

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología).

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

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



---

**Maestría en Ciencias  
en Ecología Marina**

---

**Relación entre la profundidad de la oxiclina y la actividad de  
mesoescala en la Entrada al Golfo de California**

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

Presenta:

**Nerea Álvarez Rodríguez**

Ensenada, Baja California, México  
2023

Tesis defendida por  
**Nerea Álvarez Rodríguez**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. Armando Trasviña Castro**  
Director de tesis

**Dr. Helmut Maske Rubach**

**Dr. Jushiro Carlos Adolfo Cepeda Morales**

**Dr. Rubén Castro Valdez**

**Dr. Aurélien Paulmier**

**Dr. Loic Marie Jean Claude Jose Ghisian Peiffer**



---

**Dr. Rafael Andrés Cabral Tena**  
Coordinador del Posgrado en Ecología Marina

---

**Dra. Ana Denise Re Araujo**  
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Nerea Álvarez Rodríguez** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina

### **Relación entre la profundidad de la oxiclina y la actividad de mesoescala en la Entrada al Golfo de California**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Armando Trasviña Castro  
**Director de tesis**

En la Entrada al Golfo de California encontramos una de la Zonas del Mínimo de Oxígeno más someras del océano. Esto está asociado con la confluencia de las masas de agua de la región. En la capa superficial se encuentra la masa de Agua de la Corriente de California, el Agua Superficial Tropical y el Agua del Golfo de California. Bajo la superficie se encuentra el Agua Subsuperficial Subtropical. La masa de agua de la Corriente de California a menudo se observa a 50 metros por debajo de la superficie, y se caracteriza por presentar altas concentraciones de oxígeno disuelto. Por el contrario, la masa de Agua Subsuperficial Subtropical, con frecuencia se acerca a la superficie, acarrea concentraciones bajas de oxígeno disuelto y provoca la elevación del mínimo de oxígeno. En este trabajo examinamos la relación de la oxiclina con procesos de mesoescala y corrientes costeras, en diferentes estaciones del año con base en mediciones hidrográficas de cruceros históricos y de datos recientes en la Entrada al Golfo de California. Usamos el método de Análisis Óptimo Multiparamétrico para caracterizar la distribución y mezcla de masas de agua. Los resultados muestran que los procesos de mesoescala tienen una clara influencia en la profundidad de la oxiclina y de la Zona del Mínimo de Oxígeno. Esto se debe a que estas estructuras modifican significativamente el grosor de la capa superficial. En la mayor parte de los casos, se observa una relación entre la oxiclina, la termoclina y la pycnoclina. Esta relación se altera cuando hay intrusiones de las aguas de alto contenido de oxígeno de la Corriente de California. En este trabajo presentamos varios ejemplos donde esta masa de agua actúa como un mecanismo de ventilación de las aguas subsuperficiales.

**Palabras clave:** Zona del Mínimo de Oxígeno, circulación costera, oxiclina, mesoescala, Entrada al Golfo de California

Abstract of the thesis presented by **Nerea Álvarez Rodríguez** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology

**Relationship between oxycline depth and mesoscale activity at the entrance to the Gulf of California**

Abstract approved by:

---

Dr. Armando Trasviña Castro  
**Thesis Director**

The Oxygen Minimum Zone of the Entrance to the Gulf of California is one of the shallowest in the World Ocean. Its occurrence is associated with the presence of oxygen-depleted Subtropical Subsurface Water. At the surface layer, we find the confluence of the California Current, Tropical Surface, and Gulf of California Water, all of them rich in dissolved oxygen. In this work, we use hydrographic data from historical and recent cruises at the entrance to the Gulf of California to examine the relationship between the oxycline depth and the presence of upper-ocean mesoscale processes and coastal currents. To characterize mixing between water masses we use the Multiparametric Optimal Analysis method. The results show a clear influence of the mesoscale processes on the depth of the oxycline and of the Oxygen Minimum Zone. This is because eddies and coastal currents significantly modify the thickness of the surface layer of the ocean. In most cases, a relationship is observed between the oxycline, thermocline, and pycnocline. This relationship is often altered by intrusions from the oxygen-rich waters of the California Current. This work also includes examples of this water mass acting as a ventilation mechanism for the subsurface waters.

**Keywords:** Oxygen Minimum Zone, coastal circulation, oxycline, mesoscale, Entrance to the Gulf of California

## **Agradecimientos**

Me gustaría agradecer a mi director de tesis, el Dr. Armando Trasviña Castro, por su enseñanza y paciencia a lo largo de estos dos años. A los miembros de mi comité que gracias a sus aportaciones ayudaron a mejorar este trabajo.

Al CICESE por aceptarme en el posgrado de Ecología Marina, a los docentes y compañeros por todo lo aprendido a pesar de la distancia. Al CONACyT por su apoyo económico que me permitió realizar mis estudios durante estos dos años de beca con el número de CVU 1068588. Al CICESE Unidad La Paz donde desarrollé mucho de este trabajo.

A INAPESCA por darme la oportunidad de participar en varios cruceros a bordo del BI Dr. Jorge Carranza Fraser a lo largo de estos dos años, en especial a M. en C. Víctor Hugo Martínez-Magaña por su apoyo y enseñanza. Y a SOA (Sustainable Ocean Alliance) por su apoyo económico para la realización de este trabajo. También me gustaría agradecer al Dr. Emilio Beier y Dr. Rubén Castro por darme acceso a los datos de los cruceros de PROCOMEX y PESCAR.

Por último agradecer a mi familia por siempre apoyarme y a mis amigos de La Paz que han hecho este proceso mucho más llevadero.

# Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Lista de figuras.....	vi
Lista de tablas.....	x
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Justificación.....	5
1.3 Hipótesis.....	5
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
<b>Capítulo 2. Metodología.....</b>	<b>7</b>
2.1 Datos hidrográficos.....	7
2.2 Perfilador acústico Doppler de Corrientes (ADCP).....	22
<b>Capítulo 3. Resultados.....</b>	<b>23</b>
3.1 Variación estacional termohalina con base en los diagramas $\Theta$ - $S_A$ .....	23
3.2 Secciones verticales y distribución de masas de agua.....	28
<b>Capítulo 4. Discusión.....</b>	<b>52</b>
4.1 Procesos de mesoescala que modifican la profundidad de la oxiclina.....	52
4.2 Influencia de la distribución y advección horizontal de masas de agua y de su advección horizontal en la oxiclina.....	55
<b>Capítulo 5. Conclusiones.....</b>	<b>58</b>
<b>Literatura citada.....</b>	<b>61</b>

## Lista de figuras

Figura	Página
1. Área de estudio: región de la entrada al Golfo de California. Se incluyen en el panel izquierdo las posiciones donde se realizaron los lances hidrográficos durante diferentes cruceros oceanográficos (Tabla 2). .....	1
2. Esquema de la circulación en la zona este del Pacífico Tropical propuesta por Kessler (2006).	3
3. (A) Comparación entre la oxiclina calculada en este trabajo (línea discontinua blanca) con los criterios utilizados para definir el límite superior (amarillo) e inferior (naranja) de la oxiclina (Paulmier y Ruiz-Pino, 2008). (B) Criterio utilizado por Trucco-Pignata et al. (2019) y Sánchez-Velasco et al. (2017) para definir la zona hipóxica (azul) y subóxica (verde). En rojo la definición del límite superior de la ZMO por Cepeda-Morales et al. (2013). .....	14
4. Regresión lineal entre las mediciones obtenidas por MicroWinkler y el sensor óptico del CTD para el crucero de JCFINP2205.....	16
5. (A) Regresión lineal entre las mediciones superficiales del sensor óptico del CTD y el oxígeno saturado. (B) Regresión lineal entre las mediciones superficiales obtenidas por MicroWinkler y el oxígeno saturado. Los datos superficiales fueron aquellas mediciones de OD superiores a $180 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ .....	17
6. Diagramas $\Theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) – $S_A$ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) de la entrada al Golfo de California en invierno. La barra de colores indica la concentración de oxígeno disuelto en $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ . (A) Crucero PATO6 realizado durante marzo del 2005, (B) con su respectiva área de estudio. (C) Crucero PROCOMEX0703 realizado durante marzo del 2007, (D) con su respectiva área de estudio. ....	24
7. Diagramas $\Theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) – $S_A$ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) de la entrada al Golfo de California en primavera. La barra de colores indica la concentración de oxígeno disuelto ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). (A) Crucero PESCAR24 realizado durante abril del 2013, (B) con su respectiva área de estudio. (C) Crucero JCFINP2205 realizado durante junio del 2022, (D) con su respectiva área de estudio. (E) Crucero PROCOMEX0506 realizado durante junio del 2005, (F) con su respectiva área de estudio. ...	25
8. Diagramas $\Theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) – $S_A$ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) de la entrada al Golfo de California en verano. La barra de colores indica la concentración de oxígeno disuelto ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). (A) Crucero PROCOMEX0608 realizado durante agosto del 2006, (B) con su respectiva área de estudio.....	26
9. Diagramas $\Theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) – $S_A$ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) de la entrada al Golfo de California en otoño. La barra de colores indica la concentración de oxígeno disuelto ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). (A) Crucero PESCAR18 realizado durante noviembre del 2004, (B) con su respectiva área de estudio. (C) Crucero PROCOMEX0511 realizado durante noviembre del 2005, (D) con su respectiva área de estudio. ....	27
10. Secciones verticales del transecto CABOS del crucero PATO 6, del 9 al 12 de Marzo del 2005. El mapa corresponde al derrotero. (A) Temperatura conservativa, $\Theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ ); (B) $\sigma_{\theta}$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); (C) Velocidad geostrófica con referencia 500 m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). (D.) Salinidad absoluta, $S_A$ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (E.) Oxígeno disuelto, OD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (F.) Frecuencia de Brunt-Väisälä, $N^2$ ( $\text{ciclos}\cdot\text{h}^{-1}$ ); (G.) Clorofila- <i>a</i> (Cl- <i>a</i> , $\mu\text{g/l}$ ). Para la sección de OD (E) la isolínea morada de $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ indica el inicio de la	

- zona del mínimo de oxígeno (Cepeda-Morares et al., 2013). La oxiclina viene señalada por una línea discontinua blanca superpuesta..... 30
11. Distribución vertical de las masas de agua y su relación con los gradientes máximos de oxígeno, temperatura, densidad, el MSC y el IZMO durante el crucero PATO6 en marzo del 2005. En la distribución de masas de agua (A), los contornos azules muestran las contribuciones (%) del ACC, de color naranja del AGC, de color verde del ATS y de color morado del AStSs. (B) Profundidades para cada estación de la oxiclina (azul), termoclina (naranja), pycnoclina (amarillo), MSC (verde) e IZMO (morado)..... 32
  12. Secciones verticales del transecto CABOS del crucero PROCOMEX0703, del 7 al 10 de Marzo del 2005. El mapa corresponde al derrotero. (A) Temperatura conservativa,  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); (B)  $\sigma_{\theta}$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); (C) Velocidad geostrofica con referencia 500 m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). (D.) Salinidad absoluta,  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (E.) Oxígeno disuelto, OD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (F.) Frecuencia de Brunt-Väisälä,  $N^2$  ( $\text{ciclos}\cdot\text{h}^{-1}$ ); (G.) Fluorescencia (FCl- $\alpha$ ,  $\mu\text{g}/\text{l}$ ). Para la sección de OD (E) la isolínea morada de  $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  indica el inicio de la zona del mínimo de oxígeno (Cepeda-Morares et al., 2013). La oxiclina viene señalada por una línea discontinua blanca superpuesta. .... 33
  13. Distribución vertical de las diferentes masas de agua y su relación con los gradientes máximos de oxígeno, temperatura, densidad, el MSC y el IZMO durante el crucero PROCOMEX0703 en marzo del 2007. En la distribución de masas de agua (A), los contornos azules muestran las contribuciones (%) del ACC, de color naranja del AGC, de color verde del ATS y de color morado del AStSs. (B) Profundidades para cada estación de la oxiclina (azul), termoclina (naranja), pycnoclina (amarillo), MSC (verde) e IZMO (morado). .... 35
  14. Secciones verticales del transecto CABOS del crucero PESCAR24, del 19 al 21 de Abril del 2013. El mapa corresponde al derrotero. (A) Temperatura conservativa,  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); (B)  $\sigma_{\theta}$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); (C) Velocidad geostrofica con referencia 500 m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). (D.) Salinidad absoluta,  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (E.) Oxígeno disuelto, OD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (F.) Frecuencia de Brunt-Väisälä,  $N^2$  ( $\text{ciclos}\cdot\text{h}^{-1}$ ); (G.) Fluorescencia (FCl- $\alpha$ ,  $\mu\text{g}/\text{l}$ ). Para la sección de OD (E) la isolínea morada de  $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  indica el inicio de la zona del mínimo de oxígeno (Cepeda-Morares et al., 2013). La oxiclina viene señalada por una línea discontinua blanca superpuesta. .... 36
  15. Distribución vertical de las diferentes masas de agua y su relación con los gradientes máximos de oxígeno, temperatura, densidad, el MSC y el IZMO durante el crucero PESCAR24 en abril del 2013. En la distribución de masas de agua (A), los contornos azules muestran las contribuciones (%) del ACC, de color naranja del AGC, de color verde del ATS y de color morado del AStSs. (B) Profundidades para cada estación de la oxiclina (azul), termoclina (naranja), pycnoclina (amarillo), MSC (verde) e IZMO (morado). .... 38
  16. Secciones verticales del transecto de Islas Marías del crucero JCFINP2205, del 6 al 7 de Junio del 2022. En el mapa las flechas representan el flujo de la velocidad a 30 m de profundidad medido por el perfilador de corrientes de la embarcación. (A) Temperatura conservativa,  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); (B)  $\sigma_{\theta}$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); (C) Velocidad geostrofica ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) con referencia a 200 m. (D.) Salinidad absoluta,  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (E.) Oxígeno disuelto, OD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (F.) Frecuencia de Brunt-Väisälä,  $N^2$  ( $\text{ciclos}\cdot\text{h}^{-1}$ ); (G.) Fluorescencia (FCl- $\alpha$ , volts). Para la sección de OD (E) la isolínea morada de  $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  indica el inicio de la zona del mínimo de oxígeno (Cepeda-Morares et al., 2013). La oxiclina viene señalada por una línea discontinua blanca superpuesta. .... 39
  17. Distribución vertical de las diferentes masas de agua y su relación con los gradientes máximos de oxígeno, temperatura, densidad, el MSC y el IZMO durante el crucero JCFINP2205 en junio

- del 2022. En la distribución de masas de agua (A), los contornos naranjas muestran las contribuciones (%) del AGC, de color verde del ATS y de color morado del AStSs. (B) Profundidades para cada estación de la oxiclina (azul), termoclina (naranja), pycnoclina (amarillo), MSC (verde) e IZMO (morado)..... 40
18. Secciones verticales del transecto CABOS del crucero PROCOMEX0506, del 12 al 15 de Junio del 2005. El mapa corresponde al derrotero. (A) Temperatura conservativa,  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); (B)  $\sigma_{\theta}$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); (C) Velocidad geostrofica con referencia 500 m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). (D.) Salinidad absoluta,  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (E.) Oxígeno disuelto, OD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (F.) Frecuencia de Brunt-Väisälä,  $N^2$  ( $\text{ciclos}\cdot\text{h}^{-1}$ ); (G.) Fluorescencia (FCl- $\alpha$ ,  $\mu\text{g}/\text{l}$ ). Para la sección de OD (E) la isolínea morada de  $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  indica el inicio de la zona del mínimo de oxígeno (Cepeda-Morares et al., 2013). La oxiclina viene señalada por una línea discontinua blanca superpuesta. .... 42
19. Distribución vertical de las diferentes masas de agua y su relación con los gradientes máximos de oxígeno, temperatura, densidad, el MSC y el IZMO durante el crucero PROCOMEX0506 en junio del 2005. En la distribución de masas de agua (A), los contornos azules muestran las contribuciones (%) del ACC, de color naranja del AGC, de color verde del ATS y de color morado del AStSs. (B) Profundidades para cada estación de la oxiclina (azul), termoclina (naranja), pycnoclina (amarillo), MSC (verde) e IZMO (morado). .... 43
20. Secciones verticales del transecto CABOS del crucero PROCOMEX0608, del 7 al 10 de Agosto del 2006. El mapa corresponde al derrotero. (A) Temperatura conservativa,  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); (B)  $\sigma_{\theta}$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); (C) Velocidad geostrofica con referencia 500 m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). (D.) Salinidad absoluta,  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (E.) Oxígeno disuelto, OD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (F.) Frecuencia de Brunt-Väisälä,  $N^2$  ( $\text{ciclos}\cdot\text{h}^{-1}$ ); (G.) Fluorescencia (FCl- $\alpha$ ,  $\mu\text{g}/\text{l}$ ). Para la sección de OD (E) la isolínea morada de  $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  indica el inicio de la zona del mínimo de oxígeno (Cepeda-Morales et al., 2013). La oxiclina viene señalada por una línea discontinua blanca superpuesta. .... 45
21. Distribución vertical de las diferentes masas de agua y su relación con los gradientes máximos de oxígeno, temperatura, densidad, el MSC y el IZMO durante el crucero PROCOMEX0608 en agosto del 2006. En la distribución de masas de agua (A), los contornos azules muestran las contribuciones (%) del ACC, de color naranja del AGC, de color verde del ATS y de color morado del AStSs. (B) Profundidades para cada estación de la oxiclina (azul), termoclina (naranja), pycnoclina (amarillo), MSC (verde) e IZMO (morado). .... 46
22. Secciones verticales del transecto CABOS del crucero PESCAR18, del 15 al 17 de Noviembre del 2004. El mapa corresponde al derrotero. (A) Temperatura conservativa,  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); (B)  $\sigma_{\theta}$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); (C) Velocidad geostrofica con referencia 500 m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). (D.) Salinidad absoluta,  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (E.) Oxígeno disuelto, OD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (F.) Frecuencia de Brunt-Väisälä,  $N^2$  ( $\text{ciclos}\cdot\text{h}^{-1}$ ); (G.) Fluorescencia (FCl- $\alpha$ ,  $\mu\text{g}/\text{l}$ ). Para la sección de OD (E) la isolínea morada de  $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  indica el inicio de la zona del mínimo de oxígeno (Cepeda-Morares et al., 2013). La oxiclina viene señalada por una línea discontinua blanca superpuesta. .... 47
23. Distribución vertical de las diferentes masas de agua y su relación con los gradientes máximos de oxígeno, temperatura, densidad, el MSC y el IZMO durante el crucero PESCAR18 en noviembre del 2004. En la distribución de masas de agua (A), los contornos naranjas muestran las contribuciones (%) del AGC, de color verde del ATS y de color morado del AStSs. (B) Profundidades para cada estación de la oxiclina (azul), termoclina (naranja), pycnoclina (amarillo), MSC (verde) e IZMO (morado)..... 48

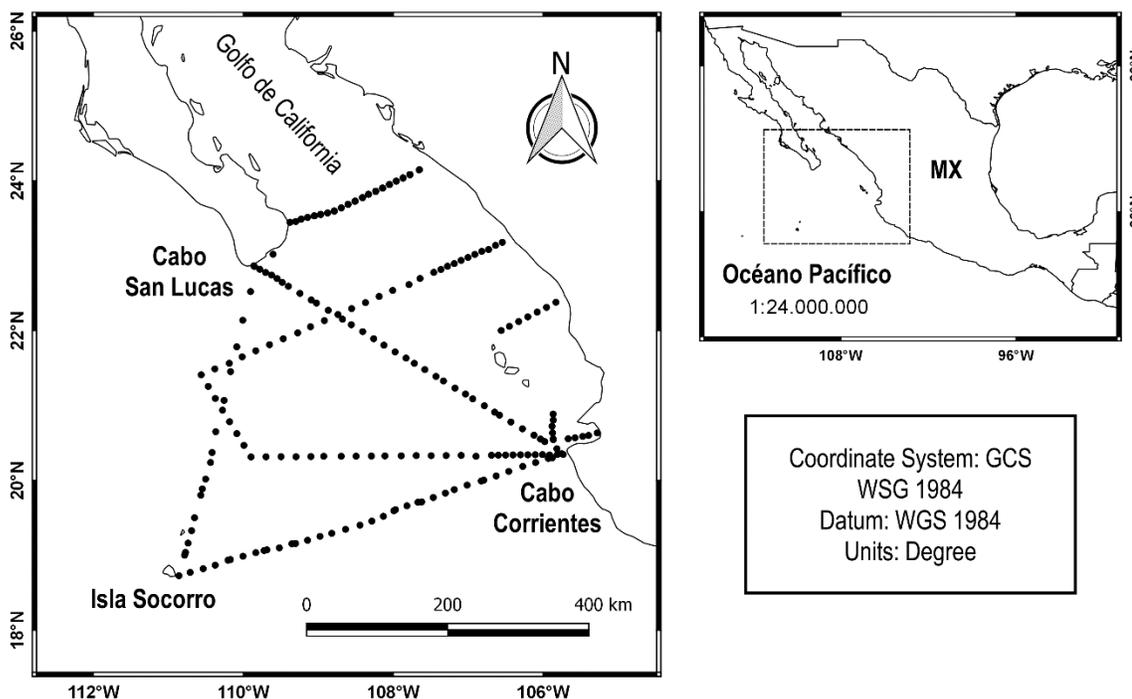
24. Secciones verticales del transecto CABOS del crucero PROCOMEX0511, del 5 al 9 de Noviembre del 2005. El mapa corresponde al derrotero. (A) Temperatura conservativa,  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); (B)  $\sigma_{\theta}$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); (C) Velocidad geostrófica con referencia a 500 m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). (D.) Salinidad absoluta,  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (E.) Oxígeno disuelto, OD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (F.) Frecuencia de Brunt-Väisälä,  $N^2$  ( $\text{ciclos}\cdot\text{h}^{-1}$ ); (G.) Fluorescencia (FCI- $\alpha$ ,  $\mu\text{g/l}$ ). Para la sección de OD (E) la isolínea morada de  $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  indica el inicio de la zona del mínimo de oxígeno (Cepeda-Morares et al., 2013). La oxiclina viene señalada por una línea discontinua blanca superpuesta. .... 50
25. Distribución vertical de las diferentes masas de agua y su relación con los gradientes máximos de oxígeno, temperatura, densidad, el MSC y el IZMO durante el crucero PROCOMEX0511 en noviembre del 2005. En la distribución de masas de agua (A), los contornos azules muestran las contribuciones (%) del ACC, de color naranja del AGC, de color verde del ATS y de color morado del AStSs. (B) Profundidades para cada estación de la oxiclina (azul), termoclina (naranja), picnoclina (amarillo), MSC (verde) e IZMO (morado)..... 51
26. Comparación de la profundidad de la oxiclina (Prof oxiclina), intensidad de la oxiclina (I oxiclina) y profundidad del IZMO (Prof IZMO) entre las costas de Cabo Corrientes y Sinaloa. .... 55
27. Esquema del comportamiento de la oxiclina y del IZMO ante intrusiones del ACC. También se señala el efecto de las corrientes costeras (AT: aguas superficiales de transición, ACC: agua de la Corriente de California y AStSs: agua Subtropical Subsuperficial . .... 57
28. Esquema del comportamiento de la oxiclina y el IZMO ante la influencia de procesos de mesoescala: (A) circulación anticiclónica, (B) circulación ciclónica y (C) surgencias costeras. 59

## Lista de tablas

Tabla	Página
1. Límites de masas de agua en TEOS-10 y su rango de profundidad media (Portella et al., 2016). .....	2
2. Lista de los cruceros realizados en la entrada al GdeC. Se incluyen las embarcaciones empleadas y periodos de muestreo así como el CTD (PC: PROCOMEX, JCFINP: Jorge Carranza Fraser INAPESCA). .....	7
3. Peso de los diferentes parámetros utilizados en el AOM. ....	20
4. Masas de agua y sus valores característicos de salinidad y temperatura utilizados en el AOM. .....	20
5. Valores tipo de oxígeno disuelto ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) de las masas de agua utilizadas en el AOM. ....	20
6. Valores tipo de nitratos y fosfatos de las masas de agua tomados del WOA2013 utilizados en el AOM.....	21

## Capítulo 1. Introducción

El área de estudio de este trabajo corresponde a la entrada al Golfo de California (GdeC; Figura 1). La región evaluada se encuentra delimitada por las coordenadas 18° y 26° Norte y 105° y 112° Oeste. Esta es una región donde la corriente de gran escala más importante es la Corriente de California (CC). Esta fluye hacia el sur por la costa occidental de América del Norte, desde la costa sur de Columbia Británica hasta Baja California (Mauzole et al., 2020; Figura 2). La CC pertenece a las corrientes de los márgenes orientales, caracterizadas por ser biológicamente activas con altos valores de producción biológica, debido a los intensos procesos de surgencias costeras producidas por un transporte de Ekman hacia fuera de la costa, que genera el transporte vertical de agua subsuperficial (Thomas et al., 2004).



