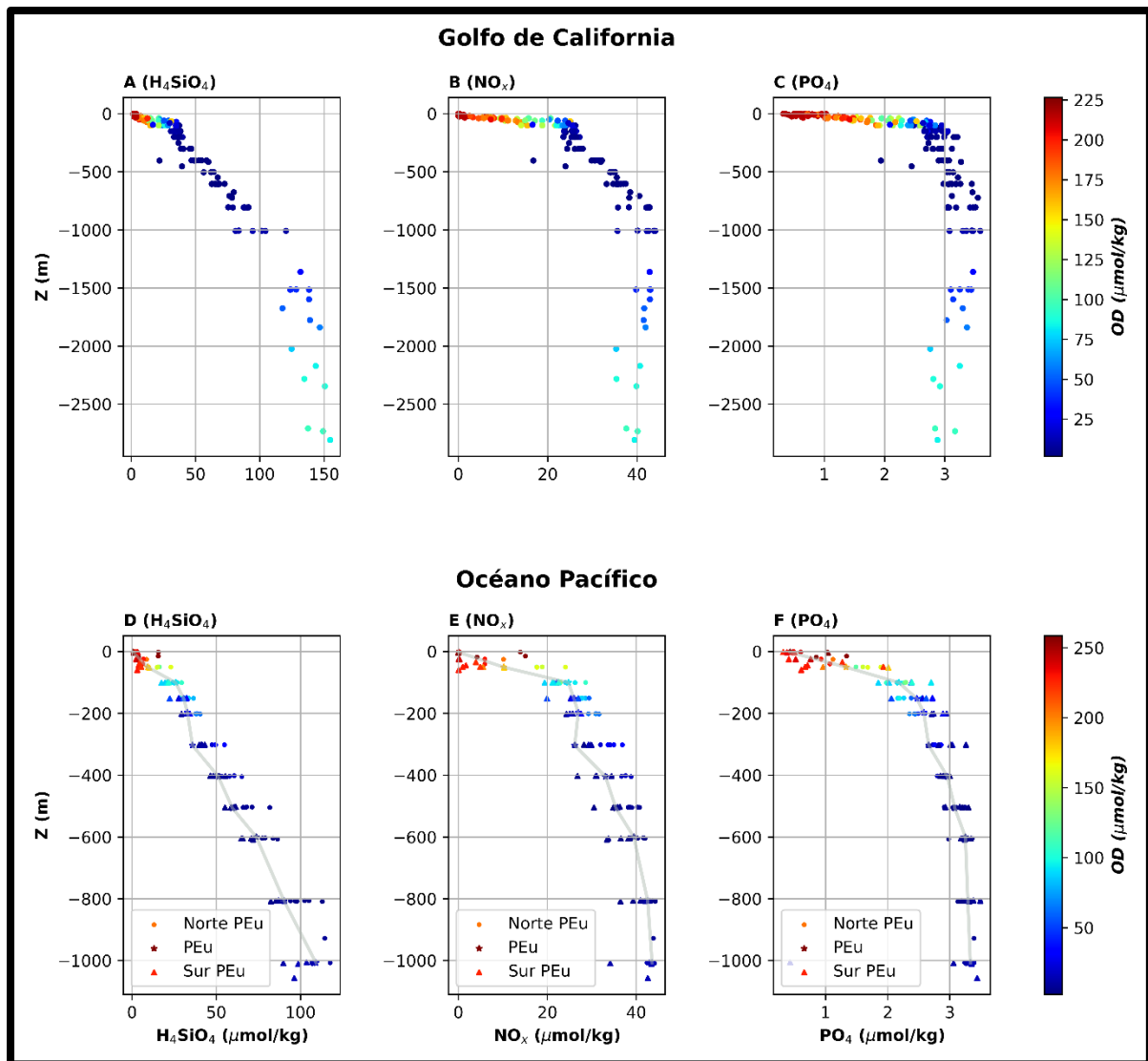
Complementario a las observaciones de las propiedades físicas, la presente sección tiene el objetivo de describir de forma general las características químicas observadas en el crucero P24. Se realizaron diagramas y figuras que exponen el comportamiento de los nutrientes a lo largo de la columna de agua y respecto a los transectos del Océano Pacífico (OP) y de la entrada al Golfo de California (eGC).

Los perfiles verticales de los nutrientes se muestran en la Figura 14. Todos los perfiles presentaron valores muy bajos en la capa superficial (cerca de  $0 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ), con un incremento conforme aumenta la profundidad. Como se describió previamente, el OD presentó altas concentraciones ( $\sim 225 \mu\text{mol kg}^{-1}$  en eGC;  $\sim 250 \mu\text{mol kg}^{-1}$  en OP) en la capa superficial (0-100 m) y valores  $\sim 0 \mu\text{mol kg}^{-1}$  a partir de los  $\sim 500$  m. Sin embargo, en los lances profundos de la eGC se observó un incremento de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  hasta de  $\sim 100 \mu\text{mol kg}^{-1}$  a partir de los 2000 m, correspondiente al APP.

Los perfiles de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  (Figs. 14a, 14d) muestran un aumento aproximadamente lineal de concentración con la profundidad, con valores promedio de  $\sim 4.73 \mu\text{mol kg}^{-1}$  ( $\sim 5.68 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) en superficie ( $< 50$  m) y  $\sim 100 \mu\text{mol kg}^{-1}$  ( $150 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) a los  $\sim 1000$  m ( $\sim 2500$  m) en la sección del OP (eGC). Después de los 1500 m en la eGC (Fig. 14a) se incrementó de  $\sim 130$  a  $150 \mu\text{mol kg}^{-1}$ , mientras que en el OP (Fig. 14d), los lances solo alcanzaron 1000 m de profundidad. Sin embargo, a partir de los 800 m de profundidad se observa cómo los lances se dispersan más entre sí (variación de  $\sim 20 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) en comparación con las capas superficial e intermedia. En cuanto al  $\text{NO}_x$  (Fig. 14b, e), definido como la suma entre  $\text{NO}_3$  y  $\text{NO}_2$  (Chang *et al.*, 2012), los valores en superficie ( $< 50$  m) son de  $\sim 3.05 \mu\text{mol kg}^{-1}$  ( $\sim 3.70 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) en el OP (GC), mientras que aumentan con la profundidad hasta superar los  $40 \mu\text{mol kg}^{-1}$  a los 1000 m en ambas regiones. Estos valores se mantienen casi constantes hasta la parte

profunda en la eGC, en contraste con el  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  (Fig.14a, d). De hecho, a partir de los ~1500 m, en la eGC (Fig.14b), hay una ligera disminución en la concentración de  $\text{NO}_x$  con la profundidad hasta alcanzar  $\sim 40 \mu\text{mol kg}^{-1}$  por debajo de los 2000 m. Por su parte, el perfil de  $\text{PO}_4$  (Fig. 14c, f) es semejante al  $\text{NO}_x$  (Fig. 14b-d), ya que también registra un aumento con la profundidad hasta los ~1000 m, donde una concentración de  $\sim 3.2 \mu\text{mol kg}^{-1}$  se mantiene relativamente constante y disminuye ligeramente a partir de los ~1500 m en la eGC (Fig. 14c). Los valores registrados fluctuaron desde  $\sim 0.76 \mu\text{mol kg}^{-1}$  ( $\sim 1.01 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) en la capa superficial del OP (GC) y  $>3 \mu\text{mol kg}^{-1}$  a los ~1000 m de profundidad en ambas regiones.

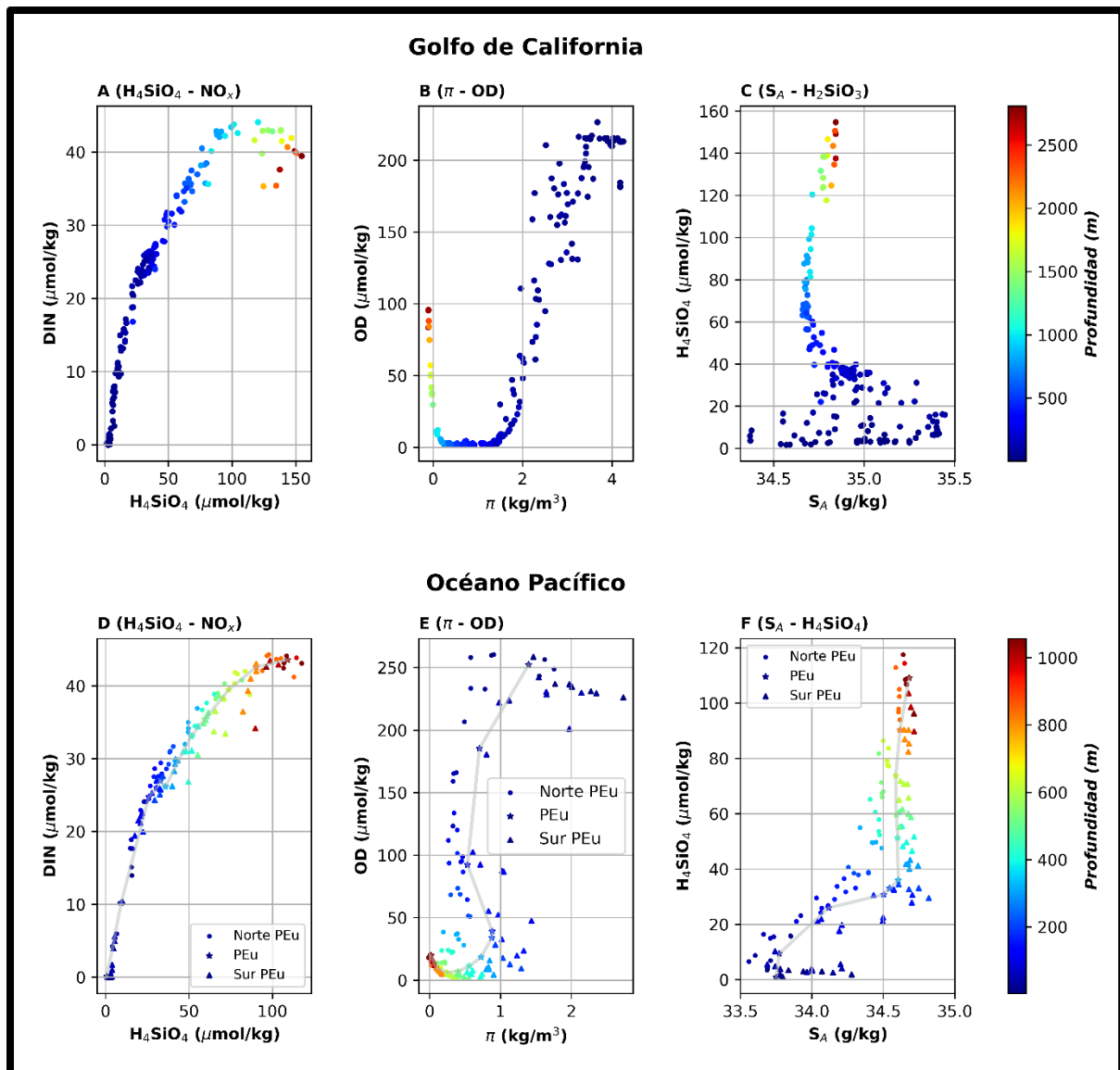
Nótese cómo en las figuras de la eGC (Fig. 14 a, b y c) se presenta un “escalón” a los ~250 m en donde las concentraciones se mantienen relativamente constantes por unos metros en la columna de agua para posteriormente incrementar. Este escalón también se encuentra presente en los lances del OP (Fig. 14 d, e y f), aunque menos notable. En estos últimos perfiles, se hace la distinción entre los datos al norte y sur de PEu, separados por la línea gris. Las concentraciones de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  (Fig. 14d) y  $\text{NO}_x$  (Fig.14e) tienen la tendencia de ser mayores (menores) al norte (sur) de PEu para una profundidad dada, mientras que en la figura de  $\text{PO}_4$  (Fig.14f) no se observa dicha distinción debido a la similitud entre los valores registrados.



**Figura 14.** Perfiles verticales de  $H_4SiO_4$  (A, D),  $NO_x$  ( $NO_3+NO_2$ ; B, E) y  $PO_4$  (C, F) para el crucero P24. La barra de colores indica la concentración de OD ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) asociada a cada lance. Los lances de la eGC componen las estaciones 1-20 mientras que la sección del Pacífico las estaciones 67-77 (Fig. 1). La sección del Pacífico se ve dividida entre las del norte ( $\bullet$ ) y del sur ( $\blacktriangle$ ) de PEu, mientras que la línea gris indica la estación ubicada a la altura de esta.

La relación entre el  $H_4SiO_4$  vs.  $NO_x$  (Fig. 15a, d) presentó una forma de “gancho” causada por una leve disminución de  $NO_x$  (a partir de los  $\sim 40 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) al alcanzar los  $\sim 100 \mu\text{mol kg}^{-1}$  de  $H_4SiO_4$ , mientras este último sigue en incremento. Esto ocurre a  $\sim 1000$  tanto en el OP (Fig. 15 d) como en la eGC (Fig. 14a), aunque el “gancho” se forma con los datos de la eGC que cuentan con profundidades hasta de  $\sim 2500$  m. La figura de  $\pi$ -OD (Fig. 15b-e) expone una forma peculiar pero coherente, tanto en la eGC (Fig. 15b) como en el OP (Fig. 15e), en la que los mayores valores de  $\pi$  se asociaron a las profundidades más someras, que a su vez tienen altas concentraciones de OD. En la eGC, los valores máximos de  $\pi$  son  $\sim 4 \text{ kg m}^{-3}$ , mientras

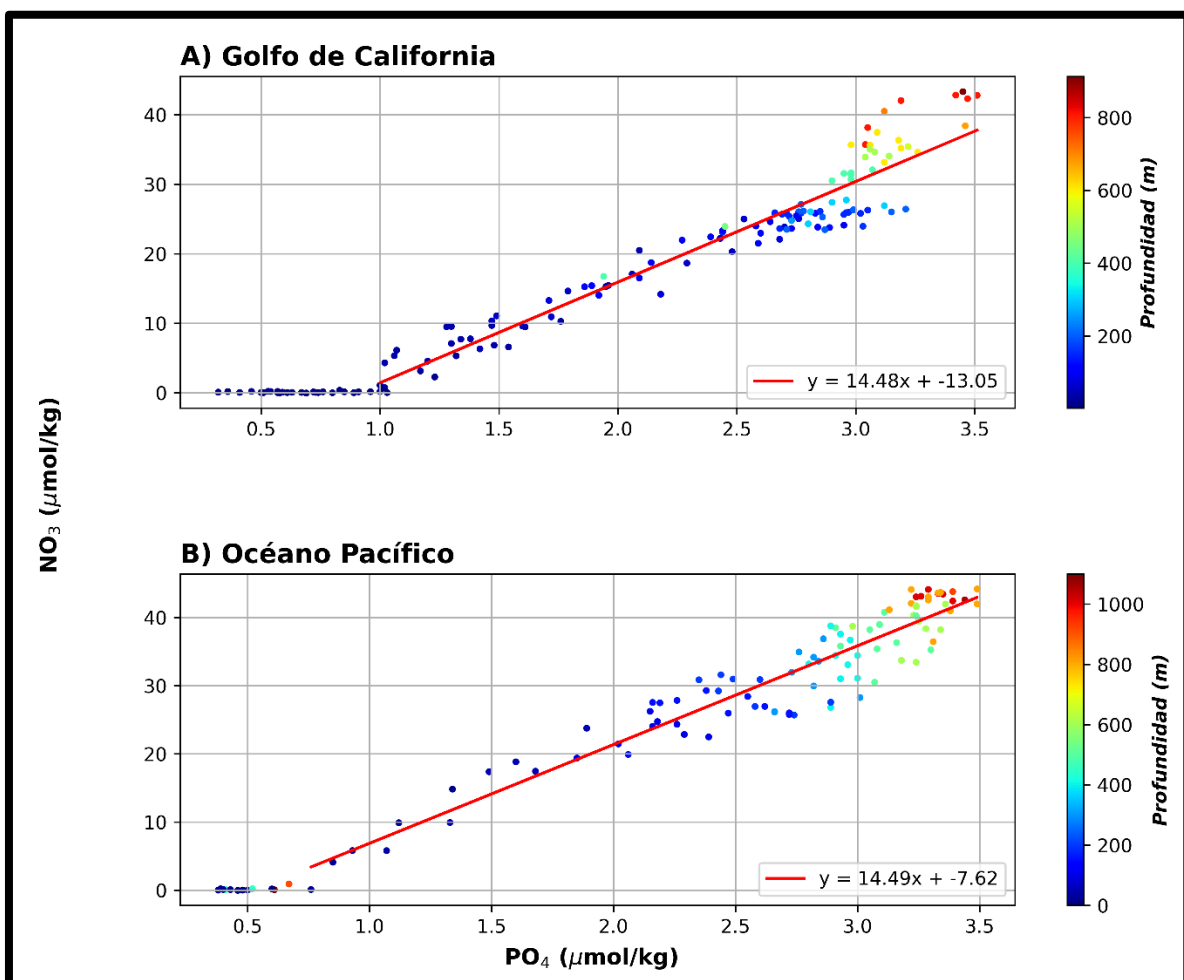
que en el OP son ligeramente mayores a  $2 \text{ kg m}^{-3}$  debido a la diferencia de masas de agua superficiales dominantes (eGC: AGC y ACC modificada; OP: ACC). Así mismo, en el OP se alcanzan valores de OD  $\sim 250 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1}$  en comparación con los  $\sim 200 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1}$  en la eGC, debido a que las aguas frías del ACC disuelven mejor el oxígeno. Conforme aumenta la profundidad, el OD y  $\pi$  disminuyeron progresivamente, con una tendencia más lineal en la eGC que en el OP, donde los valores son más desorganizados. A  $\sim 500 \text{ m}$ , los valores de OD son muy bajos ( $\sim 0 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) por la presencia de la ZMO, mientras que los valores de  $\pi$  siguen en disminución debido a que la  $\Theta$  es menor con la profundidad. Después de los  $\sim 1000 \text{ m}$ , los valores de  $\pi$  se mantienen constantes a  $0 \text{ kg m}^{-3}$  con un ligero aumento de OD hasta  $100 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1}$  a los  $\sim 2500 \text{ m}$  en la eGC (Fig. 15b) por la presencia del APP. El diagrama de  $S_A\text{-H}_4\text{SiO}_4$  (Fig. 15c-f) evidenció la diferencia de salinidades en la capa superficial respecto a la intermedia/profunda. Se observa en la eGC (Fig. 15c) una mayor dispersión en salinidad ( $<34.5\text{-}35.5 \text{ g kg}^{-1}$ ) entre los  $\sim 0\text{-}200 \text{ m}$ , debido a la interacción de ACC y AGC con valores de  $S_A$  contrastantes. En los lances del OP los valores de  $S_A$  se encuentran por debajo de los  $\sim 34.5 \text{ g kg}^{-1}$  debido a la dominancia del ACC (Fig. 15f). Conforme incrementa la profundidad, la concentración de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  aumenta y a su vez la dispersión de los valores de salinidad disminuye. La menor dispersión de la salinidad a partir de los  $\sim 500 \text{ m}$  se debe a que en la capa intermedia domina el ASsSt y por debajo de esta el AIP. La menor dispersión es más evidente en la eGC, puesto que en el OP se distinguen las dos provincias al norte y sur de PEu. En los tres diagramas del OP (Fig. 15 d, e y f) se observan menores valores de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  en la provincia sur, así como mayores valores de  $\pi$  y  $S_A$  que en el Norte a una determinada profundidad. La mayor “carga” de los valores de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  en la región sur (Fig. 15d) es indicativo de una mayor concentración de ácido silícico para una concentración dada de  $\text{NO}_x$ , debido a que el agua al sur de PEu se encuentra más afectada por la desnitrificación.



**Figura 15.** Diagramas de  $H_4SiO_4$ - $NO_x$  (a-d),  $\pi$ -OD (b-e) y  $S_A$ - $H_4SiO_4$  (c-f) para el crucero P24. La barra de colores indica la profundidad (m) asociada a cada lance. Los lances de la eGC componen las estaciones 1-20 mientras que la sección del Pacífico las estaciones 67-77. La sección del Pacífico se ve dividida en aquellas al norte (●) y sur (▲) de PEu, mientras que la línea gris indica la estación ubicada a la altura de esta.

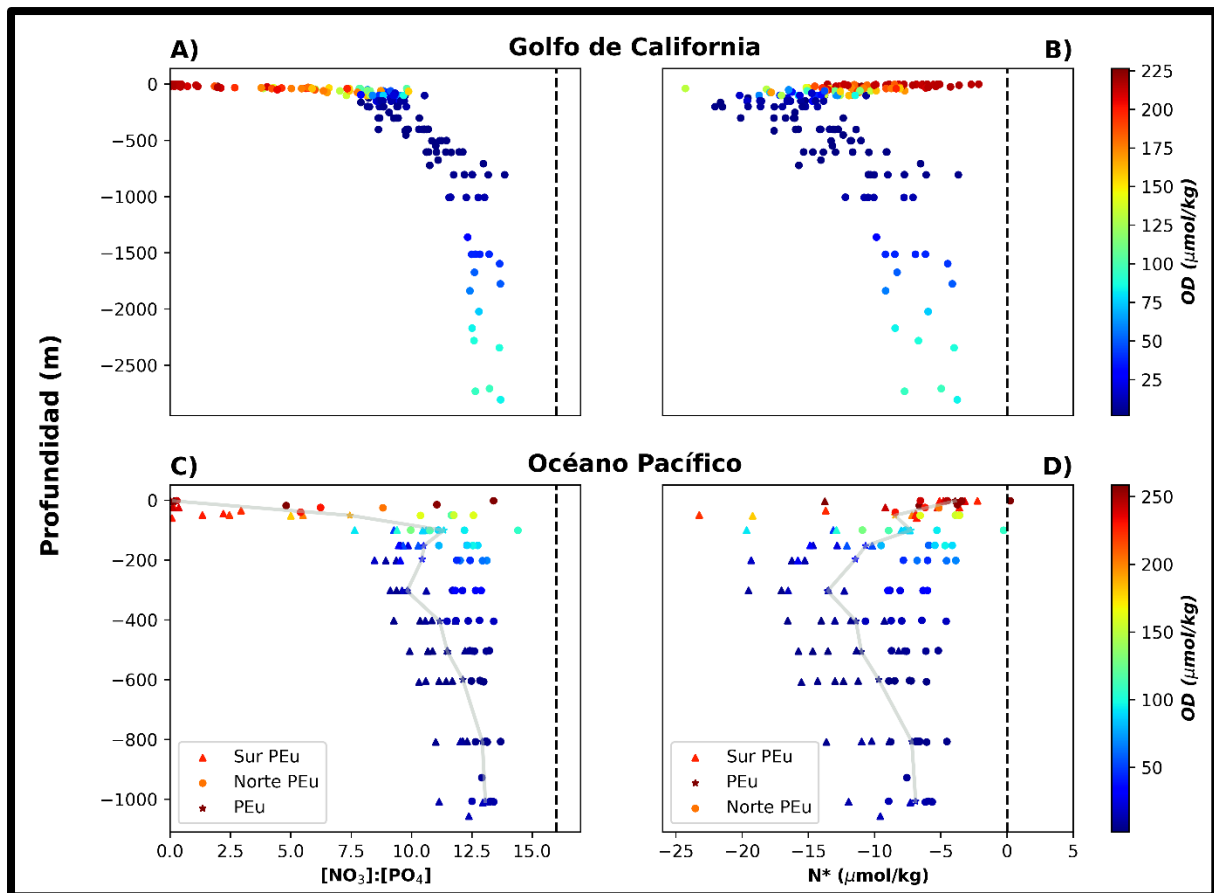
La relación  $PO_4$ - $NO_3$  hasta 1000 m (Fig. 16) informa sobre el estado de los nutrientes de esenciales para todos los organismos marinos. Tanto en la eGC (Fig. 16a), como en el OP (Fig. 16b), la relación entre ambos nutrientes mostró un comportamiento lineal, debido a que aumentan progresivamente conforme aumenta la profundidad. El valor en la eGC fue de 14.48 mientras que en el OP de 14.49. Esto indica que las características químicas de las masas de agua en cada zona, al menos con este diagrama, son muy semejantes en este rango de profundidad (0-1000 m). El OP presentó un mayor (ligero) aumento de  $NO_3$  con respecto a los valores de  $PO_4$  a

una determinada profundidad. En ambos casos (eGC y OP), la pendiente es menor a la relación de Redfield esperada de 16:1, por lo que los valores de pendiente menores a esta son indicativos de un déficit o falta de nitrógeno en general por procesos de desnitrificación (Paul *et al.*, 2024). Esta relación permite observar valores de  $\text{NO}_3 \sim 0 \mu\text{mol kg}^{-1}$  ( $\sim 3 \mu\text{mol kg}^{-1}$  en promedio  $< 50 \text{ m}$ ) asociados a valores de  $\text{PO}_4 < 1 \mu\text{mol kg}^{-1}$  ( $\sim < 0.5 \mu\text{mol kg}^{-1}$  en el OP), lo que indica que el  $\text{NO}_3$  es el nutriente limitante de la producción primaria, sobre todo en la eGC. Nótese cómo en la eGC parece haber una nube de datos independiente denotada por concentraciones de  $\text{PO}_4$  ( $\text{NO}_3$ ) mayores a 3  $\mu\text{mol kg}^{-1}$  (30  $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ), así como profundidades entre 400 y 1000 m, correspondientes a aguas de carácter intermedio y/o profundo.