**Figura 1.** Área de estudio: región de la entrada al Golfo de California. Se incluyen en el panel izquierdo las posiciones donde se realizaron los lances hidrográficos durante diferentes cruces oceanográficos (Tabla 2).

La Entrada al GdeC es una zona de transición oceanográfica donde confluyen varias masas de agua, (ver Tabla 1). En la capa superficial se encuentran las masas de agua de la Corriente de California (ACC), que acarrea aguas con características Subárticas del Pacífico NE; agua Tropical Superficial (ATS), más cálida ya que proviene del Pacífico Ecuatorial Oriental; agua del Golfo de California (AGC), que es la más cálida y

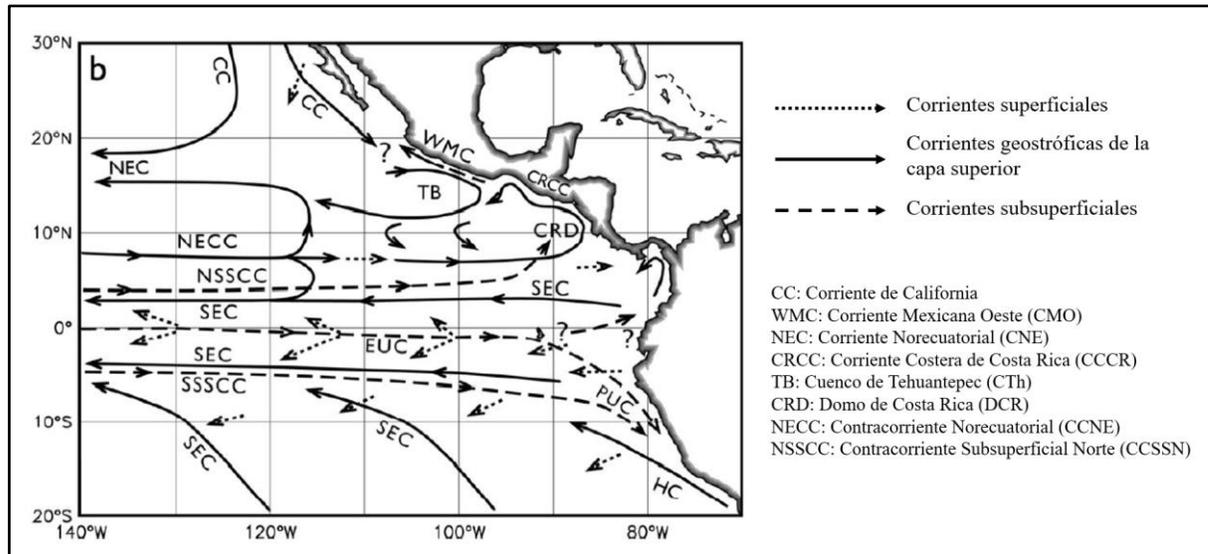
salina de las tres. Debajo de la capa superficial (>75 m) se encuentra el Agua Subsuperficial Subtropical (Portela et al., 2016). Las diferencias de temperatura y densidad de estas aguas superficiales causan frentes, que tienden a desarrollar estructuras de mesoescala como remolinos, chorros y meandros (Lavin et al., 2009; Collins et al., 2015). Durante el invierno se da la salinidad baja y temperatura superficial más baja del año, lo que sugiere una mezcla entre ACC y AGC. En primavera la AGC sale del Golfo por su costa este, mientras que entra la ACC por el lado oeste. Durante el verano se da la temperatura más alta y la salinidad más baja del año, que indica la presencia de agua de transición entre ATS y AGC entrando al Golfo de California del lado este, mientras que la AGC deja el Golfo en el lado oeste (Figura 3 en Portela et al., 2016).

**Tabla 1. Límites de masas de agua en TEOS-10 y su rango de profundidad media (Portella et al., 2016).**

	<b>Abreviatura</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Salinidad (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Profundidad media (m)</b>
Agua de la Corriente de California	ACC	10 - 21	< 34.6	0 – 150
Agua Tropical Superficial	ATS	> 25.1	< 34.6	0 – 50
Agua del Golfo de California	AGC	> 12	> 35.1	0 – 150
Agua Subtropical Subsuperficial	AStSs	9 - 18	34.6 – 35.1	75 – 400
Agua Intermedia del Pacífico	AIP	4 - 9	34.6 – 34.9	400 - 1000

## 1.1 Antecedentes

La circulación en la entrada del GdeC es forzada por el intercambio de aguas superficiales del golfo con las del Pacífico Tropical Este (Wyrтки, 1965). En la revisión llevada a cabo por Kessler (2006), se realizó una descripción detallada del sistema de circulación superficial del Pacífico Oriental Tropical (Figura 2). En este estudio se añade la Corriente Mexicana Oeste (CMO) con origen subsuperficial en el Golfo de Tehuantepec. Históricamente esta corriente fue considerada como una extensión de la Corriente Costera de Costa Rica (CCCR) que fluye hacia el polo desde América Central ligada a la costa del Pacífico frente a México hasta Cabo Corrientes durante los meses del verano boreal (Wyrтки, 1966, 1967). Sin embargo, estudios más recientes han sugerido con modelos numéricos (Pantoja et al., 2012) y con observaciones (Kessler, 2006; Lavín et al., 2006), que estas dos corrientes parecen estar desconectadas tanto en sus tendencias de largo período, como en sus variaciones estacionales. El esquema propuesto por Kessler (2006) también muestra la presencia de la Corriente de California (CC) frente a Cabo Corrientes, donde una circulación de tipo ciclónica transporta agua hacia la costa.



**Figura 2.** Esquema de la circulación en la zona este del Pacífico Tropical propuesta por Kessler (2006).

Lavín et al. (2006) sustituyeron el nombre de la CMO por el de la Corriente Costera Mexicana (CCM) y es como se denominará a lo largo de este trabajo. Estos autores, en bases a observaciones directas obtenidas durante cruceros realizados durante el mes de junio del 2003 y 2005, reportaron por primera vez el flujo hacia el polo de la CCM.

Imágenes satelitales de temperatura y color del océano han mostrado que las estructuras de mesoescala son comunes en la capa superficial del GdeC (Lavín y Marinone, 2003). Zamudio et al. (2007) registraron la generación de remolinos en la entrada al GdeC a través de métodos numéricos, cuya formación fue debida a la intensificación de la CCM y su separación de la costa de Cabo Corrientes. Godínez et al. (2010), a través de altimetría satelital, demostraron que la circulación superficial muestra la existencia de una rama de la CC con dirección a la entrada del Golfo de California, donde se divide en dos subramas separados por un remolino anticiclónico en la costa sur de Cabo Corrientes. Pantoja et al. (2012) con base a los resultados del modelo numérico ROMS mostraron la formación de remolinos ciclónicos y anticiclónicos como consecuencia de la alternancia de los flujos de entrada y salida en el lado oriental y occidental de las corrientes en la entrada del GdeC. A través de una sección transversal en la entrada al GdeC y de cálculos geostroficos, la presencia de un intercambio ciclónico (Roden, 1971; Castro et al., 2000; Mascarenhas et al., 2004); agua de baja (alta) salinidad entrando del lado este (oeste) de la sección. Sin embargo, Castro et al. (2017) detectaron un intercambio anticiclónico en abril de 2013, donde se observó un núcleo de ACC cerca de la Península de Baja California con un flujo de salida de agua salada (AGC) en la parte este de la sección.

Por su parte, el GdeC también presenta alta biomasa fitoplanctónica debido a la intensidad de sus diversos procesos dinámicos, como los procesos de surgencia de la costa este y el efecto de las islas en el transporte advectivo de aguas ricas en nutrientes (Gaxiola-Castro et al., 1999).

La entrada al GdeC se caracteriza por presentar una de las profundidades del mínimo de oxígeno más somera del Pacífico Oriental Tropical Mexicano (Trucco-Pignata et al., 2019; Cepeda-Morales et al. 2013). Estas áreas del océano con una muy baja concentración de oxígeno disuelto (OD) se les conocen como Zonas de Mínimo de Oxígeno (ZMO; Maske et al., 2010). Las concentraciones de OD son más elevadas cerca de la superficie, por el intercambio de gases con la atmósfera, los procesos de mezcla turbulenta en el océano superior y la producción de oxígeno del fitoplancton. Conforme aumenta la profundidad, la respiración y otros procesos consumen el OD que lo disminuye hasta valores muy cercanos a cero. La oxiclina es la capa donde el gradiente de oxígeno es el máximo en la columna de agua (Sankar et al., 2018).

Fiedler y Talley (2006) propusieron que la deficiencia de oxígeno en las ZMO puede deberse a varios factores: (1) la alta producción de fitoplancton en la superficie; (2) una picnoclina permanente que impide la ventilación local de las aguas subsuperficiales; (3) una circulación profunda lenta que implica una mayor edad de las aguas subpicnoclinas. La picnoclina es la sección de la columna de agua donde se encuentra el mayor gradiente de densidad. En el estudio de McClain et al. (2004), resaltaron la importancia de la ventilación del océano para la formación de la ZMO, ya que la concentración de fitoplancton no llega tan lejos de la costa como sería necesario para explicar la ZMO. Resultados similares obtuvieron Karstensen et al. (2008), concluyendo que la ubicación de la ZMO está determinada principalmente por los patrones de surgencia y el transporte horizontal en los límites orientales, y en menor medida por las regiones de alta productividad. Maske et al. (2010) obtuvieron perfiles hidrográficos de oxígeno y lo relacionaron con el carbono inorgánico disuelto (DIC) y la  $p\text{CO}_2$ . Se observó que una capa mínima de oxígeno poco profunda estaba relacionada con una mayor producción primaria y secundaria por el aumento de nutrientes inorgánicos en la zona eufótica.

Otros estudios demostraron que la circulación de mesoescala y las surgencias costeras también pueden afectar a la distribución vertical del límite superior de la ZMO, siendo adecuado estudiar variabilidad y dinámica en escalas temporales y espaciales más pequeñas (Cepeda-Morales et al., 2009). Cepeda-Morales et al. (2013) estudiaron los mecanismos que influyen en la variabilidad latitudinal y el límite superior de la ZMO somera en el Océano Pacífico nororiental. Con base en las distribuciones termohalinas, observaron que el límite superior superficial de la ZMO se generó por la influencia de AStSs, cuando su

influencia desapareció la ZMO se profundizó como consecuencia de la mezcla con ACC rica en oxígeno disuelto. Además las diferentes profundidades de la ZMO se relacionaron con la circulación regional de mesoescala y el transporte de agua hipóxica de la Corriente Costera Mexicana hacia el norte. Ruelas y Trasviña et al. (2017) analizaron la hidrografía y dinámica de la entrada al Golfo de California a través de diferentes cruceros oceanográficos PATO (Pacífico Tropical Oriental). Se encontraron diferencias entre la región costera, donde la ATS se situó en la superficie e inmediatamente por debajo la AStSs y la zona del mínimo de oxígeno. En la región oceánica de la entrada, la ATS también se situó en la superficie, pero seguida de la ACC y por debajo a mayor profundidad la AStSs. Esta intrusión del ACC aleja la ZMO de la superficie. Estos autores también mencionan que la circulación costera fue capaz de elevar el mínimo de oxígeno muy cerca de la superficie. Mar afuera los remolinos de núcleo frío acercan el mínimo de oxígeno a la superficie, mientras que los remolinos cálidos la profundizan. Por lo tanto, la ZMO parece estar asociada con el AStSs y, a su vez, la profundidad del mínimo de oxígeno puede ser influenciada por los procesos de mesoescala de la región y los frentes oceánicos asociados a corrientes costeras que alteran la composición de la superficie al generar masas de agua con características intermedias.

## **1.2 Justificación**

Dentro del Pacífico Oriental Tropical, en la entrada al GdeC se encuentra la ZMO más somera y con concentraciones más bajas del océano mundial (Fiedler y Talley, 2006). Esta posición somera la hace más susceptible a ser afectada por los procesos de mesoescala del océano superior y a las variaciones de concentración de OD que conllevan. Además, diferentes estudios han sugerido la expansión vertical y horizontalmente de la ZMO debido al cambio climático (Cepeda-Morales et al., 2013). De allí surge la necesidad de conocer y comprender los procesos y mecanismos que afectan a su formación y distribución. Además el Golfo de California es considerado una de las regiones más productivas en el mundo (Brusca, 2010), por lo tanto es necesario el estudio de estas interacciones.

## **1.3 Hipótesis**

Los remolinos de mesoescala y las corrientes costeras modifican la profundidad de la frontera entre las masas de agua superficiales y subsuperficiales de la Entrada al Golfo de California. Estas a su vez modifican la profundidad de la picnoclina, de la oxiclina y del mínimo de oxígeno en toda la región.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

Entender la relación entre los procesos de mesoescala y la profundidad de la oxiclina en la Entrada al Golfo de California.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar cómo son influenciadas las masas de agua de la región por estructuras de mesoescala (remolinos, corrientes) en la Entrada al Golfo de California.
- Estudiar el efecto de las estructuras de mesoescala (remolinos, corrientes) sobre la profundidad de la oxiclina en la Entrada al Golfo de California.

## Capítulo 2. Metodología

---

### 2.1 Datos hidrográficos

Los datos fueron colectados en ocho cruceros oceanográficos realizados entre 2004 y 2022 (Tabla 2) en la Entrada al Golfo de California. En la Figura 1 se muestran las estaciones hidrográficas de todos los cruceros. Se abarcaron desde los meses de marzo hasta noviembre, teniendo disponibles cruceros en cada una de las estaciones del año. Solo fueron seleccionados aquellos transectos de los cruceros donde se observó presencia de algún proceso de mesoescala.

**Tabla 2.** Lista de los cruceros realizados en la entrada al GdeC. Se incluyen las embarcaciones empleadas y periodos de muestreo así como el CTD (PC: PROCOMEX, JCFINP: Jorge Carranza Fraser INAPESCA).

Crucero	Buque	Periodo crucero	Sensor CTD
PESCAR 18	Point Sur	Noviembre 2004	Sea Bird 9-11 plus
PESCAR 24	Point Sur	Abril 2013	Sea Bird 9-11 plus
PATO 6	Francisco Ulloa	Marzo 2005	Sea Bird 9-11
PC 0506	Francisco Ulloa	Junio 2005	Sea Bird 9-11
PC 0511	Francisco Ulloa	Noviembre 2011	Sea Bird 9-11
PC 0608	Francisco Ulloa	Agosto 2008	Sea Bird 9-11
PC0703	Francisco Ulloa	Marzo 2007	Sea Bird 9-11
JCFINP 2205	Jorge Carranza Fraser	Junio 2022	Idronaut 320 plus

Para todos los cruceros se realizaron lances tradicionales de Conductividad, Temperatura y Profundidad (CTD). Se registraron los perfiles verticales de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y fluorescencia.

Todos los instrumentos registraron temperatura *'in situ'* y salinidad práctica, y los datos fueron convertidos a la nueva ecuación de estado TEOS-10. Para esto usamos las rutinas oceanográficas GSW para Matlab (<http://www.teos-10.org/>). Las variables observadas de salinidad práctica ( $S_p$ ), temperatura y presión ( $p$ ), junto con sus correspondientes latitud ( $\varphi$ ) y longitud ( $\lambda$ ) se usaron para calcular la salinidad absoluta ( $S_A$ ) y después la temperatura conservativa ( $\Theta$ ).

$$S_A = S_R + \delta S_A(\varphi, \lambda, p) \quad (1)$$

$$S_R = (35.16504 \text{ g kg}^{-1}/35)S_p \quad (2)$$

Donde la salinidad de referencia  $S_R$ , se define para proporcionar la mejor estimación disponible de la  $S_A$  del agua de mar con composición de referencia y del agua de mar estándar (agua de mar superficial del Atlántico Norte). La anomalía de salinidad absoluta  $\delta S_A$ , se encuentra en función de la latitud, longitud y presión y se determina calculando la relación entre la densidad calculada de la  $S_p$  con la densidad medida en el laboratorio (McDougall, 2009). Por tanto, la salinidad absoluta representa la variación espacial de la composición de agua de mar, teniendo en cuenta sus diferentes propiedades termodinámicas y el gradiente de densidad horizontal en el océano abierto (Pérez-Santos et al., 2013). Por otro lado, la temperatura conservativa es similar a la temperatura potencial, pero representa con más precisión el contenido de calor de agua del mar. Se define como la entalpía potencial dividida por la “capacidad calorífica” fija  $c_p^0 \equiv 3991.86795711963 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (McDougall, 2003).

### Diagramas $\Theta - S_A$

A partir de las variables observadas mediante la sonda CTD se generaron perfiles verticales para cada una de ellas y posteriormente se elaboraron diagramas TS. Para esto usamos variables de TEOS-10 como la temperatura conservativa y la salinidad absoluta (diagramas  $\Theta - S_A$ ). En los diagramas, identificamos las diferentes masas de agua según sus valores típicos de  $\Theta$  y  $S_A$ , cuyos rangos se encuentran en la Tabla 1, según Portela et al. (2016).

### Densidad, frecuencia de *Brunt-Väisälä* y velocidad geostrófica

Además, en función de las variables presión,  $\Theta$  y  $S_A$ , se calcularon la densidad sigma  $\Theta$  ( $\sigma_\Theta$ ), la frecuencia de Brunt-Väisälä y la velocidad geostrófica también a partir de las rutinas GSW de TEOS-10:

- *Sigma  $\Theta$*

Es una cantidad utilizada para medir la densidad del agua de mar a una temperatura determinada. Se calculó la anomalía de densidad potencial con una presión de referencia de 0 dBar en términos de  $\Theta$  y  $S_A$ . La densidad potencial es la densidad que tiene una parcela cuando se mueve adiabáticamente a una

presión de referencia. Si la presión de referencia es la superficie de mar, se calcula la temperatura potencial de la parcela y se evalúa la densidad a una presión de 0 dbar.

- *Frecuencia de Brunt-Väisälä*

Para analizar la estabilidad de la columna de agua se utilizó la Frecuencia de Brunt-Väisälä al cuadrado ( $N^2$ ) a la presión media, dada la  $\Theta$  y  $S_A$ . Esta frecuencia puede ser interpretada como la frecuencia máxima con que oscilará una parcela de fluido al ser movida de su punto de equilibrio. El cuadrado de la frecuencia de Brunt-Väisälä está dada por:

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \cdot \frac{\Delta\rho^\theta}{\Delta z} \quad \text{ó} \quad N^2 = \frac{g^2 \Delta\rho^\theta}{\Delta P} \quad (3)$$

Donde  $g$  la fuerza de aceleración de la gravedad,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $\Delta\rho^\theta$  es la diferencia de las densidades potenciales de las dos parcelas de agua de mar, siendo la presión de referencia el promedio de las dos presiones originales de las parcelas de agua de mar y  $z$  la profundidad. Valores altos de  $N^2$  indican una estratificación fuerte. Las unidades obtenidas son de  $\text{rad}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ , para convertir a  $\text{ciclos} \cdot \text{s}^{-1}$ , se dividió la frecuencia por  $2\pi$  ( $N/2\pi$ ).

- *Velocidad geostrófica*

Para la estimación de la velocidad de las corrientes se utilizó el método dinámico (Pond y Pickard, 1983), que consiste en el cálculo de velocidades a partir de las anomalías geopotenciales, suponiendo que el fluido se encuentra en estado estacionario y las únicas fuerzas que actúan sobre él son el gradiente de presión y la rotación de la Tierra.

Se partió de las ecuaciones del flujo geostrófico en la horizontal y las de balance hidrostático en la vertical, suponiendo condiciones estacionarias y despreciando las fuerzas fricciones tenemos:

$$f v = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}; \quad f u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y}; \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = -g \quad (4)$$

Donde  $f$  es el parámetro de Coriolis,  $\rho$  es la densidad,  $P$  es la presión,  $u$ ,  $v$  son las velocidades en las direcciones  $x$ ,  $y$  respectivamente y  $g$  es la aceleración de la gravedad en la dirección  $z$ .

El cálculo de la diferencia entre la velocidad geostrófica a la presión  $p$  y la de la presión de referencia se realizó a partir de la función de corriente (McDougall y Klocker, 2010):

$$\mathbf{k} \times \nabla_p \Psi = \mathbf{f}(v - v_{ref}) \quad (5)$$

Donde  $f$  es el parámetro de Coriolis y  $\Psi$  es la función de corriente geostrófica. En este caso, el gradiente isobárico lateral de la función corriente representa la diferencia de velocidad geostrófica relativa a la presión de referencia. Para este trabajo se decidió utilizar una presión de referencia de 500 dBar, dado que muchas de las secciones que utilizamos no tienen datos a presiones mayores.

La función de corriente utilizada para el cálculo de la velocidad geostrófica fue la anomalía de la altura dinámica en una superficie isobárica. Esta función evalúa la anomalía de la altura dinámica  $\Psi(S_A, \theta, p, p_{ref})$  relativa a una presión de referencia  $p_{ref}$ . Es definida como la integral de la anomalía de volumen específico desde la presión  $p$  hasta la presión de referencia  $p_{ref}$  según la siguiente expresión:

$$\Psi(S_A[p], \theta[p], p) - \Psi(S_A[p_{ref}], \theta[p_{ref}], p_{ref}) = - \int_{p_{ref}}^p \hat{\delta}(S_A[p'], \theta[p'], p') dp', \quad (6)$$

$$\text{donde } \hat{\delta}(S_A, \theta, p) = \hat{v}(S_A, \theta, p) - \hat{v}(S_{SO}, 0^\circ\text{C}, p) \quad (7)$$

La anomalía de volumen específico  $\hat{\delta}(S_A, \theta, p)$  se define como el volumen específico actual  $v = \rho^{-1}$  menos el volumen específico de la parcela de agua a la misma presión pero a  $\theta = 0^\circ\text{C}$  y  $S_{SO} \equiv 35.16504 \text{ g kg}^{-1}$ . Por lo tanto, el gradiente bidimensional de  $\Psi$  en la superficie de presión  $P$  está relacionado con la diferencia entre la velocidad geostrófica horizontal  $v$  en  $P$  y en la presión de referencia  $P_{ref}$  de acuerdo con la ecuación (5).