**Figura 16.** Relación  $\text{PO}_4\text{-NO}_3$  para la eGC (a) y la sección del OP (b). La barra de colores indica la profundidad asociada al lance (hasta los 1000 m), mientras que la línea recta el ajuste lineal del conjunto de datos. Los lances de la eGC componen las estaciones 1-20 mientras que la sección del Pacífico las estaciones 67-77.

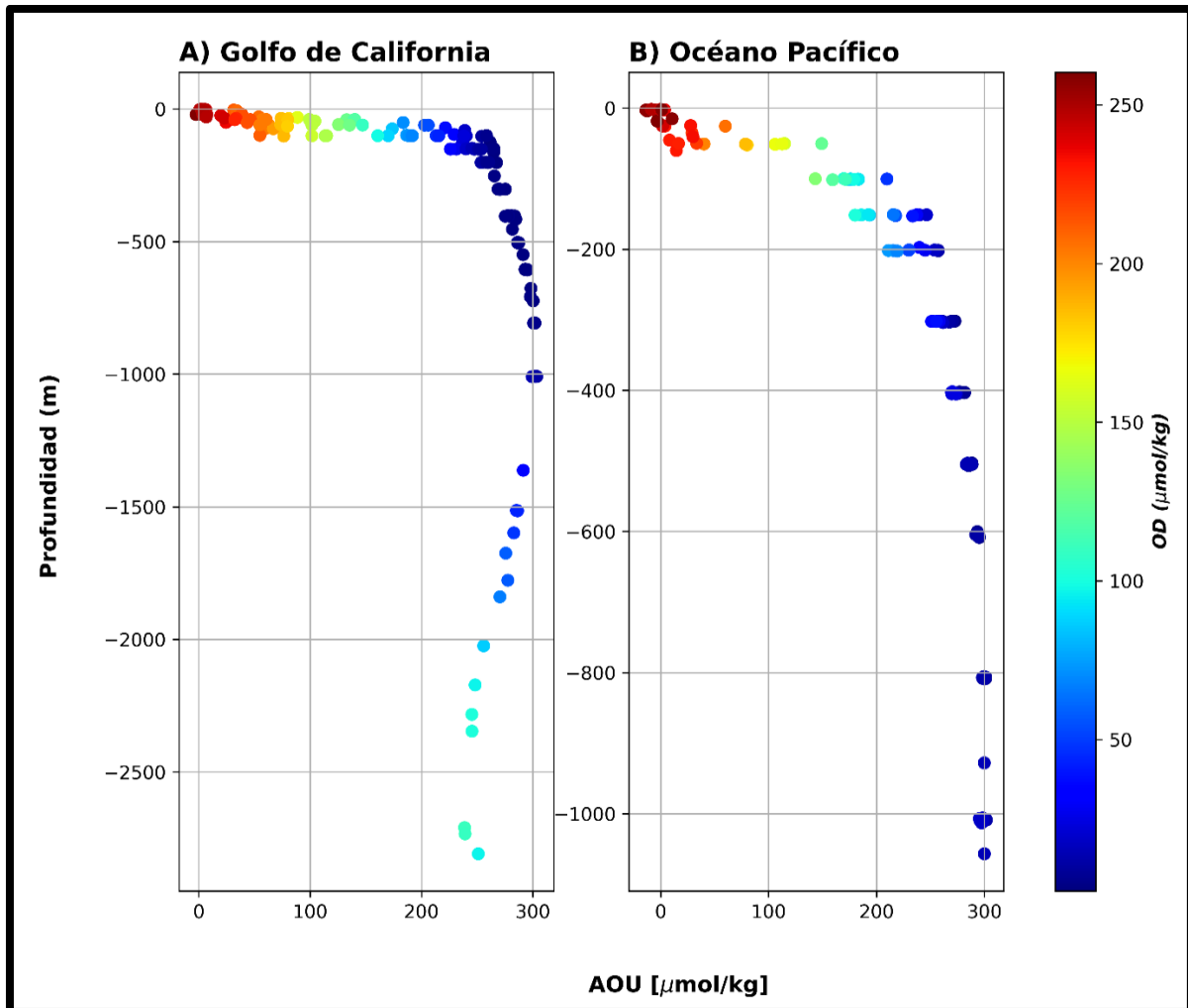
La razón  $\text{NO}_3:\text{PO}_4$  respecto a la profundidad (Fig. 17 a-c) complementa la regresión lineal entre ambas variables (Fig. 16) al mostrar la variación a lo largo de la columna de agua. El comportamiento entre la eGC (Fig. 17a) y el OP (Fig.17c) fue similar, con valores cercanos a 0 en superficie y un aumento conforme aumenta la profundidad, con valores más homogéneos en la eGC. En el OP se distinguen los lances al norte y sur de PEu, donde estos últimos tienen un valor de  $\text{NO}_3:\text{PO}_4$  menor respecto a los del norte a una misma profundidad. En ambas zonas, la relación  $\text{NO}_3:\text{PO}_4$  es menor a 16 (línea negra segmentada), lo que indica que tanto la eGC como el OP poseen un déficit de  $\text{NO}_3$  por procesos de desnitrificación (cuando  $\text{OD} < 20 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ), inclusive a las profundidades  $>2500$  m en la eGC (Paul *et al.*, 2024). Por otro lado, el trazador  $\text{N}^*$  (Fig. 17b-d) muestra la combinación lineal entre los valores de  $\text{NO}_3$  y  $\text{PO}_4$ , que indica el nivel de déficit de  $\text{NO}_3$  en la columna de agua (Paul *et al.*, 2024). En superficie, los valores de  $\text{N}^*$  son cercanos a 0 debido al agotamiento de estos nutrientes. En la eGC (Fig. 17b) se alcanza un mínimo de  $\sim -23 \mu\text{mol kg}^{-1}$  entre los  $\sim 200$ - $300$  m, para un posterior aumento hasta  $\sim -5 \mu\text{mol kg}^{-1}$  a los  $\sim 2500$  m. La disminución en  $\text{N}^*$  desde la superficie no es tan notoria en el OP (Fig. 17d) como se observa al seguir los lances a la altura de PEu (línea gris claro) y al sur de esta. Al norte de PEu, los perfiles de  $\text{N}^*$  son constantes y con poca desviación de los  $\sim 5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ , aunque son ligeramente mayores en superficie que en la parte profunda. Los valores disminuyen con la latitud, pues el mínimo a los  $\sim 300$  m es de  $\sim -20 \mu\text{mol kg}^{-1}$  ( $\sim -10 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) en el sur (norte). Lo anterior indica un mayor déficit de  $\text{NO}_3$  al sur de PEu que en el norte. Tanto en la eGC como en el OP el valor de  $\text{N}^*$  es menor a 0 a lo largo de toda la columna de agua. Los pocos valores de  $\text{N}^* > 0 \mu\text{mol kg}^{-1}$  observados en el OP pueden ser asociados a una muy ligera ganancia de  $\text{NO}_3$  por un proceso de fijación (Paul *et al.*, 2024).



**Figura 17.** Perfiles de  $\text{NO}_3^-$ - $\text{PO}_4$  (a, c) y  $\text{N}^*$  (b, d) respecto a profundidad. La barra de colores indica la concentración de OD. Los lanzes de la eGC componen las estaciones 1-20 mientras que la sección del Pacífico las estaciones 67-77. La sección del Pacífico se ve dividida en aquellas al norte ( $\bullet$ ) y sur ( $\blacktriangle$ ) de PEu, mientras que la línea gris indica la estación ubicada a la altura de esta.

La figura 18 muestra el patrón de la Utilización Aparente de Oxígeno (AOU) vs. profundidad para los transectos de la eGC (Fig. 18a) y el OP (Fig. 18b). En ambas figuras se registraron valores cercanos a  $0 \mu\text{mol kg}^{-1}$  cercano a la superficie, seguido de un aumento con la profundidad hasta un máximo de  $\sim 300 \mu\text{mol kg}^{-1}$  a  $\sim 1000 \text{ m}$ . Nótese como después de los  $1000 \text{ m}$  en la eGC (Fig. 18a) se presentó una ligera disminución del AOU hasta  $\sim 250 \mu\text{mol kg}^{-1}$  a los  $\sim 2500 \text{ m}$ , referente a la presencia de APP no registrada en OP (Fig. 18b). La AOU representa la cantidad estimada de  $\text{O}_2$  que se utilizó por procesos biogeoquímicos en relación a un valor inicial o preformado de la masa de agua. Valores altos indican un alto consumo de oxígeno por procesos de respiración de materia orgánica y valores bajos/cercanos a cero una buena ventilación y/o equilibrio cercano con la atmósfera (García *et al.*, 2019). Los mayores valores registrados coincidieron con los rangos de profundidad del ASsSt y AIP, ambas pertenecientes a la ZMO, lo que indica aguas altamente respiradas por procesos biológicos. Debajo de los  $1000 \text{ m}$ , existe un ligero descenso del AOU debido

a la presencia del APP, como se indicó en figuras anteriores (Fig. 15b). Las aguas superficiales, como el ACC y el AGC, poseen valores cercanos a  $0 \mu\text{mol kg}^{-1}$  de AOU por estar en constante contacto con la atmósfera, lo que también explica la alta oxigenación de estas masas de agua.



**Figura 18.** Perfiles de AOU de la eGC (a) y el OP (b) respecto a profundidad. Los lances de la eGC componen las estaciones 1-20 mientras que la sección del Pacífico las estaciones 67-77. La barra de colores indica la concentración de OD ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ).

## 6. Discusión: Propiedades químicas y nutrientes inorgánicos disueltos (P24)

---

La distribución vertical de los nutrientes presentó un perfil típico de nutrientes para el PO<sub>4</sub> (Fig. 14c-f) y NO<sub>x</sub> (Fig.14b-e) tanto en la eGC como en la sección del Pacífico. En estos perfiles se presenta un agotamiento superficial por la utilización por parte del fitoplancton y un enriquecimiento profundo hasta un máximo a los ~1000 m debido a la oxidación bacteriana de la materia orgánica (Millero, 2013). Esto también se denota en los perfiles de H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> (Fig. a-d), sin embargo, el aumento con la profundidad de este es más lento, donde el máximo se alcanza a los ~2000 m (Millero, 2013). Este patrón fue registrado previamente por Warsh *et al.* (1973) para la región de la eGC, que igualmente se presenta en las regiones oceánicas y costeras del OP (Bograd *et al.*, 2001; Millero, 2013). El máximo de H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> (~150 μmol kg<sup>-1</sup>) se observa en la eGC debido a que se alcanzan los ~2500 m, mientras que, en el OP, por el límite de la profundidad de los lances, no se distinguió la mayor concentración que se pudiese alcanzar. En comparación con otros nutrientes, el H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> es utilizado por diatomeas y radiolarios (principalmente) para incorporarlo como parte de su pared celular (frústulas en el caso de las diatomeas) en forma de ópalo biogénico. Por esta razón, la distribución vertical del H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> se determina por el hundimiento de estos organismos (Exley *et al.*, 2019). Los perfiles de NO<sub>x</sub> (Fig. 14b-e) y PO<sub>4</sub> (Fig. 14c-f) muestran un comportamiento semejante tanto para la región del Pacífico como de la eGC. Los valores mínimos (máximos) en superficie (profundidad) han sido reportados por diversos autores (Warsh *et al.*, 1973; Bograd *et al.*, 2001; Bustos-Serrano y Castro-Valdez, 2006) y representan un consumo y agotamiento por parte del fitoplancton en superficie seguido de un enriquecimiento subsuperficial y profundo dado por la regeneración en la columna de agua (oxidación bacteriana) (Bograd *et al.*, 2001; Chang *et al.*, 2012; Millero, 2013). Los valores bajos en la superficie son un reflejo de una mayor actividad del fitoplancton durante primavera, pues es el periodo donde se presentan surgencias y por ende un mayor crecimiento (Millero, 2013). Los perfiles de PO<sub>4</sub> acompañan a los de NO<sub>x</sub> ya que ambos son considerados como los nutrientes limitantes y se consumen para producir materia orgánica, por lo que es de esperar patrones semejantes y un rápido consumo en la capa superficial (Deutsch y Weber, 2012; Millero, 2013). Igualmente, este comportamiento de PO<sub>4</sub> también fue registrado por Warsh *et al.* (1973) para la región de la eGC y por Bustos-Serrano y

Castro-Valdez (2006) y Bograd *et al* (2001), además de seguir el patrón promedio planteado por Millero (2013) para la región del Pacífico Norte.

Figuras adicionales de nutrientes mostraron detalles específicos sobre ciertas propiedades químicas y físicas (Fig. 15). El comportamiento de la relación entre  $H_4SiO_4$  y  $NO_x$  (Fig. 15a-d) expone la tendencia de ambas variables conforme se incrementa la profundidad. El aparente ajuste de 2do. orden indica una diferencia entre la profundidad en la cual cada nutriente alcanza sus valores máximos (Millero, 2013, Paul *et al.*, 2024). Note como tanto en el GC (Fig.15a) como en el OP (Fig. 15d) el comportamiento entre ambas variables es aproximadamente lineal ( $H_4SiO_4: NO_x = 1$ ) hasta los  $\sim 20\text{-}25 \mu\text{mol kg}^{-1}$  de  $NO_x$ . Si bien esto puede ser debido a la escala del  $H_4SiO_4$ , debido a que en la eGC se alcanzan mayores concentraciones por contar con lances más profundos ( $\sim 2500$  m), el incremento del  $H_4SiO_4$  por debajo de los 400 m es mayor en el OP. Después de los  $\sim 20\text{-}25 \mu\text{mol kg}^{-1}$  (de  $NO_x$ ), el  $NO_x$  alcanzó su máximo a los  $\sim 1000$  m ( $> 40 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) mientras que el  $H_4SiO_4$  aumenta relativamente más rápido debido a que sus máximos se presentan debajo de esta profundidad, aproximadamente a los  $\sim 2000$  m (Warsh *et al.*, 1973; Millero, 2013, Paul *et al.*, 2024). Lo anterior se muestra en la eGC (Fig. 15a) donde las profundidades de muestreo alcanzaron  $\sim 2500$  m.

La relación  $\pi$ -OD (Fig. 15b-e) indica el cambio de masas de agua y propiedades termohalinas conforme se incrementa la profundidad. Las aguas superficiales (intermedias-profundas) presentaron valores de  $\pi$  mayores (menores), al tener mayores (menores) temperaturas y rangos de temperatura variables (Durazo y Baumgartner, 2002; Castro *et al.*, 2017; López-Avilés, 2024). Evidentemente, los valores de  $\pi$  superficial en la eGC ( $>3 \text{ kg m}^{-3}$ ) son mayores que los del OP ( $>1 \text{ kg m}^{-3}$ ) por contar con salinidades y temperaturas superiores (Portela *et al.*, 2016). Sin embargo, el OD es superior en el OP ( $\sim 250 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) por la mayor disolución del OD en agua de menor temperatura (Millero, 2013; Booth *et al.*, 2014; Castro *et al.*, 2019). Conforme aumenta la profundidad, el OD y  $\pi$  disminuyen progresivamente hasta valores de  $\sim 0 \mu\text{mol kg}^{-1}$  a los  $\sim 400$  m y  $\pi$  de  $\sim 1.8 \text{ kg m}^{-3}$  ( $\sim 1 \text{ kg m}^{-3}$ ) en la eGC (OP), profundidad donde se encuentra el ASsSt acompañada de la ZMO (Cepeda-Morales *et al.*, 2013; Gilly *et al.*, 2013; Durazo, 2015). En el GC (Fig. 15b) se denota un incremento de OD a partir de los  $\sim 1000$  m hasta  $100 \mu\text{mol kg}^{-1}$  (Warren, 1983; Ferreira *et al.*, 2018; Webb, 2020).

Observe cómo al norte (sur) de PEu (Fig.15e) los valores de  $\pi$  son menores (mayores), debido al cambio de propiedades termohalinas del ACC conforme incursiona al sur (ver Fig. 2; Portela *et al.*, 2016; Kurczyn *et al.*, 2019). El diagrama  $S_A$ - $H_4SiO_4$  (Fig. 15c-f), graficado con base en Warsh *et al.* (1973), refleja el cambio de propiedades halinas conforme incrementa la profundidad y las masas de agua presentes. En la eGC (Fig. 15c), la capa superficial posee un mayor rango de  $S_A$  (<34.5-35.5 g kg<sup>-1</sup>) debido a la presencia de ACC y AGC (Portela *et al.*, 2016; Larios-Muñiz *et al.*, 2022), mientras que la región del OP (Fig. 15f) muestra un rango más estrecho y de menor salinidad (<34.25 g kg<sup>-1</sup>) al dominar únicamente el ACC (Durazo, 2015; Kurczyn *et al.*, 2019). Este comportamiento fue descrito por Warsh *et al.* (1973) para la eGC, mismo que es resultante de la interacción de AGC, ACC y AT. A una misma profundidad, los mayores valores de  $H_4SiO_4$  se asocian a las salinidades más altas (Warsh *et al.*, 1973), tanto en la eGC como en el OP. Nótese cómo conforme incrementa la profundidad, el rango de salinidades se vuelve más estrecho y prácticamente con un único valor a una determinada profundidad, debido evidentemente al cambio de masa de agua. Debajo de los 300-400 m se presenta el ASsSt, posteriormente el AIP y en la capa más profunda (>1000 m; únicamente en la eGC) el APP. Debido a que en estas profundidades únicamente dominan dichas masas de agua, al no interactuar con otra masa en particular los valores de  $S_A$  se mantienen constantes, mientras los  $H_4SiO_4$  incrementan hasta su máximo a los ~2000 m (Millero *et al.*, 2013). En el OP (Fig. 15f) los valores de  $S_A$  al sur de PEu son mayores que al norte a una determinada profundidad. Así mismo, la barra de colores indica un aumento de  $H_4SiO_4$  en el norte a una profundidad dada.

La relación  $NO_3:PO_4$  muestra un aumento progresivo de ambas variables conforme aumenta la profundidad, con una tendencia lineal (Fig. 16). Los valores más altos se encuentran alrededor de los ~1000 m, mientras que en superficie rondan los ~0  $\mu\text{mol kg}^{-1}$  (ver Fig. 14). La pendiente informa sobre cuál podría ser el nutriente limitante para los productores primarios (Deutsch y Weber, 2012; Millero, 2013). Si bien esta proporción depende del ambiente marino y de la profundidad, en general se sigue la proporción planteada por Redfield (1958) 16N:1P para el fitoplancton, donde valores inferiores (superiores) indican un déficit (exceso) de  $NO_3$  en el para los organismos fitoplanctónicos (Deutsch y Weber, 2012; Millero, 2013; Paul *et al.*, 2024).

Tanto en la eGC, como en el OP, los valores de la pendiente fueron inferiores a 16, lo que indica un déficit de  $\text{NO}_3$  respecto a los valores de  $\text{PO}_4$  a una determinada profundidad. Además, hasta los 1000 m el valor de ambas pendientes fue muy semejante, pues en la eGC el valor de esta proporción fue ligeramente menor (14.48:1) que en el OP (14.49:1). Independientemente, la pendiente es mayor que los valores promedios planteados por [Deutsch y Weber \(2012\)](#) para capa superficial (10:1) e intermedia-profunda (14.3:1). Igualmente, la eGC presentó valores mayores que los registrados por [Chang et al. \(2012\)](#) para la región del Pacífico Tropical Mexicano del Noreste asociada a la ZMO, tanto en superficie (14.3:1) como en las zonas profundas (13:1-10:1). Como contraste, el valor promedio planteado por [Millero \(2013\)](#) para la zona del Pacífico Norte es 15.3:1, donde nuestras mediciones del OP y GC se encuentran por debajo del valor promedio de la cuenca. Si bien las concentraciones de ambos nutrientes son muy limitadas en la capa superficial para ambas zonas, nótese cómo el  $\text{NO}_3$  se agota primero que el  $\text{PO}_4$  (Ver anexo 5) ([Chang et al., 2012](#); [Millero, 2013](#); [Paul et al., 2024](#)). Respecto a la profundidad, la relación  $\text{NO}_3:\text{PO}_4$  (Fig. 17) muestra un comportamiento esperado de baja proporción en superficie por consumo y un aumento con la profundidad hasta un máximo a los ~1000 m (ver Fig. 15) debido a la ganancia de nutrientes por remineralización. El promedio de la cuenca del Pacífico Norte planteado por [Millero \(2013\)](#) es de 15:1 para aguas profundas (~1000 m), valor muy por encima de los observados tanto en la eGC como en el OP. Sin embargo, [Deutsch y Weber \(2012\)](#) indican que en el OP existe una disminución desde ~13:1 a los 400 m hasta ~0:1 en superficie, observable en la figura del OP (Fig. 17c), con cierta variación entre la región sur (menor) y norte (mayor) de PEu. La región de la eGC no expone este patrón debido a que sufre un rápido aumento de  $\text{NO}_3:\text{PO}_4$  por debajo de los ~300 m, donde comienza la ZMO ([Gilly et al., 2013](#); [Trucco-Pignata et al., 2019](#)). En ambos casos, la columna de agua presenta valores de  $\text{NO}_3:\text{PO}_4$  inferiores a los 16:1 ideales para el crecimiento y consumo de fitoplancton, lo que categoriza a ambas zonas de estudio como limitadas por  $\text{NO}_3$  ([Deutsch y Weber, 2012](#); [Millero, 2013](#); [Paul et al., 2024](#)). Al norte de PEu los valores de  $\text{NO}_3:\text{PO}_4$  son relativamente mayores que la contraparte sur, lo que distingue un ambiente ligeramente más enriquecido en  $\text{NO}_x$  en la zona norte del transecto. Complementario a estas observaciones, la combinación lineal entre  $\text{NO}_3$  y  $\text{PO}_4$ ,  $\text{N}^*$  (Fig.17b-d), se puede emplear para observar la distribución de la fijación y desnitrificación en el océano.