## Conversión de unidades

Al contar con datos de diferentes cruceros oceanográficos para algunas de las variables se tuvo que realizar algún tipo de conversión para que todas tuvieran las mismas unidades y los datos fueran comparables entre sí:

### - *Fluorescencia*

En todos los cruceros la fluorescencia (FCl $\alpha$ ,  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ) se utilizó como aproximación de la distribución de clorofila  $\alpha$ . Para el caso del crucero PATO 6, la fluorescencia en unidades de voltaje se transformó a Cl- $\alpha$  ( $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ) a través del método Welschmeyer (1994), como en Maske (2008), usando la ecuación (8):

$$y = 82.178x + 0.0167 \quad (8)$$

Para el caso del crucero *JCFINP2205*, los datos de fluorescencia obtenidos fueron en unidades de voltaje. Dado que para este crucero no se pudo realizar la conversión de unidades por falta de información, los datos de fluorescencia se presentarán como FCl $\alpha$  (volts). A pesar de no ser comparables con los otros por la diferencia de unidades, esto no supone un problema ya que nos interesa analizar su relación con los máximos.

### - *Oxígeno*

Las mediciones de oxígeno se realizaron mediante un sensor de oxígeno disuelto montado en el CTD. Estas mediciones se obtuvieron en diferentes unidades en cada crucero, y fueron convertidas a  $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  a través de las siguientes formulas:

- $\text{m}\cdot\text{L}^{-1} \rightarrow \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$

$$\text{O}_2 \left( \frac{\mu\text{mol}}{\text{kg}} \right) = \frac{\text{O}_2 \left( \frac{\text{ml}}{\text{L}} \right) \cdot 44.615 \left( \frac{\mu\text{mol}}{\text{L}} \right)}{\rho_{in situ} \left( \frac{\text{kg}}{\text{L}} \right)} \quad (9)$$

- $\text{ppm} \rightarrow \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$

$$O_2 \left( \frac{\mu\text{mol}}{\text{kg}} \right) = \frac{O_2(\text{ppm})}{0.032} \cdot \frac{1}{\rho_{in\ situ} \left( \frac{\text{kg}}{\text{l}} \right)} \quad (10)$$

### Secciones verticales

Para analizar la distribución vertical en la columna de agua de las variables mencionadas anteriormente, se realizaron secciones verticales de los transectos escogidos para la realización de este trabajo. Para calcular los contornos de las variables, cada sección fue convertida a una malla regular mediante un método de interpolación objetiva utilizando el lenguaje de programación *Gri* (<https://gri.sourceforge.net/>). En el método de interpolación se aplica una técnica de suavizado conocida como mapeo objetivo. Es esencialmente un filtro de suavizado de tamaño variable de forma aproximadamente gaussiana (Barnes, 1964). Las secciones verticales se utilizaron para identificar remolinos de mesoescala, corrientes costeras y en general la variabilidad hidrográfica en cada transecto.

### Definición de oxiclina, ZMO y otros gradientes

No existe un método único para la determinación de los límites de concentración de OD que definen la oxiclina y la ZMO. Sin embargo, es necesaria su definición para entender su distribución, características e importancia biogeoquímica (Trucco-Pignata et al., 2019). A continuación, se hace una revisión de diferentes criterios en la literatura, utilizados para definir la oxiclina y la ZMO con el objetivo de utilizar el método que mejor se adapte a este trabajo.

La oxiclina se puede definir como un gradiente (A. Paulmier, Com. Pers.), es decir, una diferencia en la concentración de OD en un rango de profundidad, como en la ecuación (11). Esto requiere además de escoger un criterio para caracterizar este gradiente, por ejemplo, el gradiente máximo.

$$\nabla OD = \frac{\Delta[OD]}{\Delta[Z]} = \frac{[OD]_2 - [OD]_1}{Z_2 - Z_1} \quad (11)$$

En las costas de Perú y Chile, varios autores (Bertrand et al., 2009; Paulmier y Ruiz-Pino, 2008; Paulmier et al., 2006) definen el límite superior de la oxiclina como la profundidad donde se encuentran gradientes superiores a  $0.9 \mu\text{M}\cdot\text{m}^{-1}$ . Paulmier y Ruiz-Pino (2008) señalan como el límite inferior de la oxiclina y el

núcleo de la ZMO, un concentración de OD < 20  $\mu\text{M}$ . Estos autores también señalan este límite como el inicio de la condición de suboxia utilizada para separar la respiración aeróbica (respiración- $\text{O}_2$ ) de la denitrificación (respiración- $\text{NO}_3$ ). En las costas de México, Maske et al. (2008) calcularon la oxiclina para cada perfil a partir de la diferencia máxima en la concentración de oxígeno sobre 4 metros de profundidad.

Para simplificar los cálculos muchos estudios consideran un valor fijo de concentración de OD para definir tanto la oxiclina como la ZMO. No existe un criterio único para la determinación de estos valores, sino que estos han sido establecidos a partir de diferentes aproximaciones biológicas y químicas, que dependen de la región de estudio, así como del objetivo del trabajo. Uno de los valores más utilizados en nuestra región de estudio (Cepeda-Morales et al., 2013) es la definición de la capa límite de la ZMO como la isolínea de 9  $\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$  de OD. Este criterio tiene en cuenta la ocurrencia de estas concentraciones de OD dentro del AStSs.

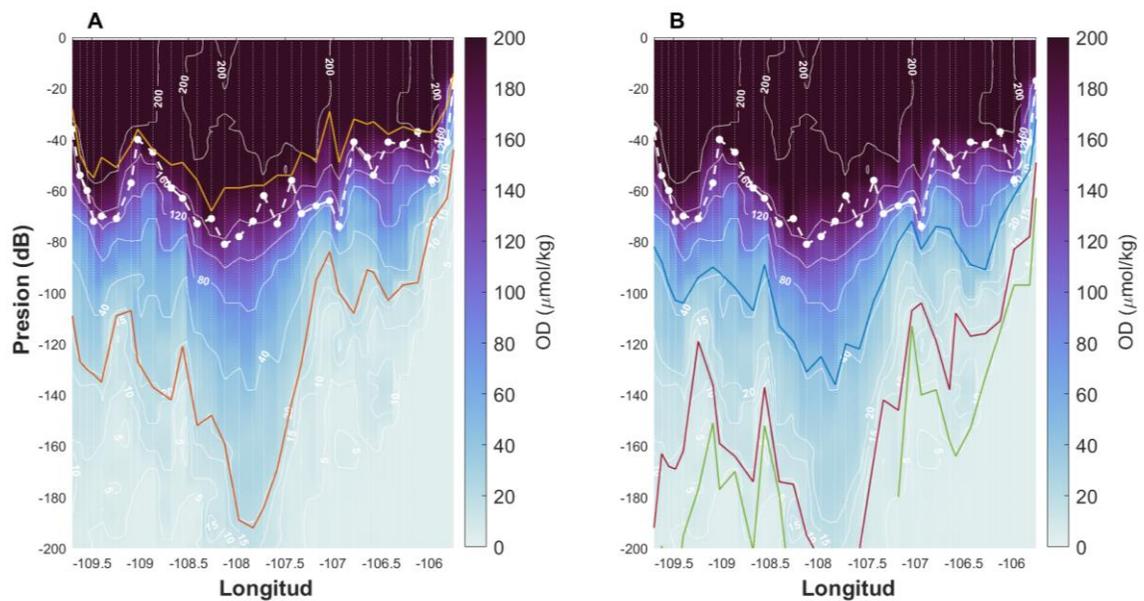
En relación a otros criterios usados en nuestra zona de interés, Trucco-Pignata et al. (2019) señalan el límite inferior de la zona óxica como la isolínea de  $\text{OD}=200 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (originalmente de Paulmier et al., 2011) y de la zona hipóxica  $\text{OD}<44 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  y la zona subóxica  $\text{OD}<4.4 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (tomados de Sánchez-Velasco et al., 2017; Fernández-Álamo y Färber-Lorda, 2006). Estos límites fueron propuestos con el objetivo de estudiar el efecto de la falta de OD en la biología. La zona hipóxica es aquella cuyas concentraciones de OD perturban tanto a los organismos pelágicos como bentónicos (Escribano et al., 2004), mientras que la zona subóxica impacta sobre los microorganismos, siendo la transición entre respiración aeróbica y denitrificación.

Para este trabajo, se definió la oxiclina como la capa donde el gradiente de oxígeno es el máximo en la columna de agua (Sankar et al., 2018). El método utilizado para su cálculo fue:

1. Partiendo de un perfil vertical de OD con resolución de 1 m, calculamos el gradiente promedio entre 3 puntos, con un desplazamiento de 2 dBar de presión:  $\nabla\text{OD} = \Delta[\text{OD}]/\Delta Z$ .
2. A continuación, se obtuvo la derivada del gradiente para encontrar el cambio de la pendiente, es decir, la profundidad donde el gradiente cambia de signo.
3. Se eligió el gradiente máximo y se obtuvo su profundidad para determinar la de la oxiclina. Hubo pocos caso en que se encontró dos gradientes máximos parecidos (con una diferencia < 1  $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), y se escogió el más cercano a la superficie. En la Figura 3 esta es la línea discontinua blanca.

La termoclina y la pycnoclina se calculan con este mismo método, es decir, se estimó la profundidad del máximo gradiente.

La Figura 3 muestra una comparación de la profundidad de la oxiclina, calculada con esta metodología, con los criterios antes mencionados. Se trata de la sección vertical de OD del transecto de Cabo San Lucas (izquierda) a Cabo Corrientes (derecha) del crucero PATO 6 de marzo del 2005. La línea discontinua blanca de ambas secciones señala la oxiclina calculada siguiendo nuestra metodología. Esta se compara (Figura 3A) con el criterio utilizado por Bertrand et al. (2009), Paulmier y Ruiz-Pino (2008) y Paulmier et al. (2006), en color amarillo para señalar el límite superior de la oxiclina donde ocurren gradientes superiores a  $0.9 \mu\text{M}\cdot\text{m}^{-1}$ . Ambos criterios mostraron resultados muy similares a la profundidad de la oxiclina de este trabajo. De color naranja se señaló el límite inferior de la oxiclina ( $\text{OD} < 20 \mu\text{M}$ ).



**Figura 3.** (A) Comparación entre la oxiclina calculada en este trabajo (línea discontinua blanca) con los criterios utilizados para definir el límite superior (amarillo) e inferior (naranja) de la oxiclina (Paulmier y Ruiz-Pino, 2008). (B) Criterio utilizado por Trucco-Pignata et al. (2019) y Sánchez-Velasco et al. (2017) para definir la zona hipóxica (azul) y subóxica (verde). En rojo la definición del límite superior de la ZMO por Cepeda-Morales et al. (2013).

En la Figura 3B, se muestran otros criterios de clasificación por zonas según la concentración de OD. De color azul y verde se señaló el límite de la zona hipóxica y subóxica, respectivamente (Trucco-Pignata et al., 2019, Sánchez-Velasco et al., 2017; Fernández-Álamo y Färber-Lorda, 2006). No se tuvo en cuenta el límite de la zona óxica ya que en el área de estudio de este trabajo hubo pocos valores  $\text{OD} > 200 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Por último, en color rojo se señaló el límite superior de la ZMO (Cepeda-Morales et al., 2013). Este criterio es similar al límite inferior de la oxiclina (Figura 3A, línea naranja) que también coincide con el núcleo de la ZMO (Paulmier y Ruiz-Pino, 2008).

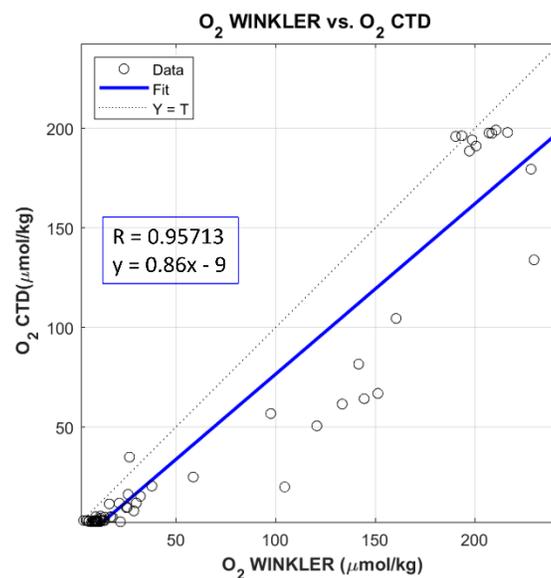
Los límites establecidos por Trucco-Pignata et al. (2019) y Fernández-Álamo y Färber-Lorda (2006) fueron fijados atendiendo al posible efecto de las concentraciones de OD en la respuesta del plancton (componente biológica). Nuestro trabajo se enfoca más al efecto de los cambios hidrográficos en el oxígeno (componente física), y por eso se decidió tomar como el límite superior de la ZMO la isolínea de  $OD=9 \mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ , siguiendo a Cepeda-Morales et al. (2013). Además, para calcular la profundidad de la oxiclina, termoclina y pycnoclina se utilizó el método del gradiente máximo cada dos metros, ya que resultó más adecuado para nuestros datos que el establecido por Paulmier y Ruiz-Pino (2008) en las costas de Chile y es más general al no caracterizarse por un valor fijo.

### **Calibración de datos del CTD con método de Winkler**

Para los cruceros de PROCOMEX y JCFINP se tomaron muestras discretas de agua para el análisis de OD por el método de MicroWinkler (Anderson, 1971). Estas muestras fueron utilizadas con el objetivo de evaluar el desempeño del sensor de OD de la sonda CTD. Las muestras se tomaron en aquellas estaciones con una profundidad > 500 metros. El criterio para la selección de profundidades se basó en los perfiles descendentes de OD, tomando muestras al subir, en cada una de las masas de aguas (profundas, intermedias y superficiales). Esta técnica requiere la concentración de OD de las muestras de agua determinada a partir de la titulación del método MicroWinkler y la salida del sensor CTD utilizado, medido al mismo tiempo cuando las muestras fueron tomadas (Sea-Bird, 2002).

En el caso de los cruceros de PROCOMEX el sensor de oxígeno del CTD es un sensor de membrana polarográfica. Estos sensores utilizan una membrana permeable, al pasar el oxígeno a través de esta membrana se reduce, creando una corriente que el sensor convierte en una medición de la concentración de OD. Esta concentración de OD del sensor SBE43 se obtiene como una señal de voltaje. Para calcular el OD en  $\text{m}\cdot\text{L}^{-1}$  a partir del voltaje de salida del sensor se utiliza la técnica modificada de Owens y Millard (1985) descrito también por Garcia (2005). Este consiste en un análisis de regresión lineal por mínimos cuadrados entre las mediciones *in situ* con el método analítico (MicroWinkler) y las estimaciones del sensor de OD. Todas las unidades se convertirán a  $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , como se explicó en la sección anterior.

En el crucero JCFINP se utilizó un sensor óptico de oxígeno (*Idronaut Blue Cap Oxygen Optical Sensor*). Este tipo de sensor mide bajo el principio de la excitación de fluorescencia. Los sensores contienen tinte fluorescente que es excitado por la luz de una cierta longitud de onda, en este caso con luz naranja-roja. Dependiendo de la cantidad de moléculas de oxígeno presentes, la respuesta de luminiscencia del sensor óptico varía. Los indicadores excitados por la luz roja muestran luminiscencia en el infrarrojo cercano, que disminuye con el aumento de oxígeno. El principio de medición se basa en una luz de excitación roja modulada sinusoidalmente. Esto da como resultado una emisión modulada sinusoidalmente desfasada en el infrarrojo. El cambio de fase se convierte en unidades de oxígeno según la teoría de Stern-Vollmer. Para la calibración de este sensor de oxígeno se hizo una regresión lineal entre las mediciones obtenidas por MicroWinkler y las del sensor. La validación se puede observar en la Figura 4. En general las concentraciones de OD calculadas por el método de MicroWinkler fueron más elevadas que las del sensor del CTD. A mayores profundidades, con concentraciones de OD más bajas, las diferencias fueron menores. De allí se hizo un ajuste lineal que resultó en un coeficiente de correlación alto, de 0.95713.

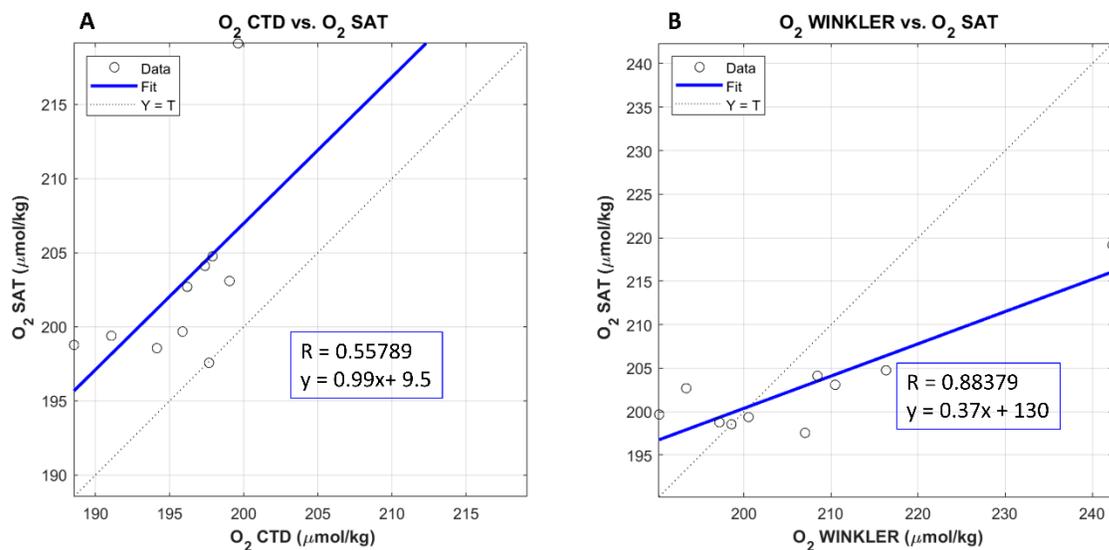


**Figura 4.** Regresión lineal entre las mediciones obtenidas por MicroWinkler y el sensor óptico del CTD para el crucero de JCFINP2205.

A continuación, se compararon los datos de OD obtenidos en superficie con la técnica de MicroWinkler con valores de saturación de oxígeno (Fig. 5a). También se comparó el sensor óptico del CTD con los datos

de oxígeno saturado (Figura 5B). El oxígeno saturado, se calculó como la concentración de OD esperada en equilibrio con el aire a una presión de 0 dbar, y a la salinidad y temperatura de la superficie (GSW para Matlab, <http://www.teos-10.org/>). Las concentraciones de OD obtenidas por el sensor óptico fueron muy parecidas a las del oxígeno de saturación (Figura 5A). Por el contrario, los datos de MicroWinkler fueron mayores que el oxígeno saturado (Figura 5B).

Finalmente, debido a que las diferencias entre las mediciones del sensor óptico de oxígeno del CTD y las mediciones de MicroWinkler fueron mayores que el error de precisión del sensor óptico (0.1 mg/l en 20% OD), decidimos quedarnos con las mediciones de OD del CTD sin necesidad de hacer una calibración de los datos.



**Figura 5.** (A) Regresión lineal entre las mediciones superficiales del sensor óptico del CTD y el oxígeno saturado. (B) Regresión lineal entre las mediciones superficiales obtenidas por MicroWinkler y el oxígeno saturado. Los datos superficiales fueron aquellas mediciones de OD superiores a  $180 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Para el crucero *PATO6* los datos de concentración de OD obtenidos del CTD en la superficie se compararon con la concentración de OD calculada en saturación. Los datos mostraron una buena correlación y se aplicó una corrección de 1.08 a los datos obtenidos del sensor de oxígeno del CTD (para más información ver Maske et al., 2010)

### Análisis Óptimo Multiparamétrico

Para el estudio de la distribución de las masas de agua en las secciones verticales de los cruceros se utilizó el método de análisis óptimo multiparamétrico (AOM, Tomczak, 1999). Este método supone que cada

parámetro medido en un punto puede expresarse como una combinación lineal de los tipos de masas de agua originales presentes en ese punto (Tomczak y Large, 1989). Se basa en un modelo simple de mezcla lineal, es decir, supone que todas las propiedades de las masas de agua se someten al mismo proceso de mezcla (Karstensen y Tomczak, 1999). En este trabajo se utilizó el método de AOM clásico que utiliza los valores característicos locales de las masas de agua suponiendo que todas las variables se comportarán de la misma manera sin tener en cuenta las transformaciones biogeoquímicas a lo largo de su recorrido desde la zona donde se formó (Llanillo et al., 2012).

Para la realización de este análisis se establece un sistema de ecuaciones lineales de mezcla con las contribuciones de las diferentes masas de agua para cada punto. Debe de tratarse de un sistema sobredeterminado, es decir, el número de variables finales (masas de agua) debe de ser estrictamente inferior al de los parámetros disponibles. En la zona de estudio de los cruceros realizados para este trabajo, se dispone de una situación de mezcla que involucra cuatro tipos de masas de agua (ACC, ATS, AGC y AStSs) de nuestro interés, sin embargo, el conjunto de datos observados consta de solo tres parámetros (temperatura, salinidad y oxígeno). Para la resolución de este problema, se intentaron diferentes alternativas. En primer lugar, se trató de añadir la vorticidad potencial como un parámetro, pero un error en el programa no permitió su cálculo ni introducirla como parámetro calculado por TEOS-10 (a partir de la  $\Theta$  y  $S_A$ ). El error que obtuvimos fue un aumento excesivo de los residuales que no pudimos resolver. En segundo lugar, se planteó dividir la columna de agua en dos partes, ya que el ATS y AGC se encuentran solo en la superficie y la ASsSt a mayores profundidades. Sin embargo, este método no resultó eficiente para resolver las diferencias entre AGC y ATS en superficie, y mostraba el ACC a mayores profundidades. Finalmente se optó por aumentar el número de parámetros añadiendo datos promedios de nitratos y fosfatos obtenidos del WOA 2013 por estación del año. Estos datos son un promedio de todos los valores interpolados en cada nivel de profundidad estándar para ambas variables en cada cuadrado de  $1^\circ$  que contiene al menos una medición para la variable oceanográfica. Para cada uno de los cruceros se tomó como referencia una estación oceanográfica del WOA 2013 próxima a las coordenadas del transecto, se interpolaron los datos de nitratos y fosfatos para obtener mediciones cada 1 dbar y esta misma estación fue utilizada para todo el transecto (ver Tabla 6).