Además, es una forma de observar la “velocidad” o tasa de aumento de ambos nutrientes con la profundidad. En la eGC (Fig. 17b) se observan valores más cercanos al  $0 \mu\text{mol kg}^{-1}$  ( $\sim 2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) en superficie y una disminución hasta un mínimo ( $\sim 20 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) a los  $\sim 250$  m, seguido de un aumento progresivo hasta valores de  $\sim 5$  a los  $\sim 2500$  m. Lo anterior explica que, en superficie, los valores de  $\text{NO}_3$  y  $\text{PO}_4$  son muy bajos, aunque en proporción el  $\text{PO}_4$  es ligeramente mayor. El aumento posterior hasta  $\sim 2500$  m proviene del comienzo de ganancia de  $\text{NO}_3$  por debajo de los  $\sim 300$  m (comienzo de la pendiente en Fig. 16a) debido a la que, al estar en la ZMO, se presenta una menor pérdida de  $\text{NO}_3$  por desnitrificación. Este comportamiento es semejante al observado en el OP, donde la línea gris (PEu) indica una tendencia similar pero menos marcada. Independientemente, se registró un mínimo de  $\sim 12 \mu\text{mol kg}^{-1}$  ( $\sim 6 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) en el sur (norte) de PEu, lo que indica que existe un mayor déficit de  $\text{NO}_3$  en la columna de agua en el OP conforme se incrementa la profundidad (Deutsch y Weber, 2012), tanto al norte como al sur de PEu, aunque nótese que la zona sur posee los menores valores, mismo que se corrobora con lo descrito en la Fig. 17c. Tanto en la eGC, como en el OP, los valores de  $\text{N}^*$  son menores a  $0 \mu\text{mol kg}^{-1}$  en toda la columna de agua, lo que indica que el  $\text{NO}_3$  fue transportado hacia el polo mediante el ASsSt y se mezcló hacia capas superiores durante la incursión (Gruber y Sarmiento, 1997; Deutsch y Weber, 2012; Davis *et al.*, 2019).

La AOU es una forma de representar el  $\text{O}_2$  que se utilizó por procesos biogeoquímicos en relación a un valor preformado (Fig. 18) (García *et al.*, 2019). Como tal, es una medida de qué tan “respirada” o utilizada se encuentra una masa de agua. Es de esperar que las aguas superficiales tengan valores cercanos a  $0 \mu\text{mol kg}^{-1}$  e inclusive ligeramente negativos, debido a que son aguas superficiales que constantemente se encuentran en proceso de ventilación e intercambio con la atmósfera (Millero, 2013; Paul *et al.*, 2024). El agua intermedia y profunda cuentan con valores elevados debido a que son masas de agua más viejas y que poseen menor OD debido a la utilización para procesos de oxidación bacteriana (Millero, 2013). Los perfiles de AOU son prácticamente inversos a los de OD, pues estos últimos poseen sus mayores (menores) valores en la capa superficial (profunda), aunque expresan información diferente. Cabe resaltar que este comportamiento de bajos valores de AOU en superficie y un aumento con la profundidad se presenta en diversos océanos como en Océano Índico (Paul *et al.*, 2024), debido a generalmente

las capas intermedias/profundas poseen aguas más viejas y, por ende, más respiradas (Millero, 2013). Nótese cómo tanto en la eGC como en el OP se alcanzan valores máximos de AOU ( $\sim 300 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) a los  $\sim 1000$  m, aunque en la eGC se observa un aumento muy rápido en los primeros 100-300 m, referente a la ZMO más notoria en esta zona (Cepeda-Morales *et al.*, 2013; Gilly *et al.*, 2013; Trucco-Pignata *et al.*, 2019).

## 7. Conclusiones

---

El análisis de las propiedades hidrográficas obtenidas durante los cruceros Western Flyer (W-F) y PESCAR24 (P24) mostró un comportamiento estacional del Sistema de la Corriente de California (SCC), con mayor intensidad del Brazo Tropical de la Corriente de California (BTCC) en primavera que en invierno. No obstante, en ambas temporadas se identificó un flujo neto hacia el sur del Agua de la Corriente de California (ACC), caracterizada por bajas temperaturas y salinidades en la capa superficial (50–100 m). Debido a que el ACC incrementa su salinidad y temperatura al avanzar hacia el sur, se requirió aplicar dos clasificaciones termohalinas (Portela *et al.*, 2016; Kurczyn *et al.*, 2019) para definir las masas de agua al norte y al sur de la península de Baja California (PBC). Esta distinción se complementó con la interacción entre el ACC y el Agua del Golfo de California (AGC) en la punta de la península (pPBC), donde se formó Agua Transicional (AT) con propiedades físicas intermedias.

En la capa subsuperficial (250–300 m), el flujo hacia el norte asociado a la *California Undercurrent* (CU) fue más intenso durante la primavera, como se observó en las figuras de reanálisis. La actividad de mesoescala fue evidente a lo largo de la columna de agua, con mayor intensidad en invierno (primavera) en la capa subsuperficial (superficial) y en la zona costera y oceánica. El intercambio de aguas entre el Océano Pacífico (OP) y la entrada del Golfo de California (eGC) presentó un patrón anticiclónico persistente en ambas temporadas, visible tanto en imágenes de reanálisis como en los datos de corriente obtenidos mediante ADCP. Asimismo, las figuras sobre densidad frente a la pPBC mostraron la entrada del ACC hacia el interior del GC y su interacción con el AGC para la formación de AT, tanto en la capa superficial ( $24.5 \text{ kg m}^{-3}$ ) como en la subsuperficial ( $25.25 \text{ kg m}^{-3}$ ). En la sección radial,

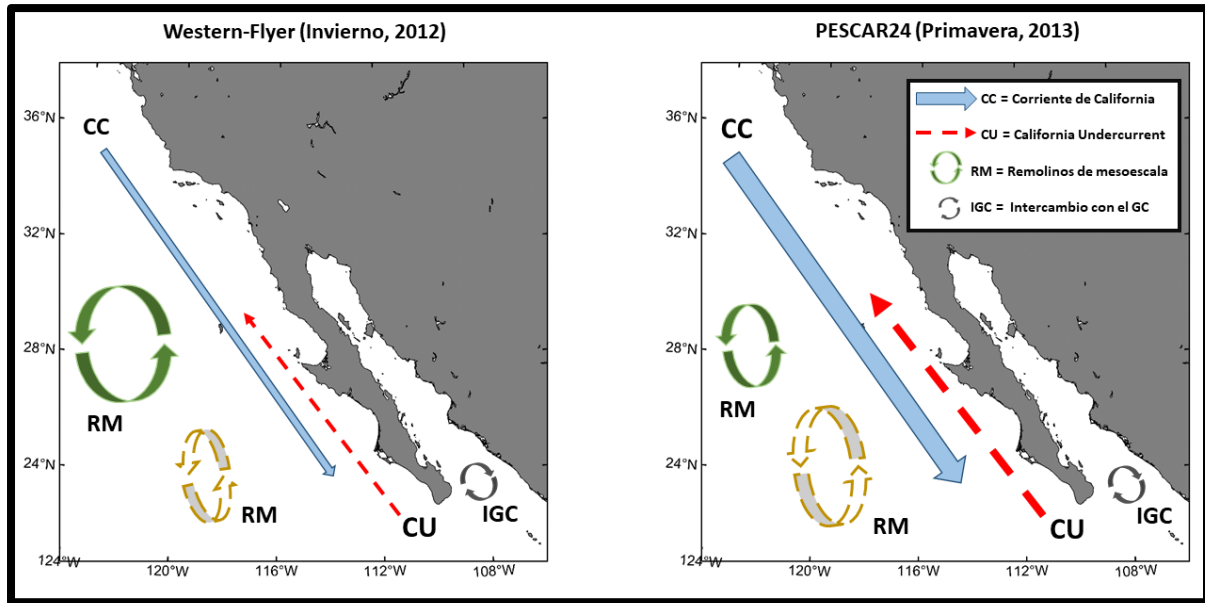
las figuras de profundidad revelaron la presencia de un remolino ciclónico y anticiclónico frente a la pPBC, previamente descritos por [Larios-Muñiz et al. \(2022\)](#).

La capa subsuperficial se mantuvo dominada por Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt), con bajas concentraciones de oxígeno disuelto (OD). En esta capa, la Zona de Baja Oxigenación (ZLO,  $<60 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) abarcó toda el área de estudio, mientras que la Zona Mínima de Oxígeno (ZMO,  $<20 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) se extendió hasta aproximadamente los  $26^{\circ}\text{N}$  en invierno y los  $27^{\circ}\text{N}$  en primavera, con un patrón de hundimiento hacia el norte.

Durante la primavera, los nutrientes inorgánicos disueltos (NID) presentaron un perfil tipo-nutriente típico, con concentraciones máximas en la eGC, favorecidas por las mayores profundidades registradas ( $\sim 2500 \text{ m}$ ). El análisis de la sección del OP evidenció la existencia de dos provincias, separadas por Punta Eugenia ( $\sim 28^{\circ}\text{N}$ ): la zona norte presentó mayores concentraciones de nutrientes y menor *spiciness* ( $\pi$ ), mientras que la zona sur mostró el patrón inverso. La relación  $\text{NO}_3:\text{PO}_4$  indicó condiciones de déficit de nitrógeno tanto en la eGC como en el OP a lo largo de la columna de agua, con un déficit más pronunciado en la provincia sur del OP. Además, esta relación resultó mayor en la eGC, lo que sugiere un entorno con mayor enriquecimiento de nitrato en profundidad.

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda utilizar límites termohalinos específicos para la zona y temporada de muestreo, ya que las características de las masas de agua pueden variar según la estación o por eventos interanuales (no abordados en este estudio). Las figuras construidas en función de capas isopícnas demostraron ser herramientas útiles para identificar la distribución y el alcance de las masas de agua, así como para distinguir estructuras termohalinas que no se aprecian con el análisis en función de la profundidad. Además, la integración de datos de corrientes *in situ*, como los proporcionados por ADCP y SADC, complementó los análisis de reanálisis y ofreció mayor resolución en la detección de corrientes locales, influenciadas por estructuras de mesoescala. Se sugiere profundizar la investigación de NID en la región del OP y de la eGC, ya que la escasez de bibliografía revela una falta de información sobre la distribución vertical, zonal, latitudinal y estacional de

nutrientes esenciales como  $\text{NO}_3$ ,  $\text{PO}_3$  y  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  para el fitoplancton regional. Este estudio busca aportar un análisis preliminar que caracterice el comportamiento general de dichos nutrientes y relaciones biogeoquímicas en la región del OP y la eGC.



**Figura 19.** Esquema de los principales rasgos físicos y de circulación observados en el presente estudio después del análisis de los cruceros Western-Flyer (febrero, 2012) y PESCAR24 (abril, 2013). El grosor (tamaño) de los rasgos es indicativo de su intensidad o magnitud.

## Referencias

---

- Bograd, S., Chereskin, T. y Roemmich, D. (2001). Transport mass, heat, salt, and nutrients in the southern California Current System: Annual cycle and interannual variability. *Journal of Geophysical Research*, 106(C5): 9255-9275 pp.
- Bograd, S. y Lynn, R. (2003). Anomalous subarctic influence in the southern California Current during 2002. *Geophysical Research Letters*, 30(15). <https://doi.org/10.1029/2003GL017446>
- Booth, J., Woodson, C., Sutula, M., Micheli, F., Weisberg, S., Bograd, S., Steele, A., Schoen, J. y Crowder, L. (2014). Patterns and potential drivers of declining oxygen content along the southern California coast. *Limnology and Oceanography*, 59(4): 1127-1130 pp. <https://doi.org/10.4319/lo.2014.59.4.1127>
- Bray, N. (1988). Water mass formation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 93(C8): 9223-9240 pp. <https://doi.org/10.1029/JC093iC08p09223>.
- Bray, N. y Greengrove, C. (1993). Circulation over the shelf and slope off northern California. *Journal of Geophysical Research*, 98(C10): 18,119-18,145 pp. [doi:10.1029/93JC01142](https://doi.org/10.1029/93JC01142).
- Bustos-Serrano, H. y Castro, R. (2006). Flux of nutrients in the Gulf of California: Geostrophic approach. *Marine Chemistry*, 99: 210-219 pp.
- Castro, R., Collins, C., Rago, T., Margolina, T. y Navarro-Olache, L. (2017). Currents, transport, and termohaline variability at the entrance of the Gulf of California (19-21 April 2013). *Ciencias Marinas*, 43(3): 173-190 pp. <http://dx.doi.org/10.7773/cm.v43i3.2771>
- Castro, R., Lavín, M., y Ripa, P. (1994). Seasonal heat balance in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99: 3249-3261 pp. <https://doi.org/10.1029/93JC02861>.
- Castro, R. y Martínez, J. (2010). Variabilidad espacial y temporal del campo de viento. En *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California 1997-2007* (129-149 pp.). Ensenada, Baja California: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Castro, R., Mascarenhas, A., Durazo, R. y Collins, C. (2000). Seasonal variation of the temperature and salinity at the entrance to the gulf of California, Mexico. *Ciencias Marinas*, 26(4): 561-583 pp. <https://doi.org/10.7773/cm.v26i4.621>
- Castro, R., Durazo, R., Mascarenhas, A., Collins, C. y Trasviña, A. (2006). Thermohaline variability and geostrophic circulation in the southern portion of the Gulf of California. *Deep Sea Research*, 53: 188-200. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2005.09.010>
- Cepeda-Morales, J., Gaxiola-Castro, G., Beier, E., y Godínez, V. M. (2013). The mechanisms involved in defining the northern boundary of the shallow oxygen minimum zone in the eastern tropical Pacific Ocean off Mexico. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 76, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2013.02.004>
- Chang, B., Devol, A. y Emerson, S. (2012). Fixed nitrogen loss from the eastern tropical North Pacific and Arabian Sea oxygen deficient zones determined from measurements of N<sub>2</sub>:Ar. *Global Biogeochemical Cycles*, 26. <https://doi.org/10.1029/2011GB004207>

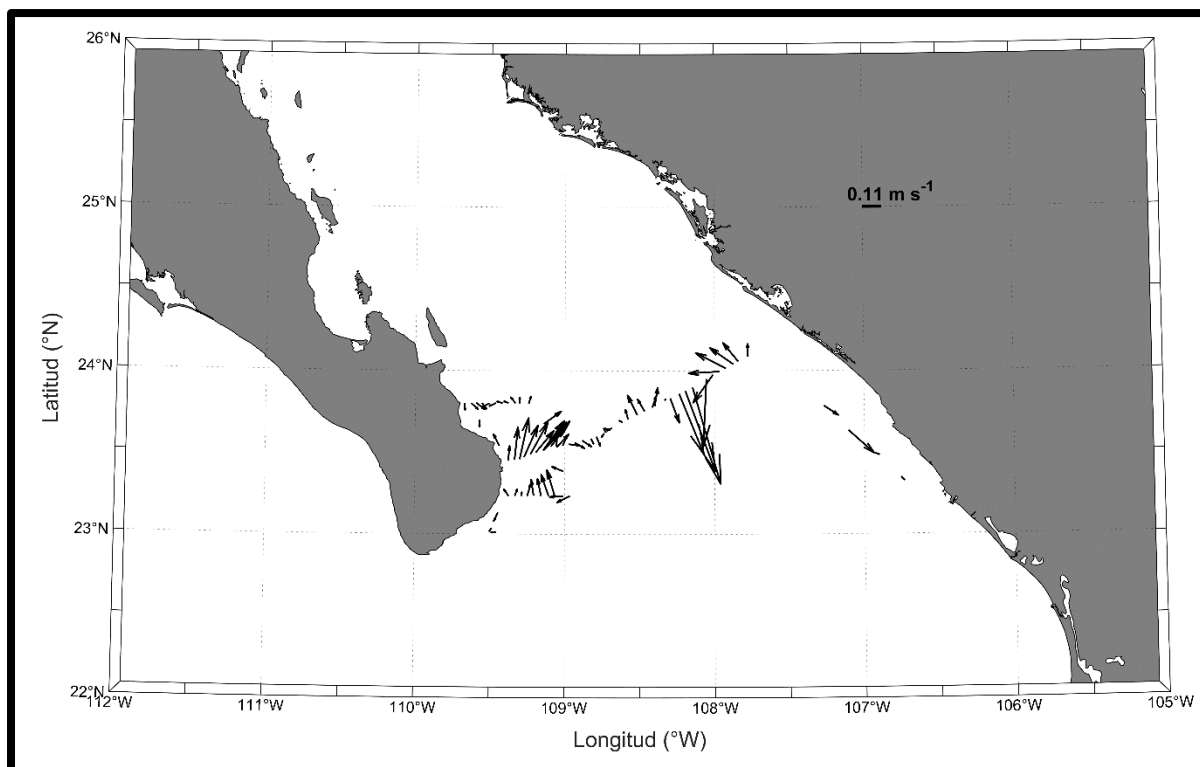
- Chasco, B., Hunsicker, M., Jacobson, K., Welch, O., Morgan, C., Muhling, B. y Harding, J. (2022). Evidence of temperature-driven shifts in market squid *Doryteuthis opalescens* densities and distribution in the California Current ecosystem. *Marine and Coastal Fisheries*, 14: 1-13 pp. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay3188>.
- Checkley, D. y Barth, J. (2009). Patterns and processes in the California Current System. *Progress in Oceanography*, 83: 49-64 pp. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.028>
- Collins, C. y Castro, R. (2022). Observations of the Exchange of Ocean Waters Between the Pacific Ocean and the Gulf of California. *Ocean and Coastal Research*, 70: 24 pp.
- Deutsch, C. y Weber, T. (2012). Nutrient Ratios as a Tracer and Driver of Ocean Biogeochemistry. *Annual Review of Marine Science*, 4: 113-141 pp. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120709-142821>
- Durazo, R. (2003). Oceanographic studies off Baja California: The IMECOCAL program. En 2002 IAMSLIC Conference Proceedings. Mazatlán, Sinaloa, México: Association of Aquatic and Marine Science Libraries and Information Centers.
- Durazo, R. (2015). Seasonality of the transitional region of the California Current System off Baja California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120: 1173-1196 pp. <https://doi.org/10.1002/2014JC010405>
- Durazo, R. y Baumgartner, T. (2002). Evolution of Oceanographic conditions off Baja California: 1997-1999. *Progress in Oceanography*, 54: 7-31 pp. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(02\)00041-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00041-1)
- Espinosa-Carreón, L. y Escobedo-Urías, D. (2017). South region of the gulf of California large marine ecosystem upwelling, fluxes of CO<sub>2</sub> and nutrients. *Environmental Development*, 22: 42-51 pp. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2017.03.005>
- Evans, N., Boles, E., Kwiecinski, J., Mullen, S., Wolf, M., Devol, A., Moriyasu, R., Nam, S., Babbin, A. y Moffett, J. (2020). The role of water masses in shaping the distribution of redox active compounds in the Eastern Tropical North Pacific oxygen deficient zone and influencing low oxygen concentrations in the eastern Pacific Ocean. *Limnology and Oceanography*, 65(8): 1688-1705 pp. <https://doi.org/10.1002/lno.11412>.
- Exley, C., Guerreiro, G. y Lopez, X. (2019). Silicic acid: The omniscient molecule. *Science of the Total Environment* 665: 432-437 pp. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.197>
- Ferreira, D., Cessi, P., Coxall, H., de Boer, A., Dijkstra, H., Brijfhout, S., Eldevik, T., Harnik, N., McManus, J., Marshall, D., Nilsson, J., Roquet, F., Schneider, T. y Wills, R. (2018). Atlantic-Pacific Asymmetry in Deep Water Formation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 46: 327-352 pp. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-082517-010045>
- Garcia, H., Weathers, K., Paver, C., Smolyar, I., Obyer, T., Locarnini, R., Zwerg, Mishonov, A., Baranova, O., Seidov, D. y Reagan, J. (2019). World Ocean Atlas 2018, Volume 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Dissolved Oxygen Saturation. A. Mishonov Technical Editor. NOAA Atlas NESDIS 83, 38 pp.
- Garcia, H. y Gordon, L. (1992). Oxygen solubility in seawater: Better fitting equations. *Limnol. Oceanogr.*, 37: 1307-1312 pp.
- Gill, A. (1982). Atmosphere-ocean dynamics (Vol. 30). Academic press.

- Gilly, W., Beman, M., Litvin, S. y Robison, B. (2013). Oceanographic and Biological Effects of Shoaling of the Oxygen Minimum Zone. *Annual Review of Marine Science*, 5: 383-420 pp. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120710-100849>
- Godínez, V., Beier, E., Lavín, M. y Kurczyn, J. (2010) Circulation at the entrance of the Gulf of California from satellite altimeter and hydrographic observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115: 1–15 pp. <https://doi.org/10.1029/2009JC005705>.
- Gómez-Valdivia, F. (2016). Estudio de la circulación frente a la costa occidental de Baja California: modelación numérica y observaciones. Tesis de doctorado. CICESE
- Griffiths, R. (1968). Physical, chemical, and biological oceanography of the entrance to the Gulf of California, spring 1960. *US Fish. Wild. Serv. Spec. Sci. Rep. Fish* 573, 1–47
- Hickey, B. (1979). The California Current System – hypotheses and facts. *Progress in Oceanography*, 8: 191-279 pp.
- IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission), SCOR & IAPSO (International Association for the Physical Sciences of the Oceans) (2010). Manual and Guides No. 56: The international thermodynamic equation of seawater-2010: calculation and use of thermodynamic properties. Paris: UNESCO/SCOR/IAPSO.
- Kämpf, J. y Chapman, P. (2016). The Functioning of Coastal Upwelling Systems. In: *Upwelling Systems of the World*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42524-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42524-5_2)
- Kessler, W. (2006). The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2-4): 181-217 pp. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.009>
- Kurczyn, J., Beier, E., Lavín, M. y Chaigneau, A. (2012) Mesoscale eddies in the northeastern Pacific tropical-subtropical transition zone: Statistical characterization from satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 117(C10). <https://doi.org/10.1029/2012JC007970>.
- Kurczyn, J., Pérez-Brunius, P., López, M., Candela, J., Delgadillo-Hinojosa, F. y García-Mendoza, E. (2019). Water Masses and Ocean Currents Over the Continental Slope off Northern Baja California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124: 2803-2823 pp. <https://doi.org/10.1029/2018JC013962>.
- Larios-Muñiz, M., González-Silvera, A., Castro, R., Santamaría-del-Ángel, E., Collins, C. y López-Calderón, J. (2022). Variability of hydrographic factors, biomass and structure of the phytoplankton community at the entrance to the Gulf of California (spring 2013). *Continental Shelf Research*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104665>
- Lavín, M. y Marinone, S. (2003). An Overview of the Physical Oceanography of the Gulf of California. En *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Ensenada, Baja California México: Springer+Business Media Dordrecht.
- Lavín, M., Castro, R., Beier, E., Godínez, V., Amador, A. y Guest, P. (2009). SST, thermohaline structure, and circulation in the southern Gulf of California in June 2004 during the North American Monsoon Experiment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C2): 22 pp. <https://doi.org/10.1029/2008JC004896>