Al añadir los parámetros de nitratos ( $NO_3^-$ ) y fosfatos ( $PO_4^{3-}$ ) a la temperatura ( $\Theta$ ), salinidad ( $S_A$ ) y oxígeno disuelto (OD), el sistema lineal de ecuaciones de mezcla base del análisis AOM en notación matricial viene dado por:

$$\begin{pmatrix} \Theta_1 & \Theta_2 & \Theta_3 & \Theta_4 \\ S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \\ OD_1 & OD_2 & OD_3 & OD_4 \\ NO_{3_1}^- & NO_{3_2}^- & NO_{3_3}^- & NO_{3_4}^- \\ PO_{4_1}^{3-} & PO_{4_2}^{3-} & PO_{4_3}^{3-} & PO_{4_4}^{3-} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Theta_{obs} \\ S_{obs} \\ OD_{obs} \\ NO_{3_{obs}}^- \\ PO_{4_{obs}}^{3-} \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_{\Theta} \\ R_S \\ R_{OD} \\ R_{NO_3^-} \\ R_{PO_4^{3-}} \\ R_{masa} \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$(G) \quad (X) = (d) + (R)$$

Donde los valores observados de temperatura ( $\Theta_{obs}$ ), salinidad ( $S_{obs}$ ), oxígeno disuelto ( $OD_{obs}$ ), nitratos ( $NO_{3_{obs}}^-$ ) y fosfatos ( $PO_{4_{obs}}^{3-}$ ) con sus respectivos residuales definen las columnas del lado derecho (ver Tabla 4 y 5 y Anexo I). Los valores  $\Theta_i$ ,  $S_i$ ,  $OD_i$ ,  $NO_{3_i}^-$  y  $PO_{4_i}^{3-}$  ( $i=1, \dots, 4$ ) representan los valores de parámetros conocidos de los tres tipos de masas de agua. La última fila expresa la condición de conservación de la masa, al añadirla el sistema queda sobredeterminado. El sistema de ecuaciones anterior se puede escribir como  $GX = d+R$ , donde  $G$  es la matriz de masa de agua,  $d$  es el vector de datos observacionales,  $R$  es el vector de residuos del ajuste y  $X$  es el vector de solución desconocida que contiene los coeficientes de contribución de cada masa de agua.

Para resolver el sistema de ecuaciones es necesario la normalización de la matriz de masas de agua ( $G$ ) para hacer comparables los parámetros en diferentes unidades. Esto se logra normalizando con la desviación estándar de los datos, como en la ecuación (13).

$$G'_{ji} = \frac{G_{ji} - \bar{G}_j}{\sigma_j} \quad (13)$$

Una vez que los parámetros son conmensurables, hay que considerar que no todos son igualmente confiables debido a la precisión instrumental o a su gran variabilidad ambiental. Para tener en cuenta estas diferencias entre parámetros se ponderaron mediante pesos variables. Se asignó el mayor peso a la ecuación de conservación de masa, ya que es una condición que tiene que cumplirse forzosamente, y a las ecuaciones correspondientes a la  $\Theta$  y  $S$ , ya que estas variables no se ven afectadas por los cambios biogeoquímicos. Un peso menor para el oxígeno y el menor peso para los parámetros de nitratos y fosfatos (Budillon et al., 2003; Tomczak, 1999).

**Tabla 3. Peso de los diferentes parámetros utilizados en el AOM.**

Parámetro	$\Theta$	$S_A$	OD	$NO_3^-$	$PO_4^{3-}$	Conservación masa
Peso	24	24	7	2	2	24

- *Masas de agua y sus valores característicos*

Al tratarse del método de AOM clásico se utilizaron los valores característicos locales de las cuatro masas de agua (ACC, AGC, ATS y AStSs). Para calcular los valores tipo de temperatura y salinidad (Tabla 4) se realizaron los promedios de los límites de las masas de agua establecidas por Portela et al. (2016).

**Tabla 4. Masas de agua y sus valores característicos de salinidad y temperatura utilizados en el AOM.**

Parámetro	ACC	AGC	ATS	AStSs
$\Theta$ (°C)	15.5	15.5	28.05	13.5
$S_A$ (g/kg)	33.8	35.8	33.8	34.85

Con estos límites se calculó el valor promedio de OD en la ventana de valores de  $\Theta$  y  $S_A$  para cada masa de agua en cada uno de los transectos realizados (Tabla 5). Debido a que hubo pocos transectos con AGC y ATS, para la primera, se hizo un promedio de OD con todos los transectos del PATO 6 y PROCOMEX y otro promedio para los dos cruceros de PESCAR. Para el ATS se utilizó el valor característico promedio establecido por Ryabenko et al. (2012) de  $192.4 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

**Tabla 5. Valores tipo de oxígeno disuelto ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) de las masas de agua utilizadas en el AOM.**

Crucero	ACC	AGC	ATS	AStSs
PATO 6	182.6	158.1	192.4	15.4
PC0703	101.7	158.1	192.4	9.0
PESCAR 24	164.9	165.2	192.4	13.6
PC0506	122.4	158.1	192.4	7.3
PC0608	147.0	158.1	192.4	6.5
PESCAR 18	162.8	165.2	192.4	18.7
PC0511	133.5	158.1	192.4	15.9

**Tabla 6.** Valores tipo de nitratos y fosfatos de las masas de agua tomados del WOA2013 utilizados en el AOM.

Estación	Crucero	Nutriente	Masa agua	Latitud	Longitud	Concentración	Profundidad
Invierno	PATO6 y PC0703	Nitratos	ATS	19.5	-106.5	0	35
			ACC	23.5	-112.5	0.1	35
			AGC	23.5	-107.5	5.7	35
			ASsSt	22.5	-108.5	24.4	200
		Fosfatos	ATS	19.5	-106.5	0.4	35
			ACC	23.5	-107.5	0.4	35
			AGC	23.5	-112.5	1.2	35
			ASsSt	21.5	-107.5	2.9	200
Primavera	PESCAR24 y PC0605	Nitratos	ATS	19.5	-109.5	0	35
			ACC	23.5	-112.5	0	35
			AGC	23.5	-107.5	1.1	35
			ASsSt	23.5	-108.5	26.1	200
				20.5	-108.5	28.1	200
	PESCAR24 y PC0605	Fosfatos	ATS	19.5	-109.5	0.3	35
			ACC	23.5	-112.5	0.7	35
			AGC	23.5	-107.5	1.9	35
			ASsSt	23.5	-108.5	2.9	200
				20.5	-108.5	2.8	200
Verano	PC0608	Nitratos	ATS	22.5	-109.5	0.1	35
			ACC	22.5	-109.5	0.1	35
			AGC	23.5	-107.5	0	35
			ASsSt	22.5	-109.5	28.0	200
		Fosfatos	ATS	19.5	-109.5	0.4	35
			ACC	23.5	-112.5	0.4	35
			AGC	23.5	-107.5	0.3	35
			ASsSt	22.5	-109.5	2.7	200
Otoño	PESCAR18 y PC0511	Nitratos	ATS	19.5	-109.5	0.1	35
			ACC	23.5	-110.5	0.8	35
			AGC	23.5	-107.5	2.9	35
			ASsSt	23.5	-107.5	26.7	175
				21.5	-109.5	25.2	200
	PESCAR18 y PC0511	Fosfatos	ATS	19.5	-106.5	0.5	35
			ACC	23.5	-112.5	0.6	35
			AGC	23.5	-107.5	0.8	35
			ASsSt	23.5	-107.5	2.8	175
				21.5	-109.5	2.6	200

Los valores característicos de nitratos y fosfatos de las diferentes masas de agua fueron obtenidos de datos del WOA 2013 (Tabla 6). Según la estación del año en la que se realizó cada crucero, se seleccionaron los perfiles de aquellas estaciones oceanográficas con valores tipo de cada masa de agua en diferentes coordenadas según los datos disponibles en cada época del año (ver Anexo 1). Para las masas de agua superficiales (ACC, AGC y ATS) se tomaron los valores tipo de nitratos y fosfatos a una profundidad aproximada de 35 m. Por debajo de la superficie, los valores del AStSs se tomaron a una profundidad de 200 m.

Con los datos obtenidos con el modelo AOM se elaboraron secciones verticales de las contribuciones (%) de cada masa de agua para cada crucero y se relacionaron con las secciones verticales de cada parámetro, los gradientes máximos de oxígeno, densidad y temperatura, el máximo subsuperficial de clorofila y el inicio de la zona del mínimo de oxígeno. Solo fueron representadas aquellas contribuciones de masas de agua superiores al 40% (ver por ejemplo Llanillo et al., 2012). Además, a la hora de correr el modelo solo se tomaron en cuenta aquellos datos con un rango de densidad potencial que produjeran residuos de masa muy pequeños para evitar resultados erróneos en la zona superficial por encima de la pycnoclina permanente (Tomczak, 1999).

## **2.2 Perfilador acústico Doppler de Corrientes (ADCP)**

Para los cruceros realizados a bordo de B/I Dr. Jorge Carranza Fraser del INAPESCA también se realizaron mediciones de las corrientes utilizando el Perfilador de Corrientes Acústico Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés) marca RDI, modelo Ocean Surveyor. Este instrumento perfila las velocidades verticales y horizontales en el agua de mar, está instalado en la quilla retráctil del buque, a una profundidad de 7 metros, el cual emite 4 haces de sonido a una frecuencia de 150 kHz. El ADCP tiene un alcance de hasta 400 metros y registra velocidades en franjas ('bins') de 8 metros de profundidad, de esta manera, el ADCP emite un impulso sónico a la frecuencia mencionada y en franjas de 8 metros en la vertical infiere la velocidad promedio mediante el efecto Doppler.

Las observaciones ADCP fueron depuradas para excluir datos erróneos usando la metodología diseñada en la Universidad de Hawaii en el programa CODAS (Common Ocean Data Access Systems; Firing, 1995).

## Capítulo 3. Resultados

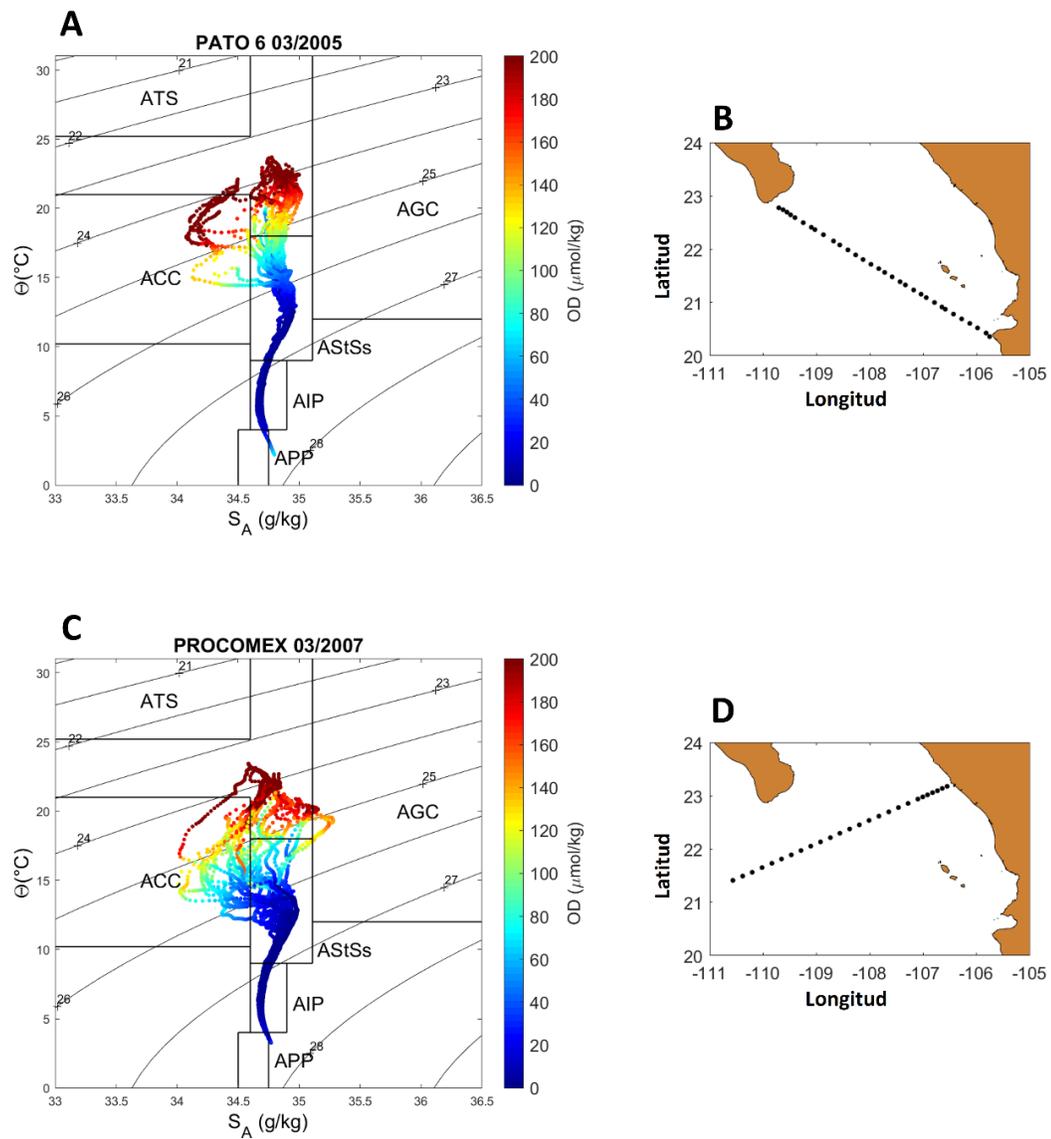
---

### 3.1 Variación estacional termohalina con base en los diagramas $\Theta$ - $S_A$

A continuación se presentan los diagramas  $\Theta - S_A$  de todos los cruceros agrupados de acuerdo a las estaciones del año. En todos los diagramas la mayor variabilidad se encontró en aguas superiores ( $\Theta > 15^\circ\text{C}$  ó  $\sigma_\theta < 26.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Esto se debe a la confluencia de tres masas de agua superficiales en la entrada al Golfo de California que produce una dispersión de valores de salinidad de  $\Delta S_A \sim 1.26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Las masas de agua detectadas con base a la Tabla 1 son: Agua Superficial Tropical (ATS), agua del Golfo de California (AGC), agua de la Corriente de California (ACC) y agua Subsuperficial Subtropical (AStSs). Por debajo de estas aguas están el agua Intermedia del Pacífico (AIP), con núcleo a  $5^\circ\text{C}$  y el agua Profunda del Pacífico (APP) con núcleo por debajo de  $3^\circ\text{C}$ . Estas últimas mostraron menor variabilidad de salinidad ( $\Delta S_A \sim 0.08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) comparada con las aguas superiores. Las concentraciones de OD se pueden relacionar con el campo de densidad. Las aguas menos densas que  $25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  fueron ricas en OD ( $>100 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), mientras que aquellas por debajo de los  $26.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  tuvieron los valores de OD más bajos de la columna de agua ( $<9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), coincidiendo con el Inicio de la Zona del mínimo de Oxígeno (IZMO, Cepeda-Morales et al., 2013).

Durante los meses de invierno se realizaron los cruceros *PATO6* y *PROCOMEX0307*, ambos en el mes de marzo del 2005 y 2007, respectivamente (Figura 6). En estos cruceros predominaron aguas de transición en la superficie con las temperaturas más bajas del año. Por debajo de la superficie está el ACC, caracterizada por temperaturas entre  $10$  y  $21^\circ\text{C}$  y salinidades  $<34.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Esta masa de agua tuvo mayor influencia en el crucero del año 2007 (Figuras 6C y D) ya que el transecto llegó más al oeste ( $\sim 110^\circ\text{W}$ ) que en 2005 (Figuras 6A y B). Las aguas con mayor (menor) concentración de oxígeno (salinidad) se encontraron en la superficie y en el ACC, cuyo contenido de OD alcanzó  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  y salinidad de  $34 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . A partir de la isopícna de  $26 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  aparece el AStSs, con temperaturas entre los  $9$  y  $18^\circ\text{C}$ , salinidad de  $34.6$  a  $35.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  y disminuyen bruscamente las concentraciones de OD. Allí se encuentra el IZMO que se puede distinguir de un color azul intenso. En el crucero del año 2007 unos pocos perfiles mostraron la presencia de AGC en la superficie y cerca de la costa de Sinaloa.

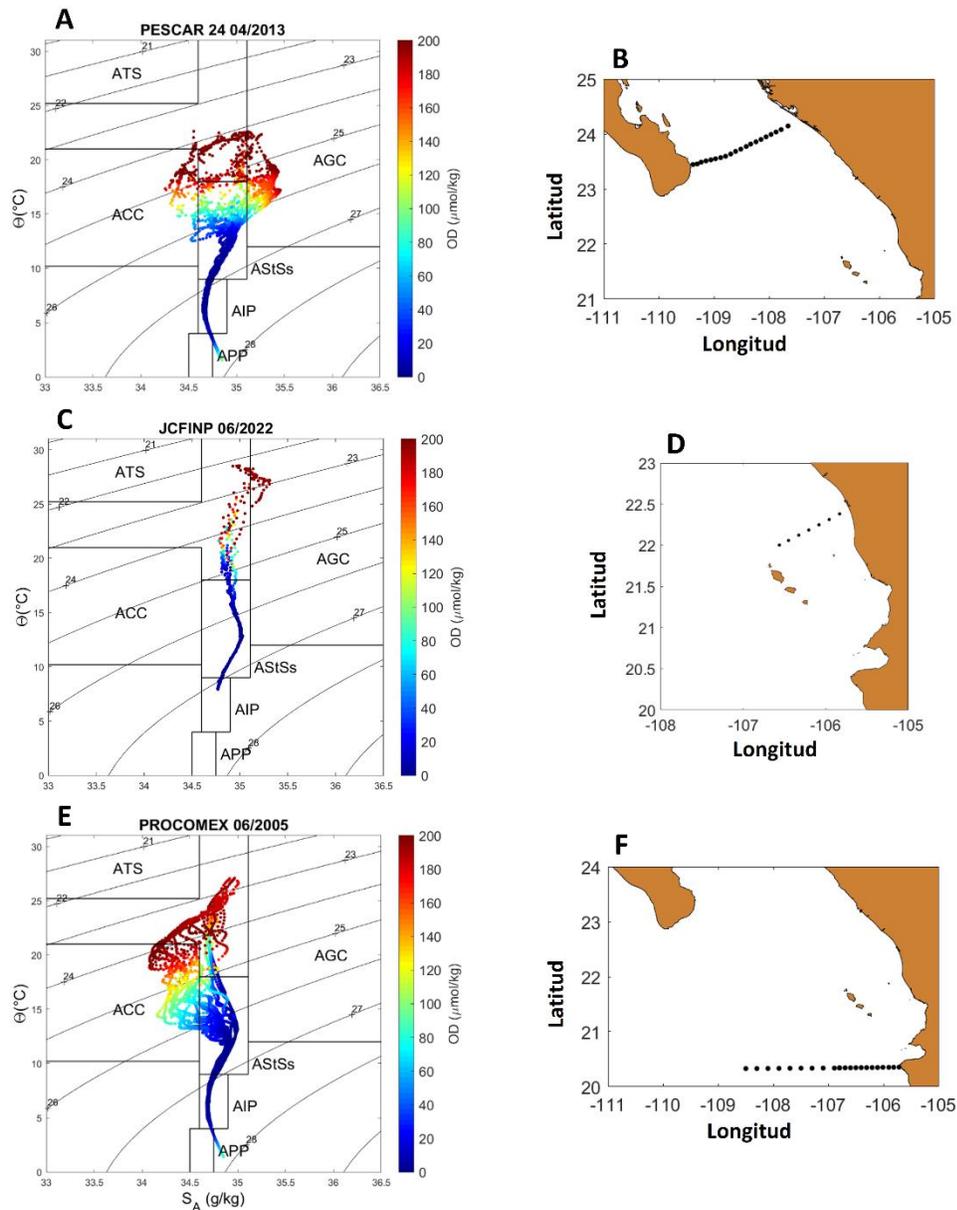
# INVIERNO



**Figura 6.** Diagramas  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) –  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) de la entrada al Golfo de California en invierno. La barra de colores indica la concentración de oxígeno disuelto en  $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ . (A) Crucero PATO6 realizado durante marzo del 2005, (B) con su respectiva área de estudio. (C) Crucero PROCOMEX0703 realizado durante marzo del 2007, (D) con su respectiva área de estudio.

En primavera (Figura 7) tuvieron lugar los cruceros *PESCAR24*, en abril del 2013 (Figura 5A y B), de *JCFINP2205*, en junio del 2022 (Figura 7C y D) y de *PROCOMEX0605*, durante junio del 2005 (Figura 7E y F).

## PRIMAVERA

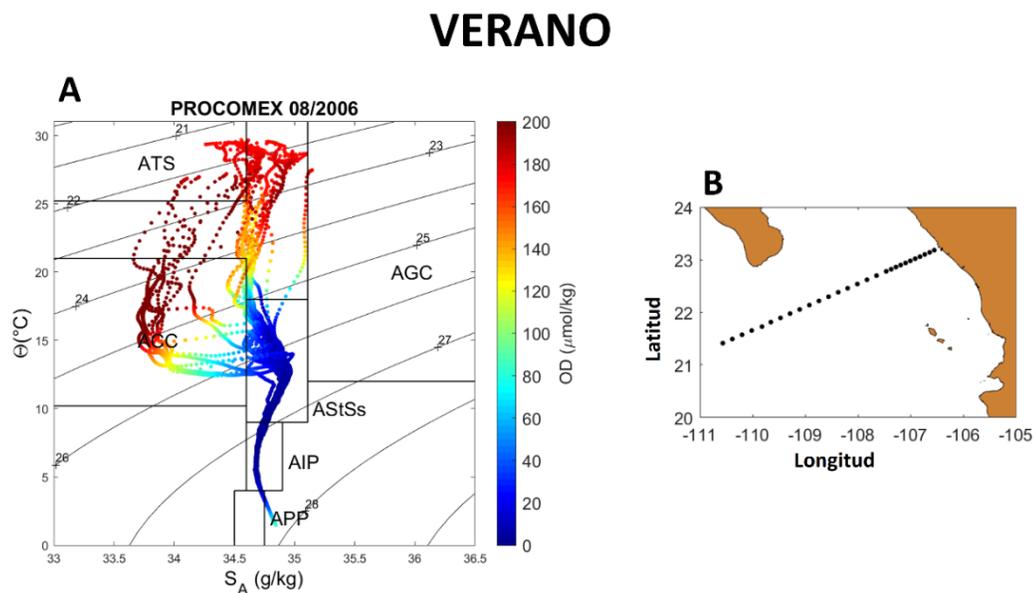


**Figura 7.** Diagramas  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) –  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) de la entrada al Golfo de California en primavera. La barra de colores indica la concentración de oxígeno disuelto ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). (A) Crucero PESCAR24 realizado durante abril del 2013, (B) con su respectiva área de estudio. (C) Crucero JCFINP2205 realizado durante junio del 2022, (D) con su respectiva área de estudio. (E) Crucero PROCOMEX0506 realizado durante junio del 2005, (F) con su respectiva área de estudio.