- López-Avilés, B., Beier, E., Duran, R., Gómez-Valdés, J., Castro, R., Sánchez-Velasco, L. (2024). The California current system off Baja California Sur, Progress in Oceanography. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103225>
- Lynn, R. (1967). Seasonal variation of temperature and salinity at 10 m in the California Current, CalCOFI Rep. 11, pp. 157-186, Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest., La Jolla, 1967.
- Lynn, R. y Simpson, J. (1987). The California Current System: The Seasonal Variability of its Physical Characteristics. Journal of Geophysical Research, 92(C12): 12,947-12,966 pp.
- McDougall, T. y Krzysik, O. (2015). Spiciness. Journal of Marine Research, 73(5): 141-152 pp. [https://elischolar.library.yale.edu/journal\\_of\\_marine\\_research/408/](https://elischolar.library.yale.edu/journal_of_marine_research/408/)
- McPhaden, M., Athulya, K., Girishkumar, M. y Orlić, M. (2024). Ekman revisited: Surface currents to the left of the winds in the Northern Hemisphere. Science Advances, 10. doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr0282>
- Millero, F. (2013). Chemical Oceanography (3ª Edición). CRC Press.
- Álvarez-Rodríguez, N. (2013). Relación entre la profundidad de la oxiclina y la actividad de mesoescala en la Entrada al Golfo de California [TESIS]. CICESE.
- Paul, M., Sanyal, P., Mukherjee, R., Gupta, V., Bakshi, S., Acharya, A., Bhattacharya, T., Chakraborty, K. y Mukhopadhyay, S. (2024). Distribution and biogeochemical perspectives of nutrients in the Eastern Equatorial Indian Ocean. Oceanologia, 66: 381-393 pp. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2024.02.005>
- Pitz, K., Guo, J., Johnson, S., Campbell, T., Zhang, H., Vrijenhoek, R., Chavez, F. y Geller, J. (2020). Zooplankton biogeographic boundaries in the California Current System as determined from metabarcoding. PLOS ONE, 15(6), e0235159. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235159>
- Portela, E., Beier, E., Barton, E., Castro, R., Godínez, V., Palacios-Hernández, E., Fiedler, P., Sánchez-Velazco, L. y Trasviña, A. (2016). Water Masses and Circulation in the Tropical Pacific off Central Mexico and Surrounding Areas. Journal of Physical Oceanography, 46(10): 3069-3081 pp. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0068.1>
- Rago, T., Castro, R., Margolina, T., Blum, M., Wheeler, A. y Collins, C. (2013). Physical Measurements of Water Properties across the Mouth of the Gulf of California during April 2013, Tech. Rep. NPS-OC13001, 142 pp. Nav. Postgrad. Sch., Monterey, Calif.
- Redfield, A. (1958). The biological control of chemical factors in the environment. Am. Sci. 46:205–21 pp.
- Schultz, C., Dunne, J., Liu, X., Drenkard, E. y Carter, B. (2024). Characterizing subsurface oxygen variability in the California Current System (CCS) and its links to water mass distribution. Journal of Geophysical Research: Oceans, 129. <https://doi.org/10.1029/2023JC020000>
- Schwartzlose, R. (1963). Nearshore currents of the western United States and Baja California as measured by drift bottles. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Progress Report, 7 1-60 to 6-3-62, Marine Research Committee, California Department of fish and Game, Sacramento, California: 15-22 pp.
- Snyder, M., Sloan, L., Diffenbaugh, N. y Bell, J. (2003). Future climate change and upwelling in the California Current. Geophysical Research Letters, 30(15): 1-4 pp. <https://doi.org/10.1029/2003GL017647>.

- Talley, L. (1993). Distribution and Formation of North Pacific Intermediate Water. *Journal of Physical Oceanography*, 23: 517-537 pp. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1993\)023<0517:DAFONP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1993)023<0517:DAFONP>2.0.CO;2)
- Talley, L., Nagata, Y., Fujimura, M., Nagata, Y., Iwao, T., Kono, T., Inagake, D., Hirai, M. y Okuda, K. (1995). North Pacific Intermediate Water in the Kuroshio/Oyashio Mixed Water Region. *Journal of Physical Oceanography*, 25: 475-501 pp. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1995\)025<0475:NPIWIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1995)025<0475:NPIWIT>2.0.CO;2).
- Tetard, M., Licari, L. y Beaufort, L. (2017). Oxygen history off Baja California over the last 80kyr: A new foraminiferal-based record. *Paleocenography*, 32: 246-264 pp. <https://doi.org/10.1002/2016PA003034>.
- Trucco-Pignata, P., Hernández-Ayón, J., Santamaria-del-Ángel, E., Beier, E., Sánchez-Velasco, L., Godínez, V. M., y Norzagaray, O. (2019). Ventilation of the upper oxygen minimum zone in the coastal region off Mexico: implications of El Niño 2015–2016. *Frontiers in Marine Science*, 6, 459. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00459>.
- Ueno, H., Bracco, A., Barth, J. A., Budyansky, M. V., Hasegawa, D., Itoh, S., Kim, S. Y., Ladd, C., Lin, X., Park, Y. G., Prants, S., Ross, T., Rypina, I. I., Sasai, Y., Trusenkova, O. O., Ustinova, E. I., & Zhong, Y. (2023). Review of oceanic mesoscale processes in the North Pacific: Physical and biogeochemical impacts. *Progress in Oceanography*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102955>
- Warren, B. (1983). Why Is no deep water formed in the North Pacific? *Journal of Marine Research*, 41(2): 327-347 pp. [https://elischolar.library.yale.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2684&context=journal\\_of\\_marine\\_research](https://elischolar.library.yale.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2684&context=journal_of_marine_research)
- Warsh, C., Warsh, K. y Staley, R. (1973). Nutrients and water masses at the mouth of the Gulf of California. *Deep-Sea Research*, 20(1): 561-570 pp.
- Wyllie, J. (1966). California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations - Atlas No. 4 (Vol. 4). CALCOFI.
- Wyrtki, K. (1965). Surface currents of the eastern tropical Pacific Ocean. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin*, 9(5): 268-305 pp.
- You, Y. (2003). The pathway and circulation of North Pacific Intermediate Water, *Geophysical Research Letters*, 30(24): 2291. <https://doi.org/10.1029/2003GL018561>

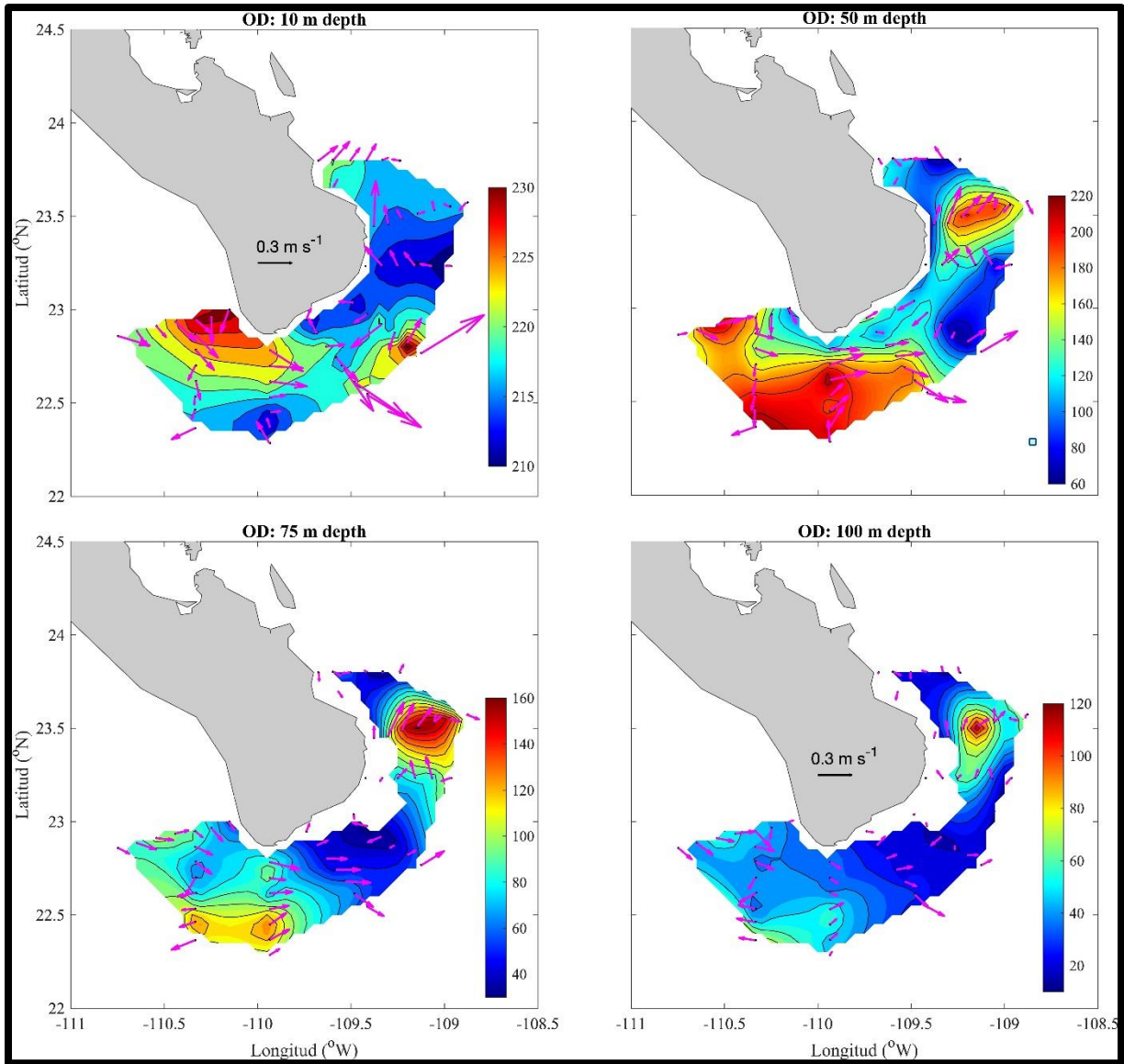
## Anexos



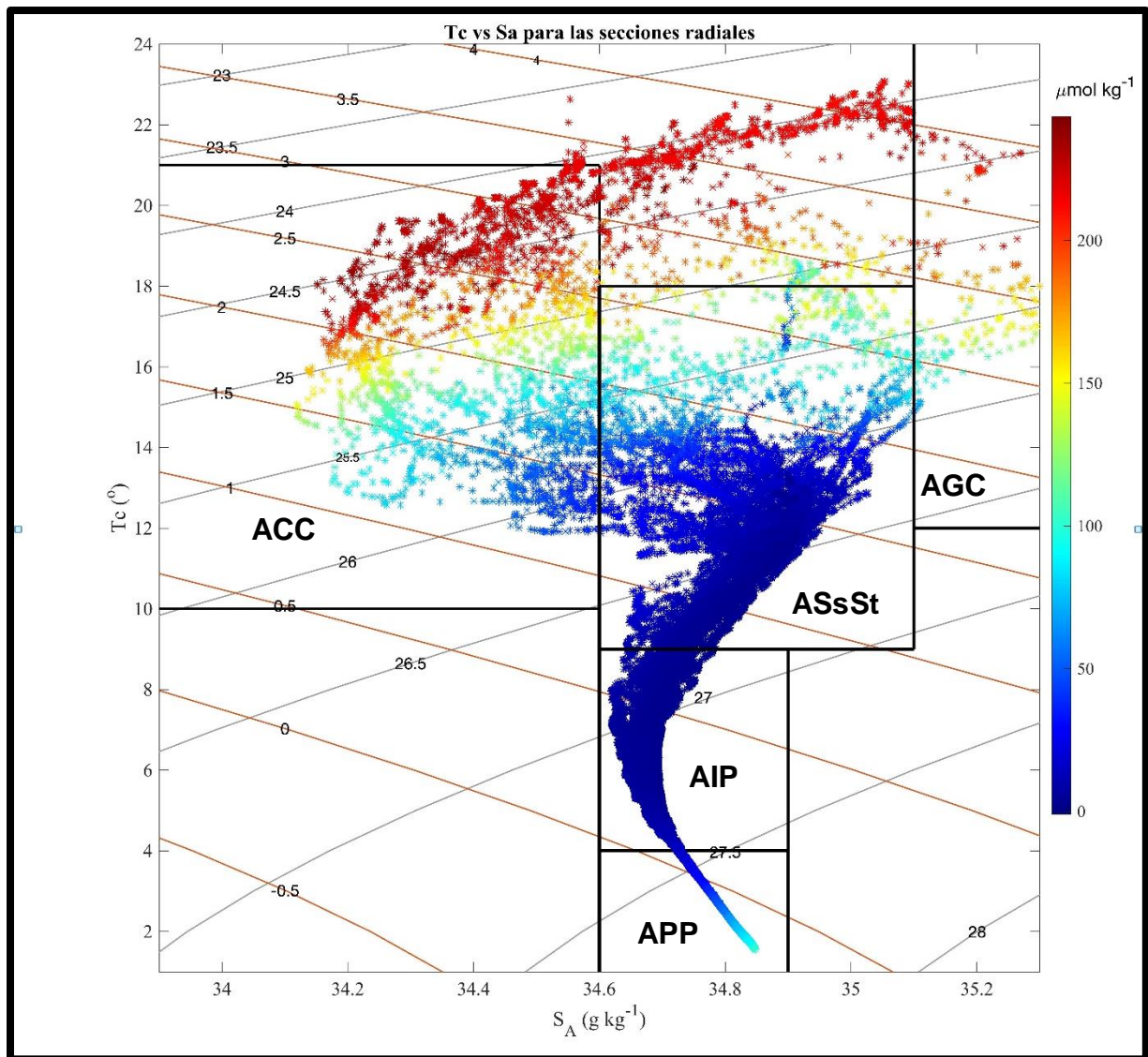
**Anexo 1.** Corrientes medidas con ADCP, promediadas entre 50-100 m, para la entrada al Golfo de California referentes al crucero PESCAR24.

**Anexo 2.** Límites termohalinos empleados para la clasificación de masas de agua.

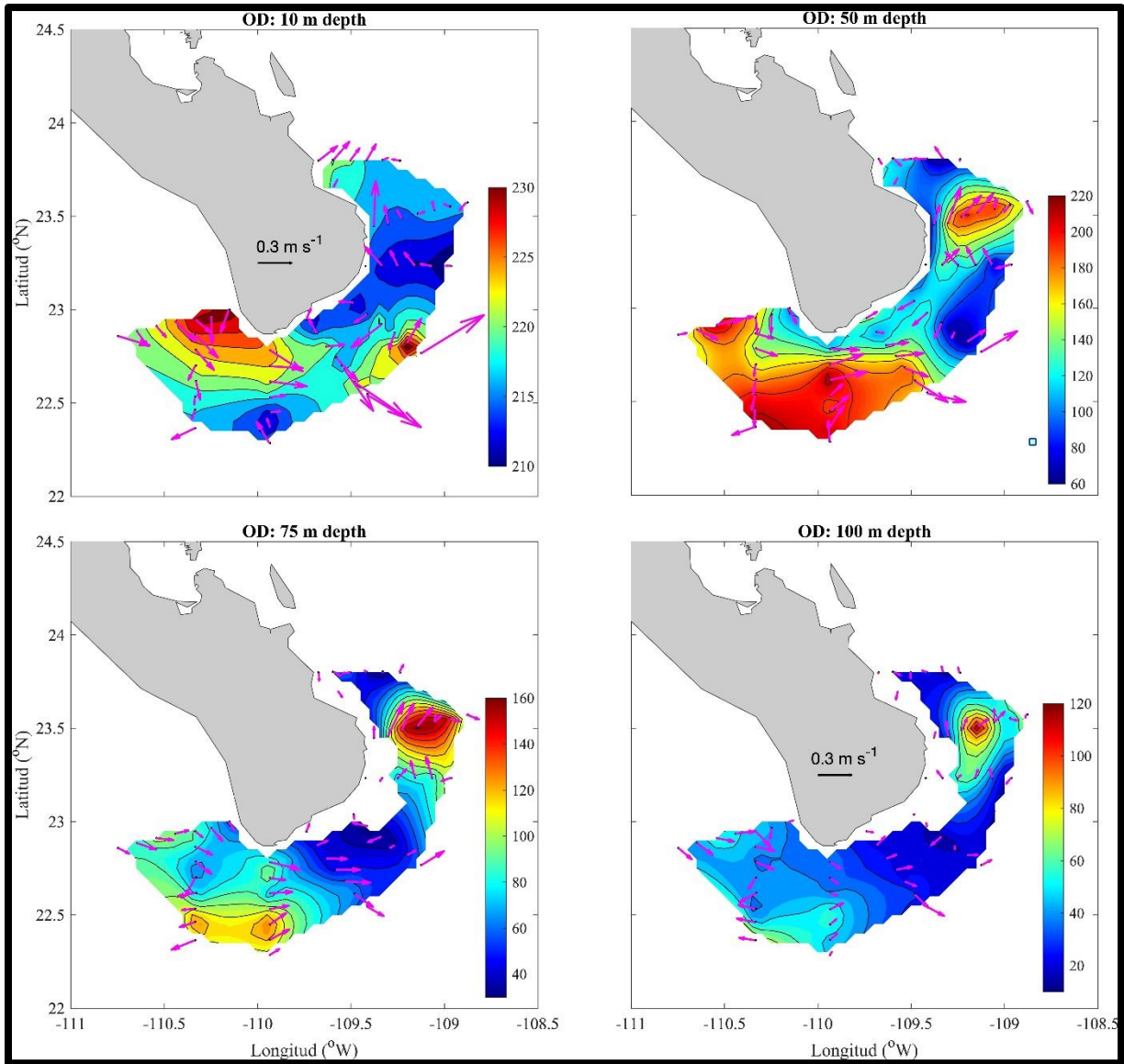
	<b>Portela et al. (2016)</b>		<b>Kurczyn et al. (2019)</b>		
	Temperatura (°C)	Salinidad (g kg <sup>-1</sup> )	Temperatura (°C)	Salinidad (g kg <sup>-1</sup> )	Densidad (kg m <sup>-3</sup> )
ACC/ASA	10-21	<34.6	10.87 ± 0.37	33.86 ± 0.08	<26.26
ASsSt/NPEW	9-18	34.6 – 35.1	9.62 ± 0.40	34.36 ± 0.09	26.26 – 26.76
AGC	>12	>35.1	x	X	X
AIP	4-9	34.6 – 34.9	6.87 ± 0.16	34.47 ± 0.03	26.76 – 27.31



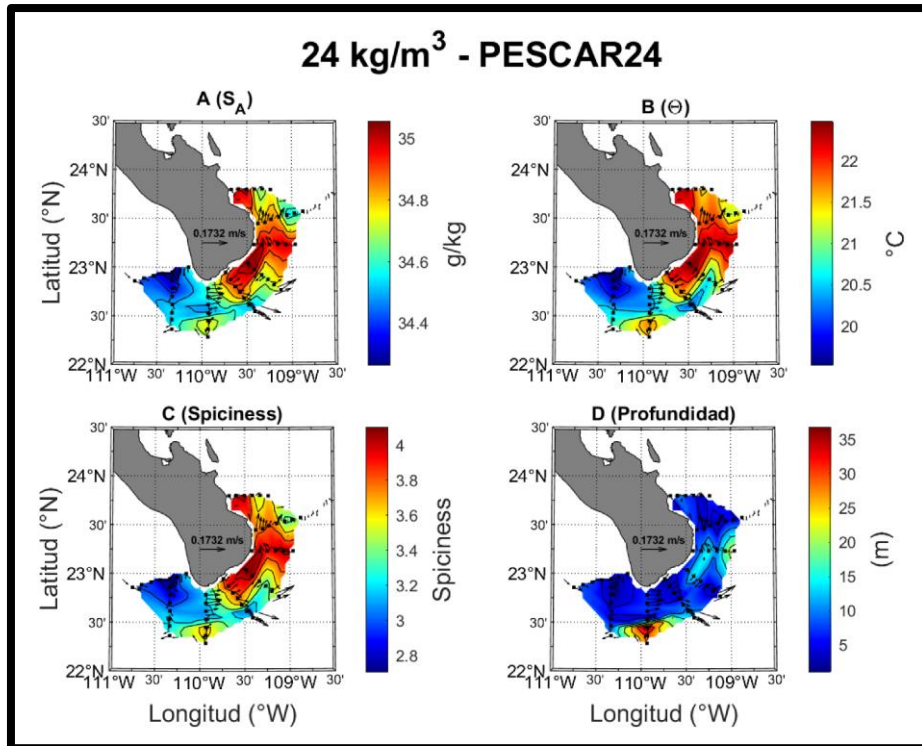
**Anexo 3.** Mapa de distribución de OD en la sección radial a 10, 50, 75 y 100 m de profundidad para el crucero PESCAR24. La barra de colores indica la concentración de OD ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ). Se complementa con las corrientes sobre cada capa, donde la longitud y punta indican la magnitud y dirección, respectivamente.



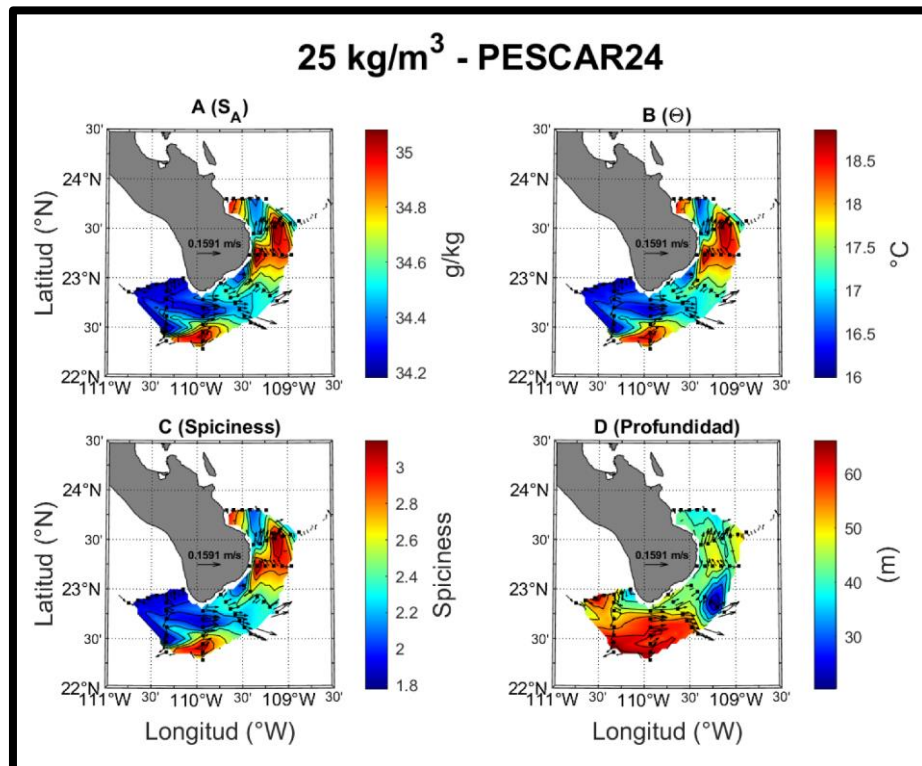
**Anexo 4.** Diagrama  $\theta$ - $S_A$  para la sección radial frente a la PBC. La barra de colores indica la concentración de OD ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) y se empleó la clasificación de [Portela et al., \(2016\)](#).



**Anexo 5.** Distribución de OD a diferentes profundidades (10, 50, 75 y 100 m) frente a la pPBC para el crucero PESCAR24. La barra de colores indica la concentración de OD ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ), mientras que las flechas indican la magnitud y dirección de las corrientes a dicha capa.



**Anexo 6.** Distribución de  $S_A$  ( $\text{g kg}^{-1}$ ) (a),  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) (b),  $\pi$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) (c) y profundidad (m) (d) sobre la isopícnica de  $24 \text{ kg m}^{-3}$  en la sección radial para el crucero P24. La barra de colores indica el valor asociado a cada variable, los puntos ubican la posición de los lances (estaciones 14-67) y los vectores la magnitud e intensidad de las corrientes promedadas entre 5-35 m.



**Anexo 7.** Distribución de  $S_A$  ( $\text{g kg}^{-1}$ ) (a),  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) (b),  $\pi$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) (c) y profundidad (m) (d) sobre la isopícnica de  $25 \text{ kg m}^{-3}$  en la sección radial para el crucero P24. La barra de colores indica el valor asociado a cada variable, los puntos ubican la posición de los lances (estaciones 14-67) y los vectores la magnitud e intensidad de las corrientes promedadas entre 25-65 m.