El primero de ellos se caracterizó por la presencia del AGC en la capa superficial con altas concentraciones de oxígeno ( $>150 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), ya que se realizó dentro del GC. Para el crucero JCFINP2205 se encontraron el AGC y aguas intermedias con alta concentración de OD en la superficie. Por el contrario, en el crucero del 2005 no hubo presencia del AGC sino un predominio de aguas de transición en la superficie y ACC por

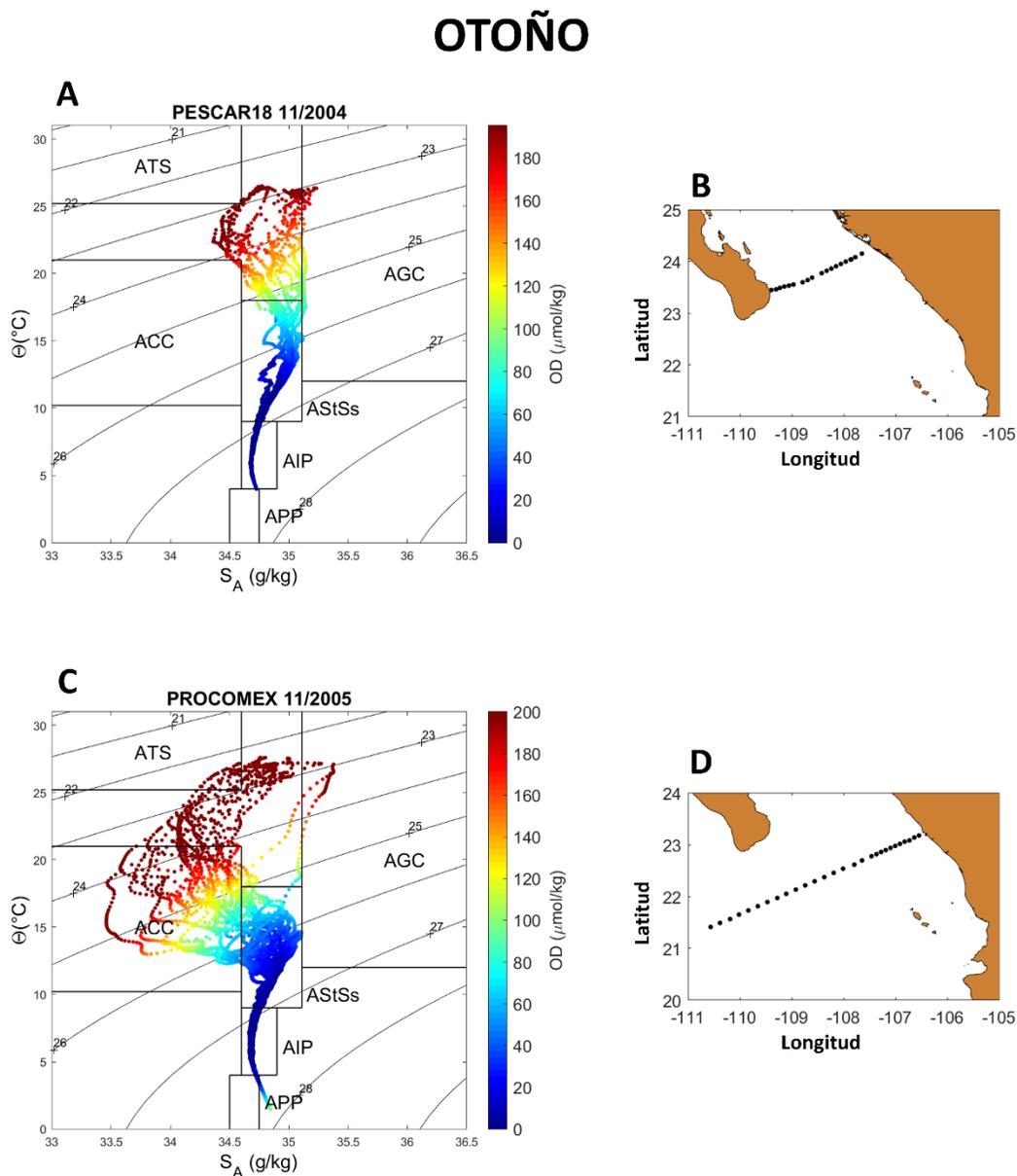
debajo de esta, ambas con altas concentraciones de OD ( $>150 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). En los dos últimos cruceros las temperaturas superficiales fueron más altas ya que se realizaron durante el mes de junio. Las salinidades más bajas se observaron en las ACC del crucero de junio (*PROCOMEX0506*), mientras que las más altas en el AGC de abril (*PESCAR24*). Del mismo modo que los cruceros anteriores, a partir de la isopícna de  $26 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  se encuentra el límite de la ZMO, con concentraciones de oxígeno más bajas y la presencia de las AStSs. Para el crucero *JCFINP2205* y las estaciones situadas frente a Cabo Corrientes del *PROCOMEX0506* el IZMO se encontró más cercano a la superficie en la isopícna de  $24\text{-}25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , esto se verá más claramente en las secciones verticales.

En agosto del 2006 se realizó el crucero *PROCOMEX0608*, desde las costas de Sinaloa hacia mar abierto. En la Figura 8A, se observa un gradiente zonal en las masas de agua, lo cual dividió el transecto en dos partes. La mitad Este de la sección se caracterizó por la presencia de aguas de transición y del ATS en la superficie, con las temperaturas superficiales más altas del año y elevadas concentraciones de OD ( $>150 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). En la mitad Oeste del transecto se observa ACC bajo la superficie, y allí coinciden las concentraciones de oxígeno mayores ( $\sim 200 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) y las salinidades más bajas ( $\sim 33.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Para el caso del IZMO y la presencia de la AStSs, en la mitad Oeste/Este del transecto ocurrió en la isopícna de  $26/25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , la presencia del ACC profundiza el mínimo de oxígeno.



**Figura 8.** Diagramas  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) –  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) de la entrada al Golfo de California en verano. La barra de colores indica la concentración de oxígeno disuelto ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). (A) Crucero *PROCOMEX0608* realizado durante agosto del 2006, (B) con su respectiva área de estudio.

Durante el otoño, noviembre de 2004 y 2005, se realizaron los cruceros de *PESCAR18* y *PROCOMEX0511* (Figura 9). En estos cruceros se mantuvieron temperaturas altas ( $>25^{\circ}\text{C}$ ) en la superficie. En el crucero de 2004 (*PESCAR18*, figura 9A y B), no se observó presencia de AGC.



**Figura 9.** Diagramas  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) –  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) de la entrada al Golfo de California en otoño. La barra de colores indica la concentración de oxígeno disuelto ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). (A) Crucero *PESCAR18* realizado durante noviembre del 2004, (B) con su respectiva área de estudio. (C) Crucero *PROCOMEX0511* realizado durante noviembre del 2005, (D) con su respectiva área de estudio.

Si comparamos con el PESCAR24 en primavera, este si detecta AGC en esta misma área. En el crucero de 2004 solo se presentaron aguas de transición por encima de la AStSs. El crucero PROCOMEX0511 (Figura 9C y D), a diferencia del año 2004, tiene presencia de ATS en superficial y ACC, como lo indica el mínimo subsuperficial de salinidad. Esto se debe a que este transecto está más al sur de la entrada. Las concentraciones más altas de oxígeno se dieron en aguas superficiales, para ambos cruceros, y en el caso del de 2005 (*PROCOMEX0511*) también por debajo de la superficie en la ACC. En ambos cruceros el límite de la ZMO se encuentra a partir de la isopícnica de  $26 \text{ kg m}^{-3}$ , con concentraciones de oxígeno más bajas y la presencia de las AStSs. En el crucero de PROCOMEX0511 la presencia de ACC profundiza el mínimo de oxígeno.

### 3.2 Secciones verticales y distribución de masas de agua

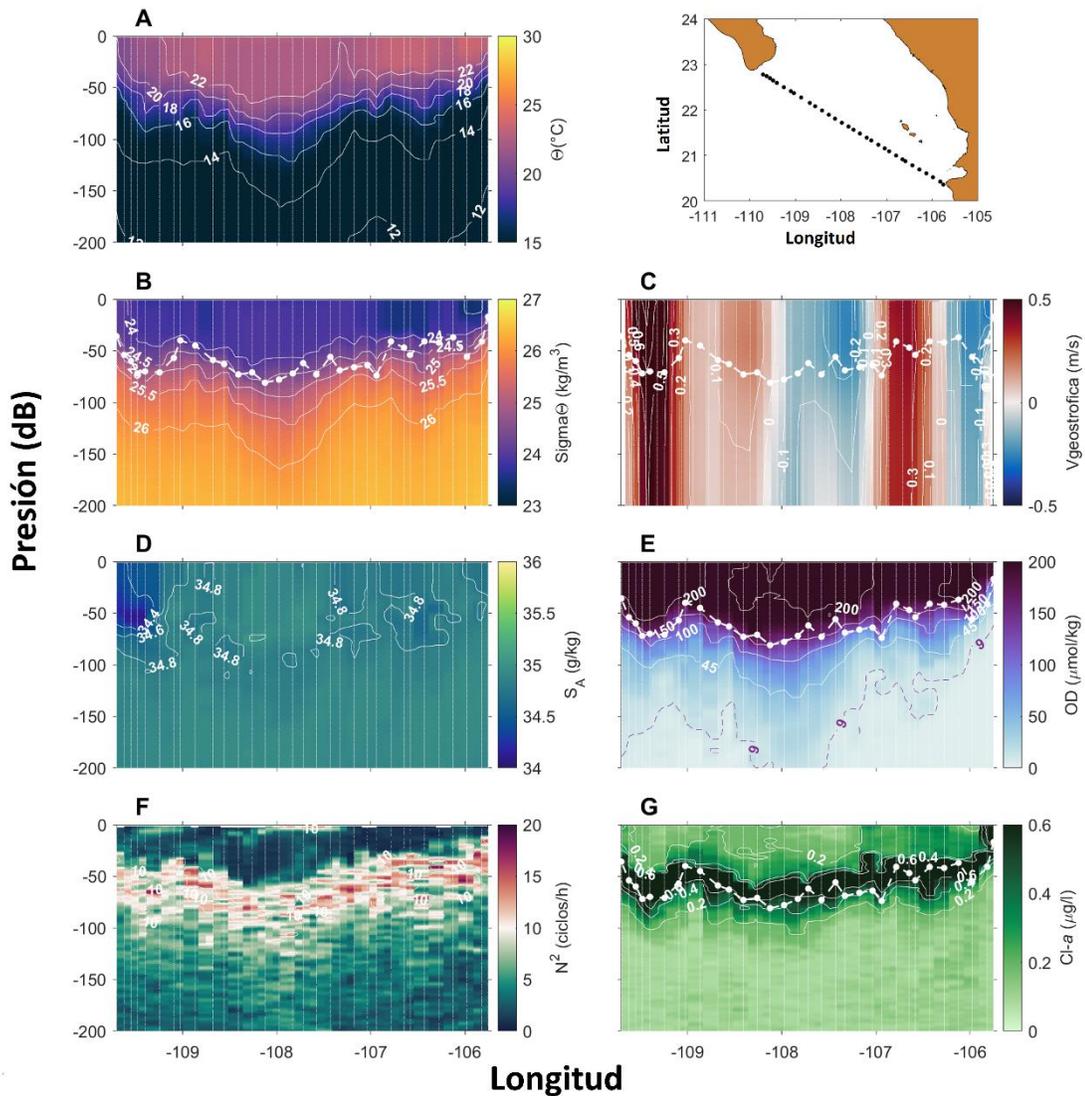
#### Invierno

En la Figura 10 se muestra la sección vertical del transecto que cubrió desde Cabos San Lucas (extremo Oeste) a Cabo Corrientes del crucero *PATO6* (CABOS) de marzo del 2005. En la sección de  $\Theta$  se observa una termoclina entre los 50 y 100 m de profundidad (Figura 10A). En el lado occidental de la sección la termoclina desciende desde 50 m frente a Cabo San Lucas ( $109.5^\circ\text{W}$ ), hasta los 70 m de profundidad afuera de la costa, lo que es indicativo de un flujo hacia el interior del Golfo de California. En la parte central del transecto ( $107\text{-}109^\circ\text{W}$ ) la termoclina adquiere una forma cóncava por la presencia de un flujo anticiclónico. Hacia el Este, entre los  $107$  y  $106^\circ\text{W}$  la termoclina se vuelve a profundizar por la presencia de otro flujo anticiclónico para después elevarse hasta los 50 m fuera de Cabo Corrientes. La variable  $\sigma_\theta$  (Figura 10B) tuvo un comportamiento similar a la temperatura conservativa. Las isopícnas del extremo occidental del transecto se elevan, lo que indica un flujo de entrada. En el resto del transecto las dos estructuras anticiclónicas hacen que las isopícnas se profundicen, siendo más notable en la primera. El campo de velocidad geostrofica (Figura 10C) perpendicular al transecto mostró flujos alternantes con cambios de signo desde la superficie hasta los 200 m de profundidad. . En el lado oeste del transecto ( $109^\circ\text{W}$ ) una corriente costera hacia el interior del GC alcanza  $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  hasta los 200 m de profundidad. En la zona central ( $107\text{-}108^\circ\text{W}$ ) hay una estructura anticiclónica débil con flujo de entrada/salida en el Oeste/Este, con velocidades de  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , con influencia hasta los 200 m de profundidad. A continuación, otra estructura anticiclónica con flujo de entrada (salida) en el Oeste (Este), con velocidades de  $0.3/0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , con influencia hasta los 200 m de profundidad. La sección de salinidad absoluta ( $S_A$ , Figura 10D) muestra un núcleo de baja salinidad en el lado Occidental del transecto ( $109.5^\circ\text{W}$ ) que corresponde a ACC

(<34.6 g·kg<sup>-1</sup>). Este se intensifica bajo la superficie hasta los 75 m. En la sección de oxígeno disuelto (OD, Figura 10E) la oxiclina está señalada con una línea discontinua (blanca). Por encima, se observa una región con mayor concentración de OD superficial en la capa de mezcla con valores de hasta 211 μmol·kg<sup>-1</sup>. Por debajo, el OD disminuye conforme aumenta la profundidad. En el extremo occidental, coincidiendo con el mínimo de salinidad de la ACC, se observan concentraciones altas de OD (de 200 μmol·kg<sup>-1</sup>), acompañado por el ascenso de la oxiclina hacia la costa frente a Cabo San Lucas. En el centro del transecto, entre los 107-109°W, se encuentran concentraciones elevadas de OD cerca de la superficie y la oxiclina se aleja de la superficie como efecto de la presencia de la estructura anticiclónica. En la parte Este del transecto, otra estructura anticiclónica causó el hundimiento de varias isolíneas de oxígeno, sin embargo, no es notable en la profundidad de la oxiclina que disminuye su profundidad frente a Cabo Corrientes. La línea discontinua morada señala la isolínea de 9 μmol·kg<sup>-1</sup> que indica el Inicio de la Zona del Mínimo de Oxígeno (IZMO, Cepeda-Morales et al. 2013). Se observa un aumento de la profundidad de la IZMO por la presencia de las dos estructuras anticiclónicas, seguido de un ascenso a la superficie en el extremo oriental, frente a Cabo Corrientes. La oxiclina estuvo asociada con la isopícna de 24.5 kg·m<sup>3</sup>, mientras que el comportamiento de la IZMO sigue cercano el de la isopícna de 26 kg·m<sup>3</sup> (ver Figura 10B).

En la sección de la frecuencia de Brunt-Väisälä (N<sup>2</sup>, Figura 10F), se puede distinguir la capa de mezcla por los valores bajos de N<sup>2</sup> que indica una estratificación débil. Estos alcanzan hasta los 50-100 m de profundidad y más cerca de la superficie en la parte Este del transecto. En el extremo occidental los máximos también se observaron más cercanos a la superficie, asociado a la presencia de una corriente costera que eleva la estructura hidrográfica. Entre los 50 y 100 m de profundidad, se encontraron los máximos de N<sup>2</sup>, con valores superiores a los 10 ciclos·hora<sup>-1</sup>, lo que indica una estratificación fuerte. Estos máximos coinciden con la profundidad de la oxiclina, termoclina y piconclina. En la parte central del transecto (107-109°W), los máximos se alejan de la superficie, asociado a la presencia de una estructura anticiclónica. Sin embargo, esto no fue notable en la segunda estructura anticiclónica donde los máximos se encontraron a menos de 50 metros de profundidad, frente a Cabo Corrientes. A medida que aumenta la profundidad N<sup>2</sup> disminuye y se reduce la estratificación. La distribución vertical de *Chl-a* se describió a través del sensor de fluorescencia y posteriormente transformando a *Chl-a* (μg·l<sup>-1</sup>). La Figura 8E muestra la presencia de un máximo subsuperficial de *Chl-a* (MSC). El MSC coincidió con la profundidad de la oxiclina, la isopícna de 24.5 kg·m<sup>3</sup> y el máximo de estratificación en N<sup>2</sup>. El valor más alto (8.75 μg·l<sup>-1</sup>) se observó en el lado oeste del transecto y asociado a la presencia de ACC.

## PATO 6 03/2005



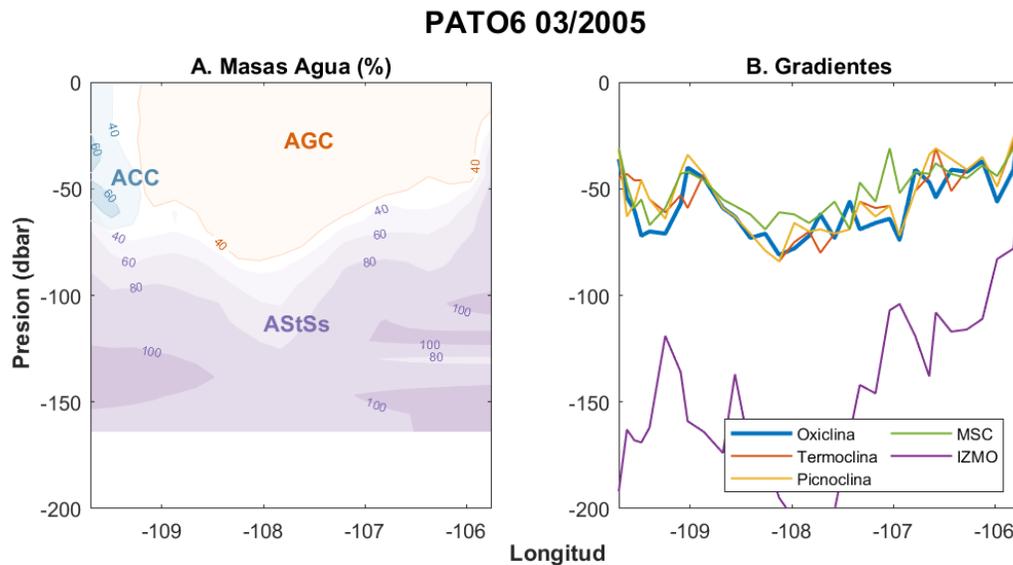
**Figura 10.** Secciones verticales del transecto CABOS del crucero PATO 6, del 9 al 12 de Marzo del 2005. El mapa corresponde al derrotero. (A) Temperatura conservativa,  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); (B)  $\sigma_{\theta}$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); (C) Velocidad geostrófica con referencia 500 m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). (D.) Salinidad absoluta,  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (E.) Oxígeno disuelto, OD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (F.) Frecuencia de Brunt-Väisälä,  $N^2$  ( $\text{ciclos}\cdot\text{h}^{-1}$ ); (G.) Clorofila-*a* (Cl-*a*,  $\mu\text{g/l}$ ). Para la sección de OD (E) la isolínea morada de  $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  indica el inicio de la zona del mínimo de oxígeno (Cepeda-Morares et al., 2013). La oxiclina viene señalada por una línea discontinua blanca superpuesta.

Para el estudio de los cambios en la distribución y mezcla de las masas de agua tanto por advección horizontal como vertical y su influencia sobre las concentraciones de OD se decidió utilizar, además de los

diagramas  $\Theta-S_A$ , el método de análisis óptimo multiparamétrico. Este método nos permite conocer las contribuciones de las diferentes masas de agua en cada punto muestreado a lo largo de cada transecto. Para mayor información ver la sección 5.1 de metodología.

En la Figura 11A se muestra la distribución de las contribuciones de las distintas masas de agua del crucero *PATO6* (marzo 2005). La posición de la profundidad de la oxiclina, termoclina, pincloclina, el MSC y el IZMO se presenta en la Figura 11B. En la superficie del extremo occidental del transecto, en la costa de la Península de Baja California (PBC), se encuentra el ACC con una contribución del 60% arriba de los 50 metros de profundidad. La sección de corrientes geostróficas y OD (Figura 10C y E) muestran que se trata de una corriente costera hacia el interior con alto contenido de OD, entre 110 y 109°W, bordeando la costa de la PBC. En el resto de la superficie del crucero, se puede observar la presencia del AGC a lo largo de la mayor parte del transecto, con una contribución del 40%. Esto indica que se trata de aguas de transición con un predominio del AGC, el diagrama  $\Theta-S_A$  correspondiente a la Figura 6A es consistente con esta distribución. En esta misma sección a la profundidad de 100 metros el AStSs interactúa con las aguas superficiales, mostrándose influenciada por la presencia de procesos de mesoescala. En la zona central del transecto (centrado en 108°W) la presencia de la estructura anticiclónica de la Figura 10C provoca un alejamiento de la profundidad de la oxiclina, termoclina, pincloclina y MSC de la superficie (Figura 9B) aumentando el grosor de la capa de mezcla (Figura 10F).

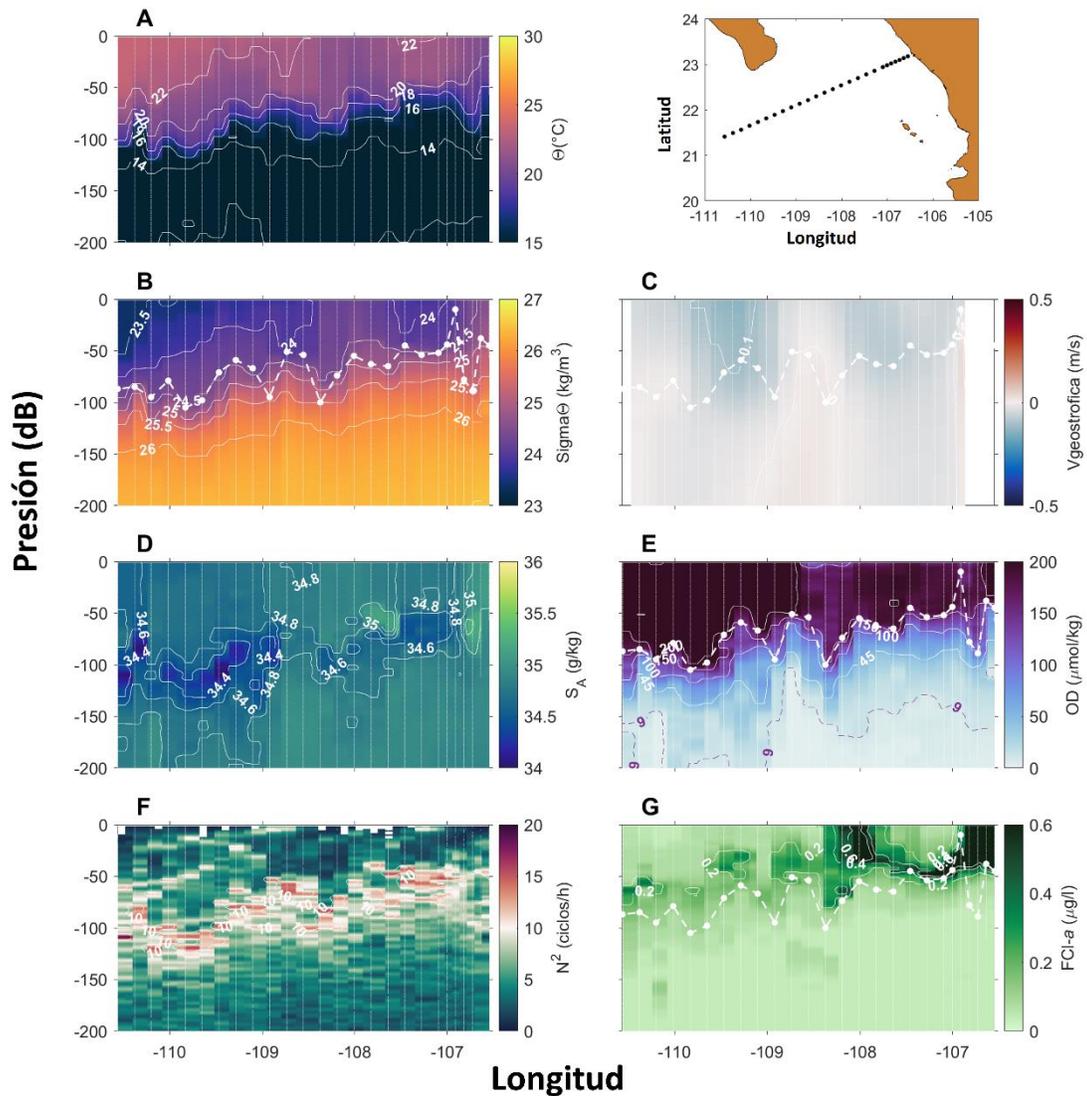
El hundimiento de la pincloclina y la oxiclina coincide con aguas de alta concentración de OD ( $200 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) dentro de la estructura anticiclónica provocando un aumento del contenido de oxígeno hasta los 100 metros (Figura 10E). Además, el efecto de esta estructura provoca un hundimiento del IZMO (Figura 11B) y el AStSs (Figura 11A), cuyas contribuciones superiores al 80% se encuentran por debajo de los 125 metros. En el lado este de la sección, la presencia de una segunda estructura anticiclónica provoca también un hundimiento de la profundidad del IZMO y el AStSs, aunque menos notable que la primera estructura. Sin embargo, no tiene ningún efecto sobre la oxiclina, termoclina, pincloclina y MSC. Hacia el Este, frente a Cabo Corrientes se produce una disminución de la profundidad de la oxiclina y el IZMO hacia la superficie alcanzando los 17 y 47 m de profundidad respectivamente (Figura 11B). Esto coincide con el ascenso del AStSs, con contribuciones de hasta un 80% a 50 m de profundidad. La influencia de estructuras de mesoescala anticiclónicas y corrientes costeras nos permiten asociar el AStSs con la ZMO, tanto con los diagramas  $\Theta-S_A$  como el método de AOM, cuyo ascenso o descenso tiene una relación muy directa con la profundidad del IZMO.



**Figura 11.** Distribución vertical de las masas de agua y su relación con los gradientes máximos de oxígeno, temperatura, densidad, el MSC y el IZMO durante el crucero PATO6 en marzo del 2005. En la distribución de masas de agua (A), los contornos azules muestran las contribuciones (%) del ACC, de color naranja del AGC, de color verde del ATS y de color morado del AStSs. (B) Profundidades para cada estación de la oxiclina (azul), termoclina (naranja), pycnoclina (amarillo), MSC (verde) e IZMO (morado).

La Figura 12 muestra la sección vertical de uno de los transectos del crucero *PROCOMEX0703* durante marzo del 2007. En el lado Este inicia el transecto frente a la costa de Sinaloa hasta la zona más oceánica, al Oeste de la sección. En la sección de temperatura conservativa se observa una pendiente en la termoclina desde 100 m en el Oeste hasta los 50 m en el Este, a lo largo de la sección (Figura 12A). En el lado Oeste del transecto, hasta los 108.5°W, la temperatura superficial alcanza los 23°C, y la termoclina se encuentra a 100 m de profundidad. Respecto a la distribución  $\sigma_\theta$  mostró un comportamiento similar a la temperatura conservativa. En el lado occidental fue menor en la zona superficial y la pycnoclina se observó a los 100 m. Hacia el lado oriental la pycnoclina disminuyó su profundidad. La sección de velocidad geostrofica (Figura 12C) se distingue por el amplio flujo de salida en la parte central (hasta 0.1 m·s<sup>-1</sup>). La sección de  $S_A$  mostró aguas de menor salinidad en la parte occidental transecto, donde se encontraron valores bajos (<34.6 g·kg<sup>-1</sup>), que se corresponden al ACC, desde la superficie hasta ~100 m de profundidad en la parte más oceánica (Figura 12D). En el resto del transecto estos mínimos fueron subsuperficiales entre los 65-100 m de profundidad, con núcleos de menor salinidad entre los 109-110.5°W. En el lado oriental del transecto, frente a la costa de Sinaloa, algunos de los perfiles presentaron AGC (>35.1 g·kg<sup>-1</sup>) entre los 30-60 m de profundidad. La distribución de OD (Figura 6E) a lo largo de la sección muestra una mayor concentración de oxígeno en la mitad Oeste del transecto por la influencia del ACC (<34.6 g·kg<sup>-1</sup>, ver Figura 12D).

## PROCOMEX 03/2007



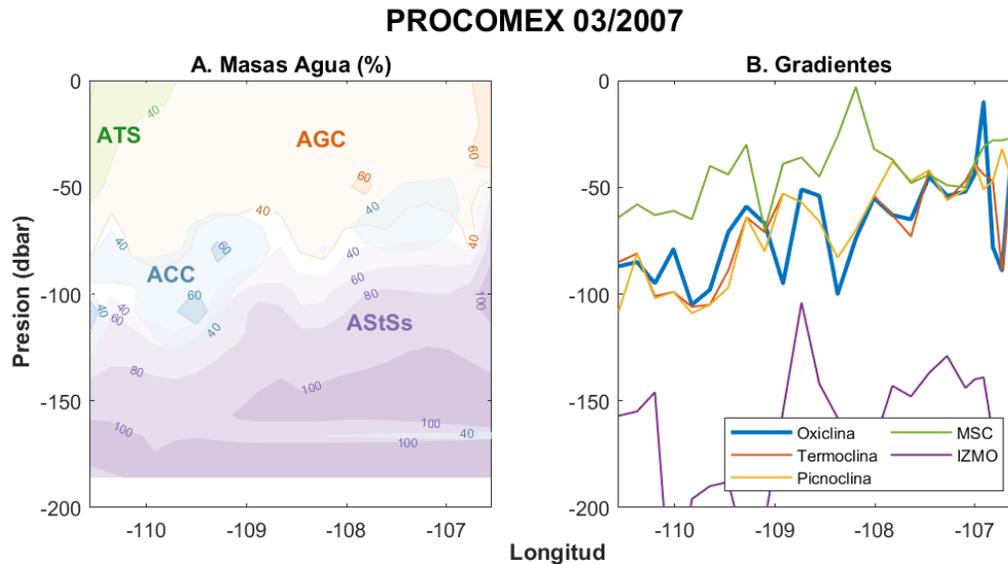
**Figura 12.** Secciones verticales del transecto CABOS del crucero PROCOMEX0703, del 7 al 10 de Marzo del 2005. El mapa corresponde al derrotero. (A) Temperatura conservativa,  $\Theta$  (°C); (B)  $\sigma_\theta$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); (C) Velocidad geostrofica con referencia 500 m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). (D.) Salinidad absoluta,  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (E.) Oxígeno disuelto, OD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (F.) Frecuencia de Brunt-Väisälä,  $N^2$  ( $\text{ciclos}\cdot\text{h}^{-1}$ ); (G.) Fluorescencia (FCl- $\alpha$ ,  $\mu\text{g/l}$ ). Para la sección de OD (E) la isolínea morada de 9  $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  indica el inicio de la zona del mínimo de oxígeno (Cepeda-Morares et al., 2013). La oxiclina viene señalada por una línea discontinua blanca superpuesta.

Estos máximos alcanzaron valores superiores a 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ . La oxiclina se encuentra entre los 50-100 m de profundidad, asociada con la pendiente de la isopícna de 24.5  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Figura 12B). En la mitad occidental del transecto la oxiclina se aleja de la superficie hasta 100 m asociado a la presencia de ACC, al igual que

ocurre con la pycnoclina y termoclina. En el extremo oriental la profundidad de la oxiclina se reduce por la influencia del flujo de entrada que se puede distinguir en las isothermas y las isopícnas de la sección de temperatura y  $\sigma_\theta$  (ver figura 12A y B). Este flujo de entrada coincide con aguas de alta salinidad ( $>35.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) pertenecientes al AGC, causando variaciones rápidas en la oxiclina próximas a la zona costera de Sinaloa. El IZMO sigue un comportamiento similar a la isolínea de salinidad de  $34.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (ver figura 12D), en cuanto a que los núcleos de baja salinidad propios de la ACC ( $<34.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) aumentan la profundidad del IZMO. Para este caso, la isopícna de  $26 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$  no muestra una relación clara con el IZMO. En la sección de la frecuencia de Brunt-Väisälä (Figura 12F), la capa de mezcla se encuentra hasta los 50 m de profundidad, excepto entre los 109-110°W que desciende hasta los 100 m por la presencia del ACC, con valores de  $N^2$  muy cercanos a cero. Entre los 50 y 150 m de profundidad, se encontraron los máximos de  $N^2$ , con valores ligeramente superiores a los  $10 \text{ ciclos}\cdot\text{hora}^{-1}$ , lo que indica una estratificación fuerte. Estos máximos coinciden con la profundidad de la oxiclina, termoclina y pycnoclina. En la sección de fluorescencia (Figura 12G) el MSC no coincide con la profundidad de la oxiclina, la termoclina, pycnoclina, la isopícna de  $24.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$  ni el máximo de estratificación en  $N^2$ , sino que se encuentra por encima de estos. En la superficie del extremo oriental se observa una estructura similar a la que esperaríamos de un remolino anticiclónico. Encontramos máximos de clorofila en los extremos, altas concentraciones de oxígeno (ver figura 12E), núcleo cálido (ver figura 12A) y menor densidad (ver figura 12B) en su interior. Sin embargo, no se aprecia esta estructura anticiclónica en la sección de velocidad geostrofica (ver figura 12C).

En la Figura 13 se muestra la distribución de las contribuciones de las distintas masas de agua del crucero *PROCOMEX0703* (marzo 2007, Figura 13A) y la posición de la profundidad de la oxiclina, termoclina, pycnoclina, el MSC y el IZMO (Figura 13B). En la superficie del transecto nos encontramos con aguas de transición mezcla de AGC con el 40% de contribución, que coincide con el amplio flujo de salida observado en la Figura 12C. En el extremo oriental el AGC alcanza el 60% coincidiendo con el flujo de entrada observado en la Figura 12A y B. En el extremo occidental se encuentra ATS con el 40% de contribución. Por debajo de la superficie a los 100 metros de profundidad se observa la incursión de ACC a lo largo de todo el transecto con contribuciones de hasta el 60%. Esto coincide con el diagrama  $\Theta-S_A$  correspondiente a la Figura 6B donde se distingue aguas de transición, AGC en las estaciones más al Este y ACC a mayores profundidades. La incursión del ACC provoca el hundimiento de la oxiclina, pycnoclina y termoclina, sin embargo, no es notable en la profundidad del MSC (Figura 13B). Estas aguas interactúan por debajo de los 100 metros con el AStSs, que se aleja de la superficie como consecuencia del ACC, así como el IZMO. En el extremo oriental el flujo de entrada (Figura 12 A y B), con una contribución de AGC del 60% reduce la

profundidad de la oxiclina hasta los 38 metros. Esto también provoca un acercamiento a la superficie del AStSs en el extremo oriental, pero no es notable en la profundidad del IZMO.



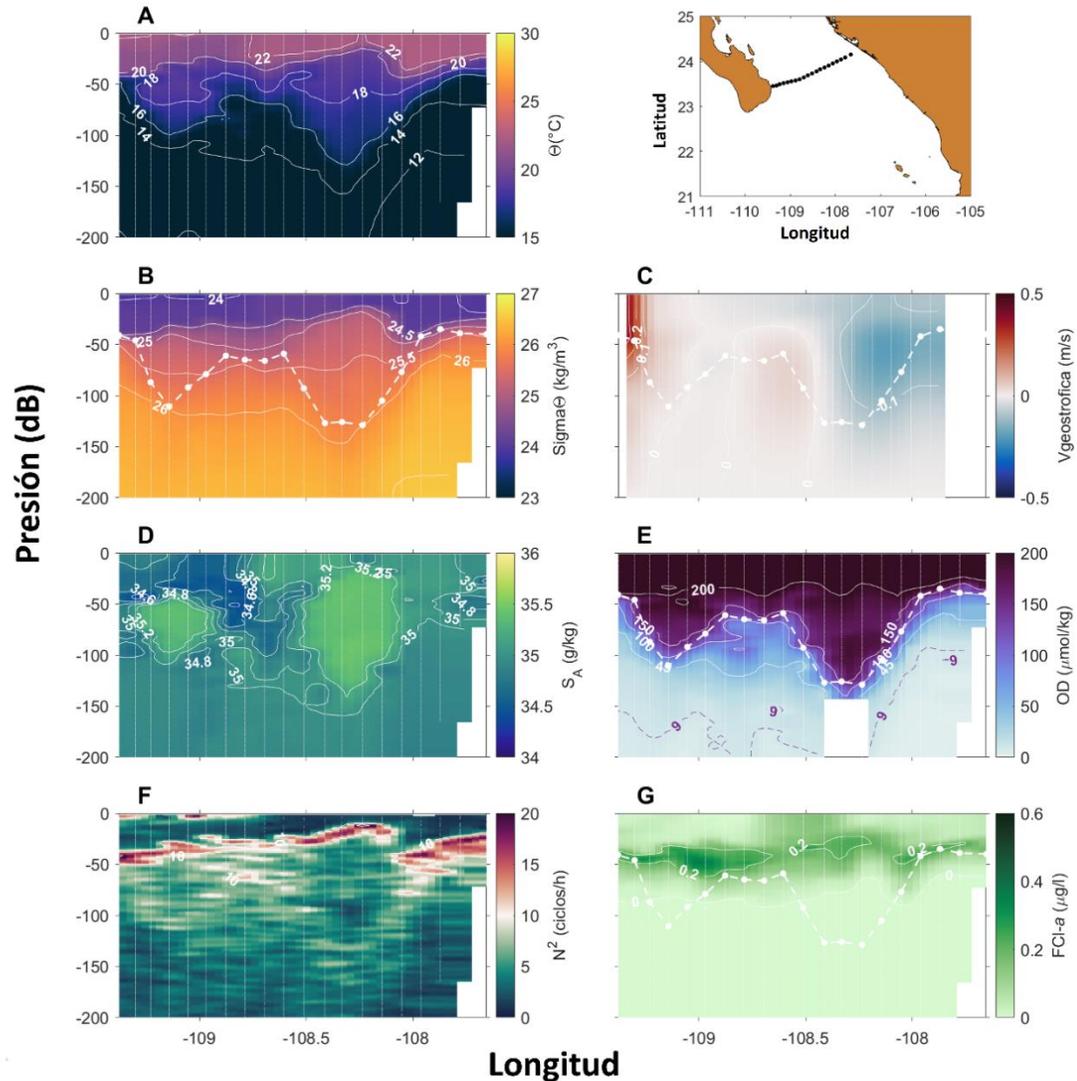
**Figura 13.** Distribución vertical de las diferentes masas de agua y su relación con los gradientes máximos de oxígeno, temperatura, densidad, el MSC y el IZMO durante el crucero PROCOMEX0703 en marzo del 2007. En la distribución de masas de agua (A), los contornos azules muestran las contribuciones (%) del ACC, de color naranja del AGC, de color verde del ATS y de color morado del AStSs. (B) Profundidades para cada estación de la oxiclina (azul), termoclina (naranja), picnoclina (amarillo), MSC (verde) e IZMO (morado).

## Primavera

En la Figura 14 se observa la sección vertical del crucero *PESCAR24* del mes de abril del 2013, esta inicia frente las costas de Sinaloa (Este) y termina frente a las costas de la PBC (Oeste). En la sección de temperatura conservativa (Figura 14A) se observa una termoclina somera por arriba de los 50 m en toda la sección. Entre los 108-108.5°W hay una pendiente convexa, en cuyo centro las temperaturas son mínimas (20°C) mientras que en el resto de la sección alcanza los 22°C. Por debajo, se producen dos hundimientos de las isotermas, uno bajo la termoclina convexa hasta 150 m y otro hacia el extremo Oeste del transecto por arriba de los 100 m. Algo similar se observa en la sección de  $\sigma_\theta$  (Figura 14B) con una picnoclina superficial por encima de los 50 m con una pendiente convexa entre los 108-108.5°W y sus correspondientes depresiones en la isopícna de 26 kg·m<sup>3</sup>. La sección de velocidad geostrofica (Figura 14C) destaca flujos alternantes con cambios de signo desde la superficie hasta 150 m. En el extremo occidental hay un flujo de entrada con velocidades de hasta 0.2 m·s<sup>-1</sup> frente a las costas de Baja California Sur. Al Este de 108.5°W, encontramos un flujo de salida con velocidades de 0.1 m·s<sup>-1</sup>, que alcanza los 150 m de

profundidad. Los flujos entrada/salida describen la circulación de una estructura anticiclónica en la Entrada al Golfo de California.

### PESCAR 24 04/2013

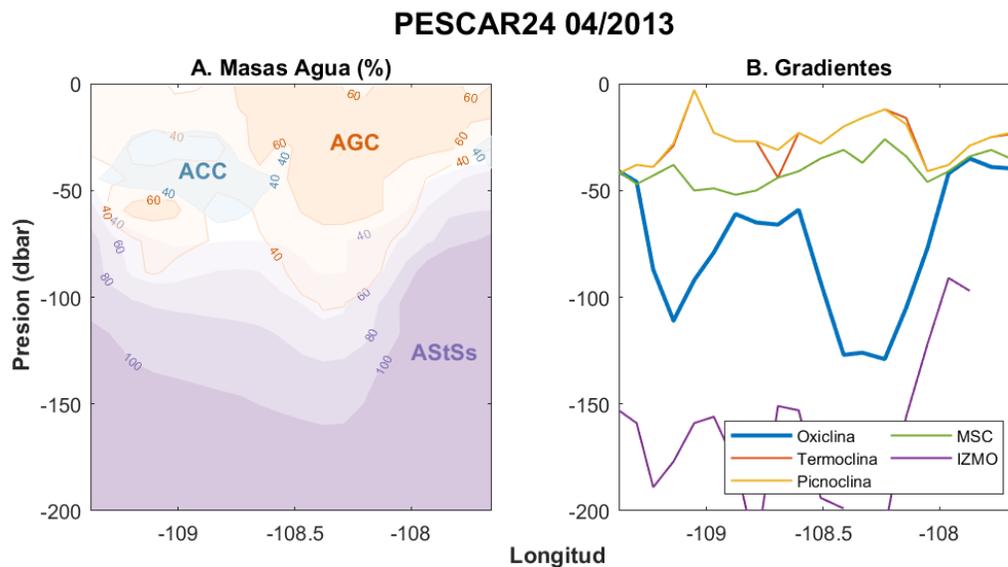


**Figura 14.** Secciones verticales del transecto CABOS del crucero PESCAR24, del 19 al 21 de Abril del 2013. El mapa corresponde al derrotero. (A) Temperatura conservativa,  $\Theta$  (°C); (B)  $\sigma_\theta$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); (C) Velocidad geostrófica con referencia 500 m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). (D.) Salinidad absoluta,  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (E.) Oxígeno disuelto, OD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (F.) Frecuencia de Brunt-Väisälä,  $N^2$  ( $\text{ciclos}\cdot\text{h}^{-1}$ ); (G.) Fluorescencia (FCl-a,  $\mu\text{g/l}$ ). Para la sección de OD (E) la isolínea morada de  $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  indica el inicio de la zona del mínimo de oxígeno (Cepeda-Morares et al., 2013). La oxiclina viene señalada por una línea discontinua blanca superpuesta.

En la sección de salinidad absoluta (Figura 14D) se observan dos núcleos de alta salinidad ( $>35.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) asociados con el AGC. La presencia del flujo anticiclónico provoca que estos valores de alta salinidad lleguen hasta los 150 m de profundidad entre los 108-108.5° W. En el extremo occidental frente a la PBC se encuentran pequeños núcleos de baja salinidad del ACC ( $34.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) entre los 30-50 m. La sección de OD (Figura 14E), muestra una región con alta concentración de OD en la capa superficial ( $<50 \text{ m}$ ) con valores superiores a los  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  por encima de la termoclina y pincoclina. La profundidad de la oxiclina varía entre los 50-100 m, profundizándose con la estructura anticiclónica. En los extremos occidental (oriental) de la sección la presencia de los flujos entrada (salida) ocasiona el acercamiento de la oxiclina hasta menos de 50 m de profundidad. En el lado Oeste la presencia de AGC y ACC (Figura 14D) aleja la oxiclina de la superficie. En este caso, la oxiclina no coincide con la termoclina, pincoclina y la isopícna de  $24.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ya que estas no se ven afectadas por la estructura anticiclónica, pero si con las isolíneas de mayor profundidad. La isolínea de  $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , que indica el IZMO, se aleja de la superficie por la presencia de la estructura anticiclónica, pero en la parte oriental de la sección se vuelve más somera hasta los 100 de profundidad. En la sección de la frecuencia de Brunt-Väisälä (Figura 14F), la capa de mezcla se encontró por encima de los 50 m de profundidad con valores de  $N^2$  muy cercanos a 0. A los 50 m de profundidad, se encontraron los máximos de  $N^2$ , con valores ligeramente superiores a los  $10 \text{ ciclos}\cdot\text{hora}^{-1}$ , lo que indica una estratificación fuerte. Estos máximos coinciden con la profundidad de la termoclina y pincoclina, pero no de la oxiclina. Los MSC en la sección de fluorescencia (Figura 14G) coinciden con la profundidad de la termoclina, pincoclina, isopícna de  $24.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  y el máximo de estratificación en  $N^2$ , pero tampoco coinciden con la oxiclina.

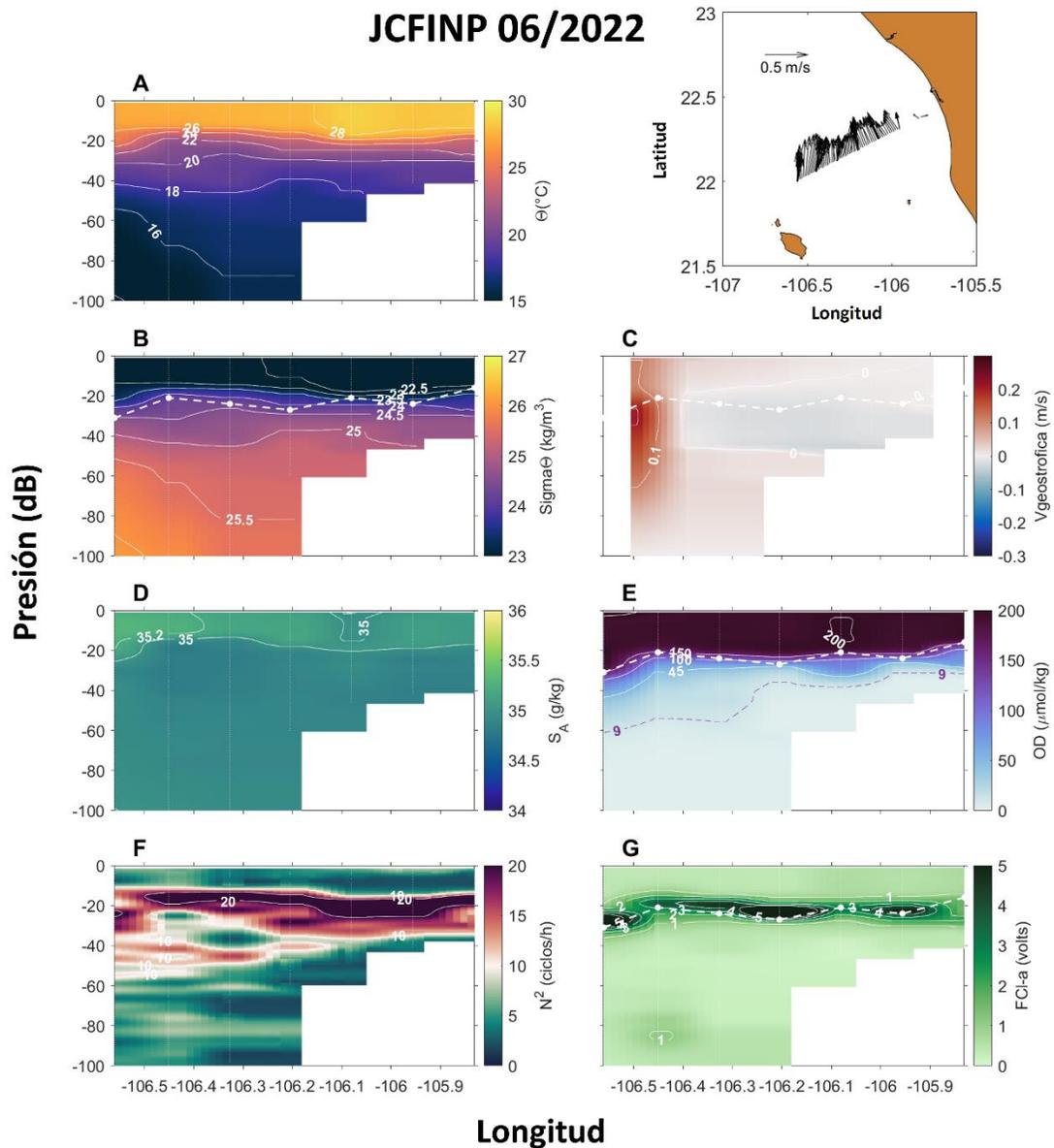
En la Figura 15 se muestra la distribución de las diferentes masas de agua para el crucero *PESCAR24* (abril 2013, Figura 15A) y la posición de la profundidad de la oxiclina, termoclina, pincoclina, el MSC y el IZMO (Figura 15B). En la superficie del transecto nos encontramos con AGC con contribuciones de hasta el 60% (Figura 15A), que se profundizan por la presencia del flujo anticiclónico (Figura 14C). En la mitad occidental se distingue la incursión de ACC, coincidiendo con el flujo de entrada frente a la PBC (Figura 14C), con contribuciones del 40% a los 50 m de profundidad. Esto es coherente con el diagrama  $\Theta-S_A$  de la Figura 5A que muestra ACC, AGC y aguas transicionales mezcla de ambas. Entre los 50 y 100 m de profundidad estas aguas superficiales interactúan con el AStSs, que se aleja de la superficie hasta los 150 m por la presencia de la estructura anticiclónica (Figura 14C) que contiene principalmente AGC. En los extremos del transecto la presencia del AStSs asciende hasta los 50 m de profundidad, lo que provoca también un ascenso de la oxiclina y del IZMO, este último hasta menos de 100 m solo en la parte Este. La estructura anticiclónica observada en este crucero se encuentra bajo la superficie, cubierta por agua más cálida y menos densa (Figura 14 A y B), provocando que los gradientes máximos de temperatura y sigma  $\Theta$  se

encuentren por encima de los 50 m sin ser afectados por el flujo anticiclónico (Figura 15B). Por encima de la pincloclina y la termoclina encontramos los valores más altos de OD con concentraciones superiores a los  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ . La profundidad del gradiente máximo de OD, dado por la oxiclina (Figura 15B), se ve afectado por la presencia del ACC y AGC en la mitad occidental y el flujo anticiclónico, aumentando su profundidad hasta más de 100 m. El núcleo de esta estructura anticiclónica contienen AGC (Figura 15A) con altas concentraciones de oxígeno (Figura 14C). La profundidad del IZMO también se vio afectada por el flujo anticiclónico. El MSC se encontró por debajo de la termoclina y pincloclina viéndose posiblemente afectada por la incursión del ACC, pero no por el flujo anticiclónico.



**Figura 15.** Distribución vertical de las diferentes masas de agua y su relación con los gradientes máximos de oxígeno, temperatura, densidad, el MSC y el IZMO durante el crucero PESCAR24 en abril del 2013. En la distribución de masas de agua (A), los contornos azules muestran las contribuciones (%) del ACC, de color naranja del AGC, de color verde del ATS y de color morado del ASTs. (B) Profundidades para cada estación de la oxiclina (azul), termoclina (naranja), pincloclina (amarillo), MSC (verde) e IZMO (morado).

La sección vertical de uno de los transectos del crucero *JCFINP2205*, de junio de 2022, se extendió desde cerca de las costas de Nayarit hasta las Islas Marías, al Oeste de la sección. En la sección de temperatura conservativa se observa una termoclina a los 20 m de profundidad con temperaturas de hasta  $28^{\circ}\text{C}$  en la zona más cercana a la costa de Nayarit (Figura 16A). La variable  $\sigma_{\theta}$  (Figura 16B) presenta un comportamiento similar a la temperatura, con una pincloclina en los 20 m de profundidad y valores más bajos en la zona Este más cercana a la costa. La sección de velocidad geostrofica (Figura 16C) muestra un flujo de entrada con una velocidad de  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  entre los 20 y 60 m de profundidad al Oeste del transecto. En el resto del transecto los valores se encuentran próximos a cero.

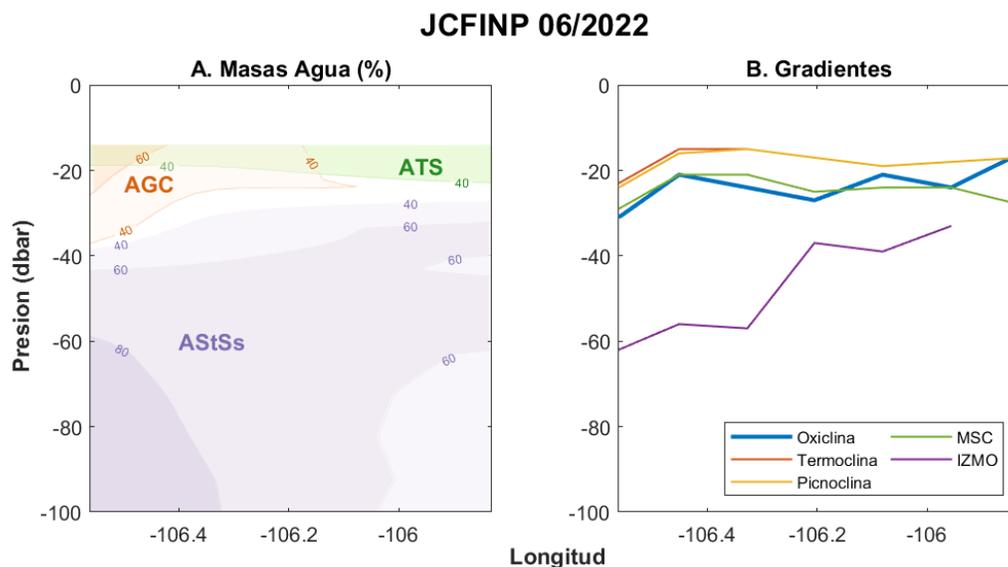


**Figura 16.** Secciones verticales del transecto de Islas Marías del crucero JCFINP2205, del 6 al 7 de Junio del 2022. En el mapa las flechas representan el flujo de la velocidad a 30 m de profundidad medido por el perfilador de corrientes de la embarcación. (A) Temperatura conservativa,  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); (B)  $\sigma_{\theta}$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); (C) Velocidad geostrófica ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) con referencia a 200 m. (D.) Salinidad absoluta,  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (E.) Oxígeno disuelto, OD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (F.) Frecuencia de Brunt-Väisälä,  $N^2$  ( $\text{ciclos}\cdot\text{h}^{-1}$ ); (G.) Fluorescencia (FCl-a, volts). Para la sección de OD (E) la isolínea morada de  $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  indica el inicio de la zona del mínimo de oxígeno (Cepeda-Morares et al., 2013). La oxiclina viene señalada por una línea discontinua blanca superpuesta.

En este crucero también se contó con datos del ADCP. En el mapa de la Figura 16 se representaron las velocidades de las corrientes a 30 m de profundidad, evidencia de la presencia del flujo costero hacia el polo de la Corriente Costera Mexicana (CCM). El tamaño de las flechas indican la magnitud de la velocidad, entre los  $0.45$  y  $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . La dirección nos indica que son corrientes que se dirigen hacia el polo. Estos datos no se observaron en la sección de velocidad geostrófica, donde se obtuvieron valores cercano a cero

(Figura 16C), por lo que no se trata de corrientes geostroóficas. La sección de salinidad absoluta (Figura 16D) muestra valores altos de salinidad ( $>35.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) característicos del AGC. En la sección de OD (Figura 16E) se observa una región con mayor concentración de OD en la capa superficial ( $\sim 20 \text{ m}$ ) por encima de la oxiclina. La oxiclina estuvo asociada con la isopícna  $24.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , mientras que el comportamiento de la IZMO sigue cercano al de la isopícna de  $25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (ver Figura 16B). La profundidad del IZMO para esta sección se encuentra muy cerca de la superficie, aunque en el extremo más occidental alcanzó los 60 m de profundidad y se reduce hasta los casi 30 m en el extremo oriental más próximo a la costa. Respecto a la frecuencia de Brunt-Väisälä ( $N^2$ , Figura 16F), la capa de mezcla se encuentra en los primeros 10 m de profundidad, con valores de  $N^2$  muy cercanos a cero. Entre los 10 y 50 m de profundidad, se encontraron los máximos de  $N^2$ , con valores ligeramente superiores a los 20  $\text{ciclos}\cdot\text{hora}^{-1}$ , lo que indica una estratificación fuerte. Estos máximos coincidieron con la profundidad de la oxiclina, termoclina y picnoclina. En la sección de fluorescencia (Figura 16G) el MSC coincide también con la profundidad de la oxiclina, termoclina, picnoclina, la isopícna  $24.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  y el máximo de estratificación en  $N^2$ .

En la Figura 17 se muestra la distribución de las contribuciones de las distintas masas de agua del crucero JCFINP2205 (junio 2022, Figura 17A) y la posición de la profundidad de la oxiclina, termoclina, picnoclina, el MSC y el IZMO (Figura 17B).

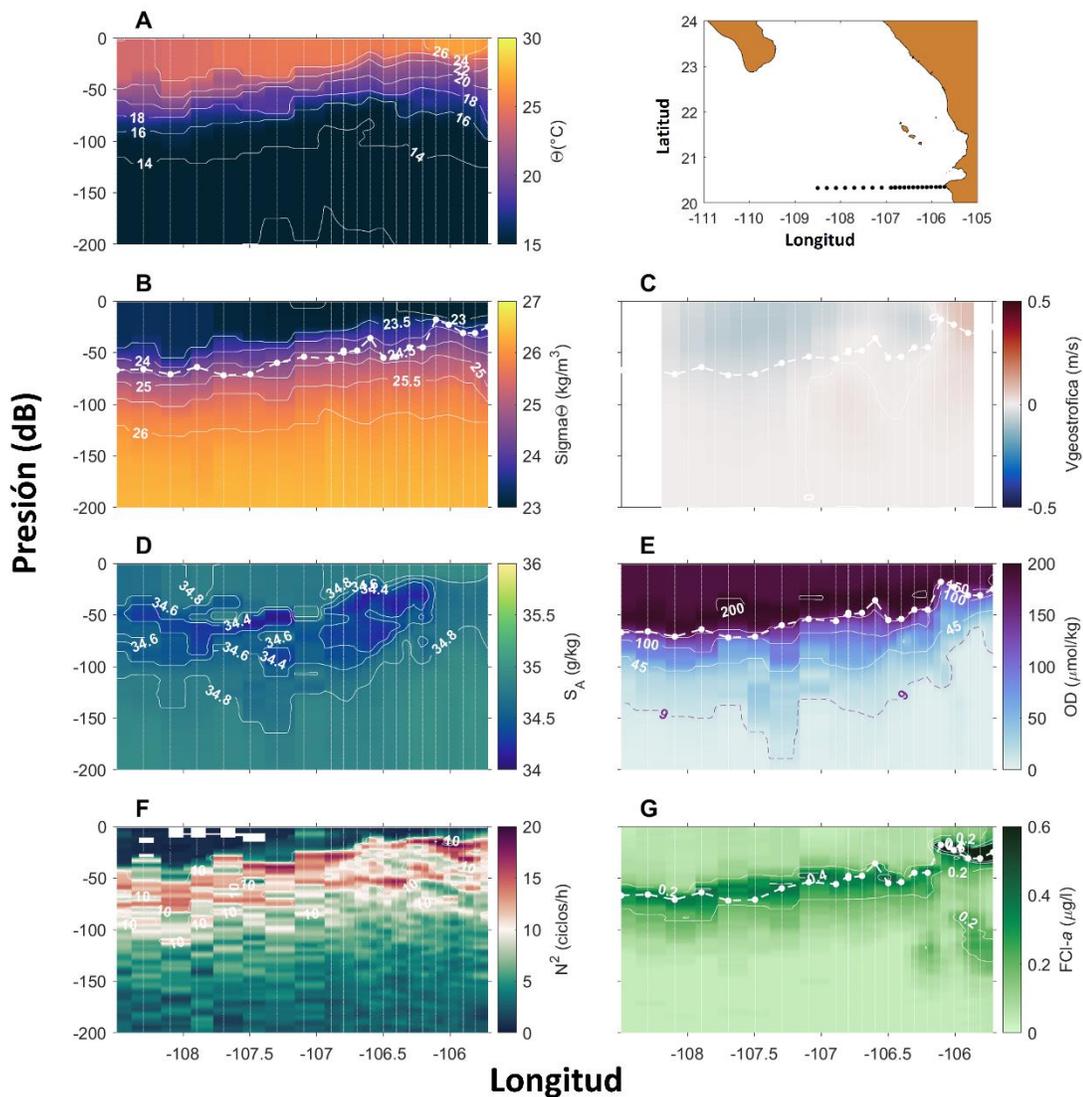


**Figura 17.** Distribución vertical de las diferentes masas de agua y su relación con los gradientes máximos de oxígeno, temperatura, densidad, el MSC y el IZMO durante el crucero JCFINP2205 en junio del 2022. En la distribución de masas de agua (A), los contornos naranjas muestran las contribuciones (%) del AGC, de color verde del ATS y de color morado del AStSs. (B) Profundidades para cada estación de la oxiclina (azul), termoclina (naranja), picnoclina (amarillo), MSC (verde) e IZMO (morado).

En la superficie del transecto nos encontramos con aguas de transición mezcla del AGC, con contribuciones de hasta el 60% en el extremo occidental de la sección, y ATS con contribuciones del 40% durante todo el transecto. Esto coincide con el diagrama  $\Theta-S_A$  correspondiente a la Figura 5C donde se distinguen aguas de transición en la superficie. Por debajo de estas, muy cerca de la superficie, encontramos AStSs con contribuciones del 60% a menos de 40 m de profundidad y del 80% a partir de los 60 m. Tanto la termoclina, picnoclina, oxiclina y MSC reducen su profundidad conforme se acercan a la costa hasta profundidades de 20 m. El IZMO también tiene este mismo comportamiento, asociado a la presencia de AStSs, que alcanza los 40 m de profundidad frente a las costas de Nayarit.

La sección vertical del transecto del crucero *PROCOMEX0506* de junio de 2005, se extendió perpendicularmente desde Cabo Corrientes hacia la zona oceánica ( $\sim 108.8^\circ W$ ; Figura 18). En la sección de temperatura conservativa (Figura 18A) la termoclina presentó una pendiente que va de mayor profundidad ( $\sim 75$  m) al Oeste del transecto, a menor profundidad ( $< 50$  m) en la parte Este. En este crucero de finales de primavera las temperaturas superficiales fueron más elevadas que los cruceros anteriores, alcanzando el máximo de  $26^\circ C$  frente a Cabo Corrientes. Hacia el extremo occidental, las temperaturas superficiales disminuyeron ( $24-25^\circ C$ ). Respecto a  $\sigma_\Theta$  (Figura 18B) resultó muy similar a la temperatura, pero de manera inversa, con valores máximos y una picnoclina más profunda en el extremo occidental, contrario a lo que ocurrió cerca de Cabo Corrientes (valores mínimos y una picnoclina más somera). El campo de velocidad geostrofica presentó un flujo hacia el ecuador en la parte central y oeste del transecto (Figura 18C), de manera consistente con la pendiente de la termoclina y picnoclina. Note que en el extremo oriental se observa un flujo angosto de entrada, con velocidades máximas de  $0.16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . En la sección de salinidad absoluta (Figura 16D), se detectó la presencia de valores mínimos de salinidad subsuperficial entre los 50 y 100 m de profundidad que se corresponden a intrusiones de la ACC ( $< 34.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). En la sección de OD (Figura 18E) se observa una región con mayor concentración de OD en la capa superficial por encima de la oxiclina, con un máximos de hasta  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  que coincidieron con los mínimos de salinidad de la ACC. La oxiclina presentó una pendiente de mayor profundidad (100 m) en el extremo occidental elevándose por encima de los 50 m en el extremo oriental, al igual que la termoclina y picnoclina. La presencia de un flujo de entrada frente a las costas de Cabo Corrientes que corresponde a la CCM, hunde ligeramente la profundidad de la oxiclina (Figura 18C). La oxiclina también estuvo asociada con la isopícna de  $24.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (ver figura 18B). El IZMO sigue un comportamiento similar a la isolínea de salinidad de  $34.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (ver figura 18D), en el que los núcleos de baja salinidad propios de la ACC parecen aumentar la profundidad del IZMO. En el extremo oriental este se eleva hasta casi los 50 m de profundidad. Para este caso, la isopícna de  $26 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  no está relacionada con el IZMO ya que no se ve influenciada por la presencia del ACC.

## PROCOMEX 06/2005

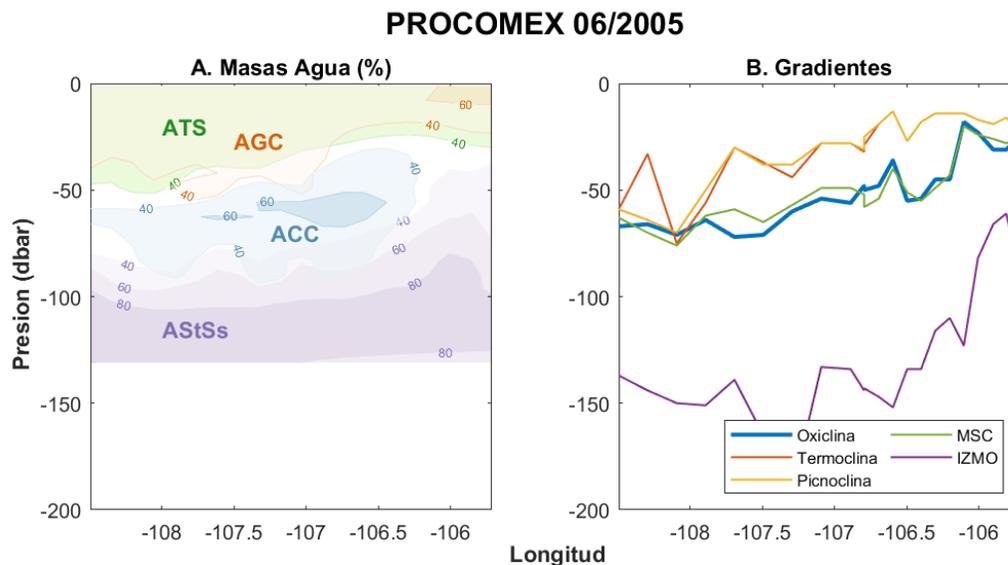


**Figura 18.** Secciones verticales del transecto CABOS del crucero PROCOMEX0506, del 12 al 15 de Junio del 2005. El mapa corresponde al derrotero. (A) Temperatura conservativa,  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); (B)  $\sigma_{\Theta}$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); (C) Velocidad geostrofica con referencia 500 m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). (D.) Salinidad absoluta,  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (E.) Oxígeno disuelto, OD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (F.) Frecuencia de Brunt-Väisälä,  $N^2$  ( $\text{ciclos}\cdot\text{h}^{-1}$ ); (G.) Fluorescencia (FCl-a,  $\mu\text{g/l}$ ). Para la sección de OD (E) la isolínea morada de  $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  indica el inicio de la zona del mínimo de oxígeno (Cepeda-Morares et al., 2013). La oxiclina viene señalada por una línea discontinua blanca superpuesta.

En la sección de la frecuencia de Brunt-Väisälä (Figura 18F), se puede distinguir la capa de mezcla por encima de los 50 m de profundidad, elevándose hasta los 17 m frente a Cabo Corrientes, con valores de  $N^2$  muy cercanos a cero. Los máximos de  $N^2$  se encontraron por encima de los 50 m hasta 100 m de profundidad, con valores ligeramente superiores a los  $10 \text{ ciclos}\cdot\text{hora}^{-1}$ . Estos máximos se encontraron a menor profundidad en el lado oriental frente a Cabo Corrientes, lo que coincide con la pendiente de la

oxiclina, termoclina y pincoclina. En la sección de fluorescencia (Figura 18G) el MSC coincidió con la profundidad de la oxiclina, la termoclina, pincoclina, la isopícna de  $24.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  y el máximo de estratificación en  $\text{N}^2$ . Frente a Cabo Corrientes se encontró el valor máximo de fluorescencia ( $2.0 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ).

La distribución de las masas de agua del crucero *PROCOMEX0605* (junio 2005) y la posición de la profundidad de la oxiclina, termoclina pincoclina, el MSC y el IZMO, se muestran en la Figura 19A y B, respectivamente. A lo largo de todo el transecto, en la parte superficial nos encontramos con la mezcla de AGC y ATS, con contribuciones para ambas del 40% (Figura 19A). Esto se corresponde con la presencia de un flujo hacia el Ecuador (ver Figura 18C), que provoca una reducción de la profundidad de los gradientes máximos a medida que nos acercamos a la costa de Cabo Corrientes (Figura 19B). A los 50 m de profundidad, se observa la incursión subsuperficial del ACC entre los  $106.5\text{-}108.5^\circ\text{W}$ , con contribuciones de hasta el 60% en la zona central del transecto (Figura 19A). Esto coincide con el diagrama  $\Theta\text{-S}_A$  de la Figura 5B que muestra aguas transicionales en la superficie y ACC por debajo de estas. La incursión del ACC provoca un hundimiento en la profundidad de la oxiclina y el MSC, sin embargo, no muestra ningún efecto sobre la termoclina y la pincoclina (Figura 19B). La distribución de AStSs también se ve afectada por el ACC, alejando el AStSs de la superficie por debajo de los 100 m. En el extremo oriental, cuando el ACC desaparece, al Este de  $106.25^\circ\text{W}$  y por debajo de la CCM, el AStSs se acerca a la superficie provocando la disminución de la profundidad de la oxiclina hasta los 25 m y del IZMO hasta los 58 m.

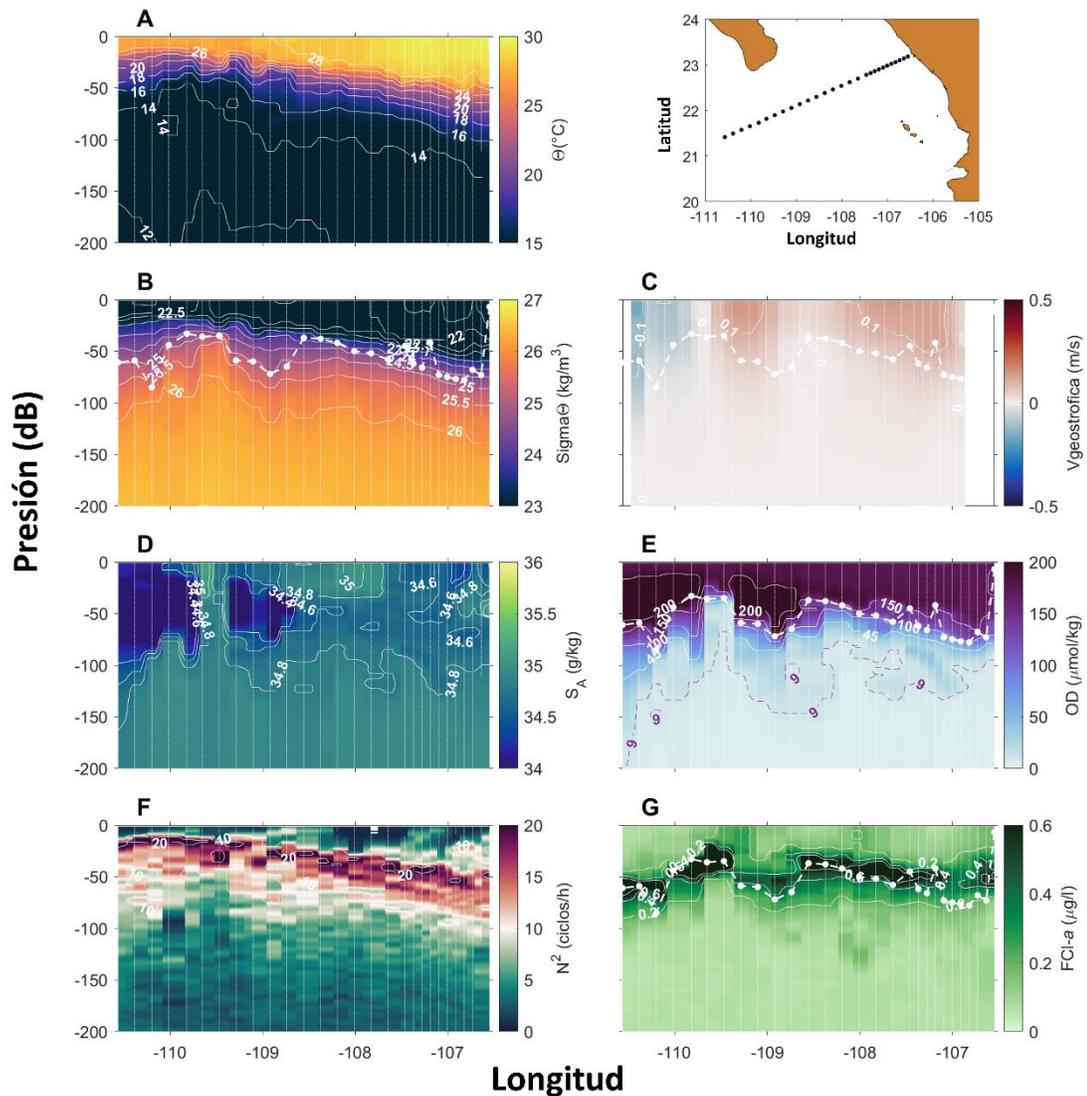


**Figura 19.** Distribución vertical de las diferentes masas de agua y su relación con los gradientes máximos de oxígeno, temperatura, densidad, el MSC y el IZMO durante el crucero PROCOMEX0506 en junio del 2005. En la distribución de masas de agua (A), los contornos azules muestran las contribuciones (%) del ACC, de color naranja del AGC, de color verde del ATS y de color morado del AStSs. (B) Profundidades para cada estación de la oxiclina (azul), termoclina (naranja), pincoclina (amarillo), MSC (verde) e IZMO (morado).

## Verano

La Figura 20 muestra la sección vertical de uno de los transectos del crucero *PROCOMEX0608* de agosto del 2006. El transecto inicial del lado Este frente a la costa de Sinaloa hacia la zona más oceánica ( $\sim 110.7^\circ\text{W}$ ). En la sección de temperatura conservativa (Figura 20A), la temperatura superficial alcanzó los  $30^\circ\text{C}$  en el extremo oriental, provocando una pendiente en la termoclina de menor profundidad ( $\sim 20$  m) al Oeste del transecto debido a la presencia de un flujo ciclónico, a mayor profundidad ( $\sim 50$  m) en el lado Este. La anomalía de densidad potencial (Figura 20B) tuvo un comportamiento similar a la temperatura conservativa, con una pendiente de la picnoclina de menor profundidad al Oeste a mayor profundidad al Este del transecto. La distribución de la velocidad geostrofica (Figura 20C) muestra un flujo ciclónico débil en la mitad occidental con un flujo de salida/entrada en el Oeste/Este, con velocidades de  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e influencia hasta los 100 m de profundidad. En la mitad oriental del transecto se observa un flujo de entrada desde los  $107$  hasta los  $108^\circ\text{W}$  con una velocidad de  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  hasta los 100 m de profundidad. La sección de salinidad absoluta (Figura 20D) muestra dos núcleos de baja salinidad en la mitad oeste del transecto menores a  $34.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , propios del ACC. En el resto del transecto también se encuentran pequeños núcleos con salinidades bajas. En la sección de OD (Figura 20E), por encima de la oxiclina se encuentra la región oxigenada, con valores mayores a  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  en los núcleos de baja salinidad de la mitad occidental del transecto (ver Figura 20D). La presencia del flujo ciclónico produjo el acercamiento de la oxiclina a la superficie hasta menos de 50 m, así como la del IZMO hasta los 75 m. En el resto del transecto, hacia la costa, la oxiclina aumentó su profundidad por el flujo de entrada de agua caliente (Figura 20A y C). La oxiclina coincide con la picnoclina y la termoclina excepto en los núcleos de salinidad baja de ACC que provocan el aumento de la profundidad de la oxiclina, pero no de la picnoclina y termoclina. El IZMO muestra un comportamiento similar a la isopicna de  $26 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  y la isolínea de salinidad de  $34.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (ver Figuras 20B y D, respectivamente). En la sección de la frecuencia de Brunt-Väisälä (Figura 20F), la capa de mezcla se encuentra muy cercana a la superficie, hasta menos de 10 m, en la mitad accidental de la sección por la presencia del flujo anticiclónico. Por debajo de esta, los valores máximos de  $N^2$  alcanzaron valores de hasta  $40 \text{ ciclos}\cdot\text{hora}^{-1}$  muy cerca de la superficie, lo que indica una estratificación fuerte. En la mitad Este se profundiza por la presencia del flujo de entrada a lo largo del transecto. En esta mitad del transecto los valores máximos se encontraron a 50 m de profundidad. Estos máximos coincidieron con la profundidad de la termoclina y picnoclina, sin verse afectados por los núcleos de baja salinidad del ACC. En la sección de fluorescencia (Figura 20G) el MSC coincidió con la profundidad de la oxiclina, viéndose afectada su profundidad por la presencia del ACC en la mitad occidental de la sección.

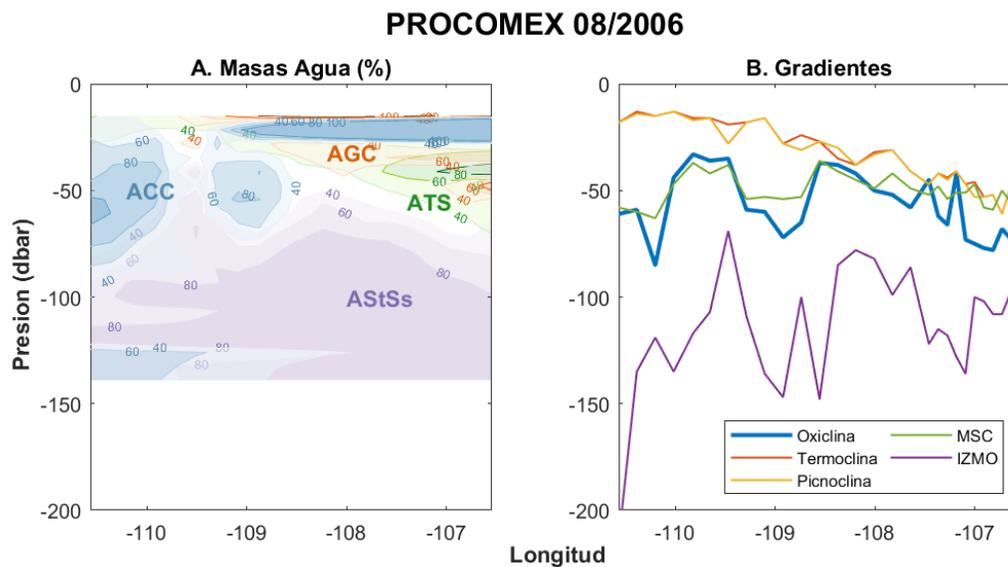
## PROCOMEX 08/2006



**Figura 20.** Secciones verticales del transecto CABOS del crucero PROCOMEX0608, del 7 al 10 de Agosto del 2006. El mapa corresponde al derrotero. (A) Temperatura conservativa,  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); (B)  $\sigma_{\theta}$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); (C) Velocidad geostrofica con referencia 500 m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). (D.) Salinidad absoluta,  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (E.) Oxígeno disuelto, OD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (F.) Frecuencia de Brunt-Väisälä,  $N^2$  ( $\text{ciclos}\cdot\text{h}^{-1}$ ); (G.) Fluorescencia (FCl- $\alpha$ ,  $\mu\text{g/l}$ ). Para la sección de OD (E) la isolínea morada de  $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  indica el inicio de la zona del mínimo de oxígeno (Cepeda-Morales et al., 2013). La oxiclina viene señalada por una línea discontinua blanca superpuesta.

En la Figura 21 se muestra la distribución de las diferentes masas de agua del crucero *PROCOMEX0608* (agosto 2006, Figura 21A) y la posición de la profundidad de la oxiclina, termoclina, pincoclina, el MSC y el IZMO (Figura 21B). En la parte más superficial de la mitad Oeste del transecto encontramos una fina capa de aguas transicionales mezcla de ATS y AGC (Figura 21A), que determinan la profundidad de la termoclina, la pincoclina y la capa mezclada (Figura 21B y 20F). Por debajo de esta, se observa altas contribuciones del

ACC acarreadas por la estructura ciclónica (Figura 20C). La presencia de del ACC, con concentraciones de OD mayores a  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Figura 20E), hace que la oxiclina, el MSC y el IZMO se alejen de la superficie, pero no tiene ningún efecto sobre la termoclina y picnoclina (Figura 21B). La presencia del flujo ciclónico hace que el AStSs y el IZMO se eleven hasta casi los 50 m de profundidad. En la superficie de la mitad Este del transecto con la presencia del flujo de entrada (Figura 20C) se observan aguas de transición mezcla del ACC, AGC y ATS, que provocan el aumento de la profundidad del AStSs y, como consecuencia, el de los gradientes máximos. Para este caso, el modelo tuvo un error al calcular el porcentaje de contribución de las masas de agua superficiales, ya que el porcentaje de mezcla de las tres masas de agua suma más del 100%. Además, la presencia de ACC a los 150 m de profundidad en el extremo Oeste del transecto, por debajo del AStSs, también se debe a un error del modelo.



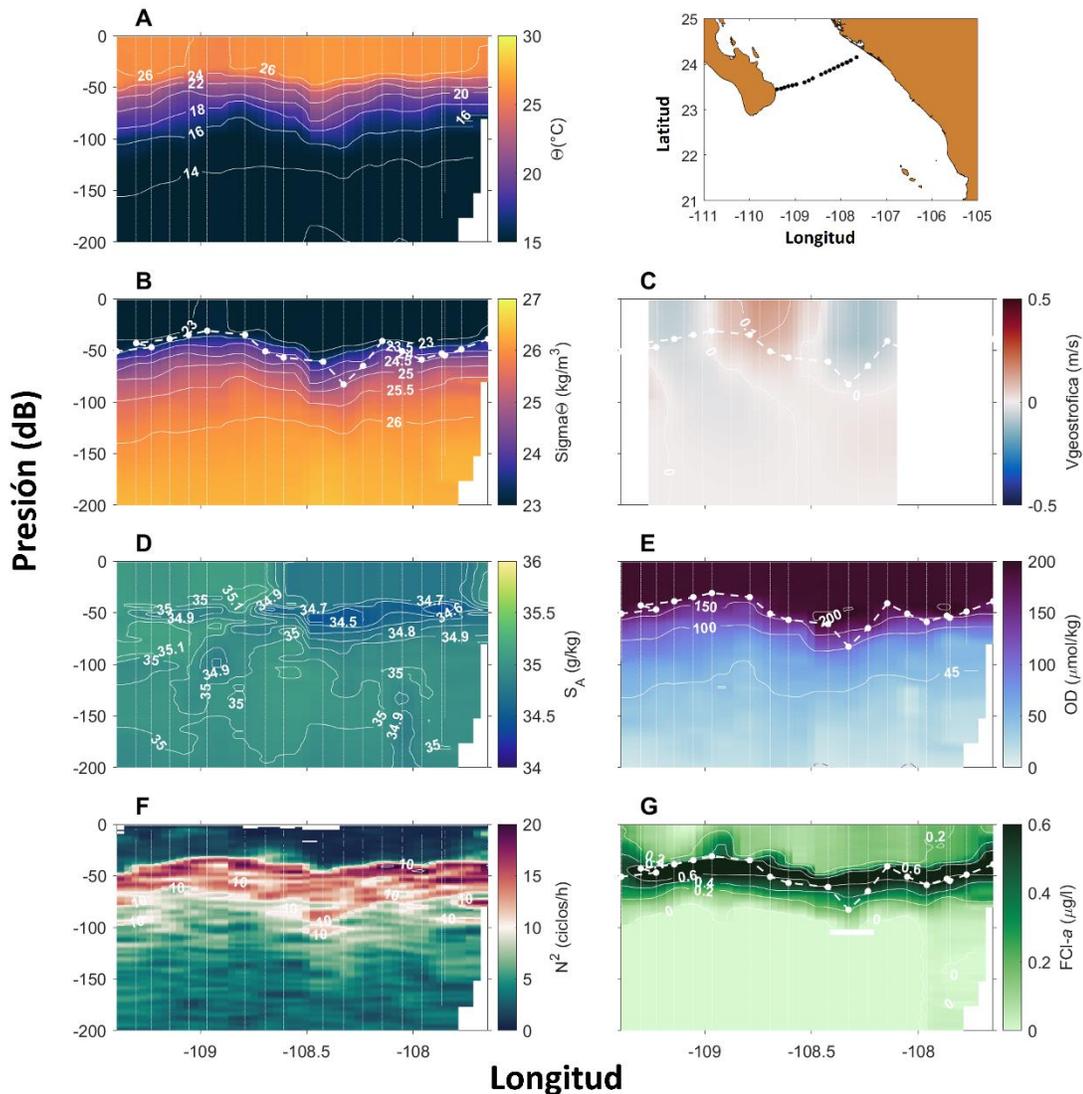
**Figura 21.** Distribución vertical de las diferentes masas de agua y su relación con los gradientes máximos de oxígeno, temperatura, densidad, el MSC y el IZMO durante el crucero PROCOMEX0608 en agosto del 2006. En la distribución de masas de agua (A), los contornos azules muestran las contribuciones (%) del ACC, de color naranja del AGC, de color verde del ATS y de color morado del AStSs. (B) Profundidades para cada estación de la oxiclina (azul), termoclina (naranja), picnoclina (amarillo), MSC (verde) e IZMO (morado).

## Otoño

La sección vertical del crucero *PESCAR18*, de noviembre del 2004, localizado entre las costas de Sinaloa (Este) y las costas de la PBC (Oeste; Figura 22). En la sección temperatura conservativa (Figura 22A) la termoclina se observa aproximadamente a los 50 m de profundidad durante todo el transecto. En la mitad occidental, la termoclina se eleva por la presencia de una estructura ciclónica. Lo mismo se observa en la

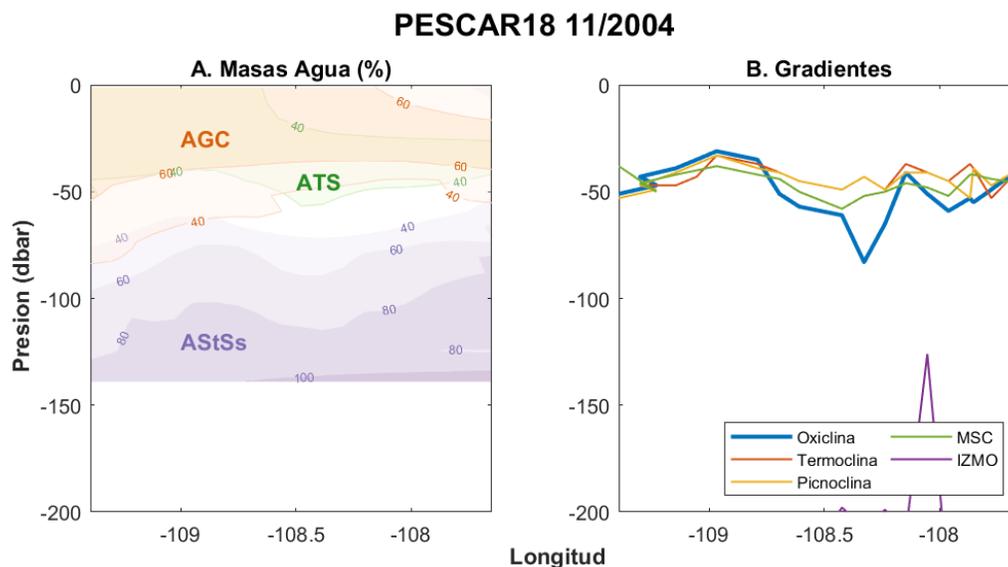
variable  $\sigma_\theta$  (Figura 22B), la estructura ciclónica eleva la pincoclina de la superficie en la mitad occidental. La distribución de la velocidad geostrofica (Figura 22C) muestra flujos alternantes hasta los 100 m de profundidad. La estructura ciclónica de la mitad occidental presenta un flujo de salida/entrada en el (azul/rojo), con velocidades de  $0.07/0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

## PESCAR 18 11/2004



**Figura 22.** Secciones verticales del transecto CABOS del crucero PESCAR18, del 15 al 17 de Noviembre del 2004. El mapa corresponde al derrotero. (A) Temperatura conservativa,  $\Theta$  (°C); (B)  $\sigma_\theta$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); (C) Velocidad geostrofica con referencia 500 m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). (D.) Salinidad absoluta,  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (E.) Oxígeno disuelto, OD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (F.) Frecuencia de Brunt-Väisälä,  $N^2$  ( $\text{ciclos}\cdot\text{h}^{-1}$ ); (G.) Fluorescencia (FCl-a,  $\mu\text{g/l}$ ). Para la sección de OD (E) la isolínea morada de  $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  indica el inicio de la zona del mínimo de oxígeno (Cepeda-Morares et al., 2013). La oxiclina viene señalada por una línea discontinua blanca superpuesta.

En la mitad oriental se observa un flujo de salida con velocidades de  $0.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . La sección de salinidad absoluta (Figura 22D) estuvo marcada por la asimetría entre la mitad occidental y oriental del transecto. En el extremo oeste encontramos valores altos de salinidad ( $\sim 35 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) desde la superficie hasta 200 m de profundidad. A partir de los  $109^\circ\text{W}$  el máximo es subsuperficial, entre los 100 y 200 m, y se extiende hasta el extremo oriental de la sección. En la mitad Este del transecto a 50 m de profundidad y entre los  $108\text{-}108.5^\circ\text{W}$ , se encuentran aguas de baja salinidad propias del ATS ( $<34.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $\Theta > 25^\circ\text{C}$ ). En la sección de oxígeno disuelto (Figura 22E) se observan aguas con altas concentraciones de OD por encima de la oxiclina, con valores de hasta  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  donde se observan los núcleos de baja salinidad pertenecientes a ATS. La oxiclina se elevó por encima de los 50 m de profundidad por la influencia del flujo ciclónico en la mitad occidental. El IZMO, señalado por la isolínea de  $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , se encuentra por debajo de los 200 m y no alcanza a distinguirse. En la sección de la frecuencia de Brunt-Väisälä (Figura 22F), la capa de mezcla alcanzó los 50 m de profundidad, con valores de  $N^2$  muy cercanos a cero. Entre los 50 y 100 m de profundidad, se encontraron los máximos de  $N^2$ , con valores ligeramente superiores a los 10  $\text{ciclos}\cdot\text{hora}^{-1}$ , lo que indica una zona ancha de estratificación fuerte. Estos máximos coincidieron con la profundidad de la oxiclina, termoclina y picnoclina. En la sección de fluorescencia (Figura 22G) el MSC coincidió con la profundidad de la oxiclina, termoclina, picnoclina, la isopícna de  $24.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$  y el máximo de estratificación en  $N^2$ .

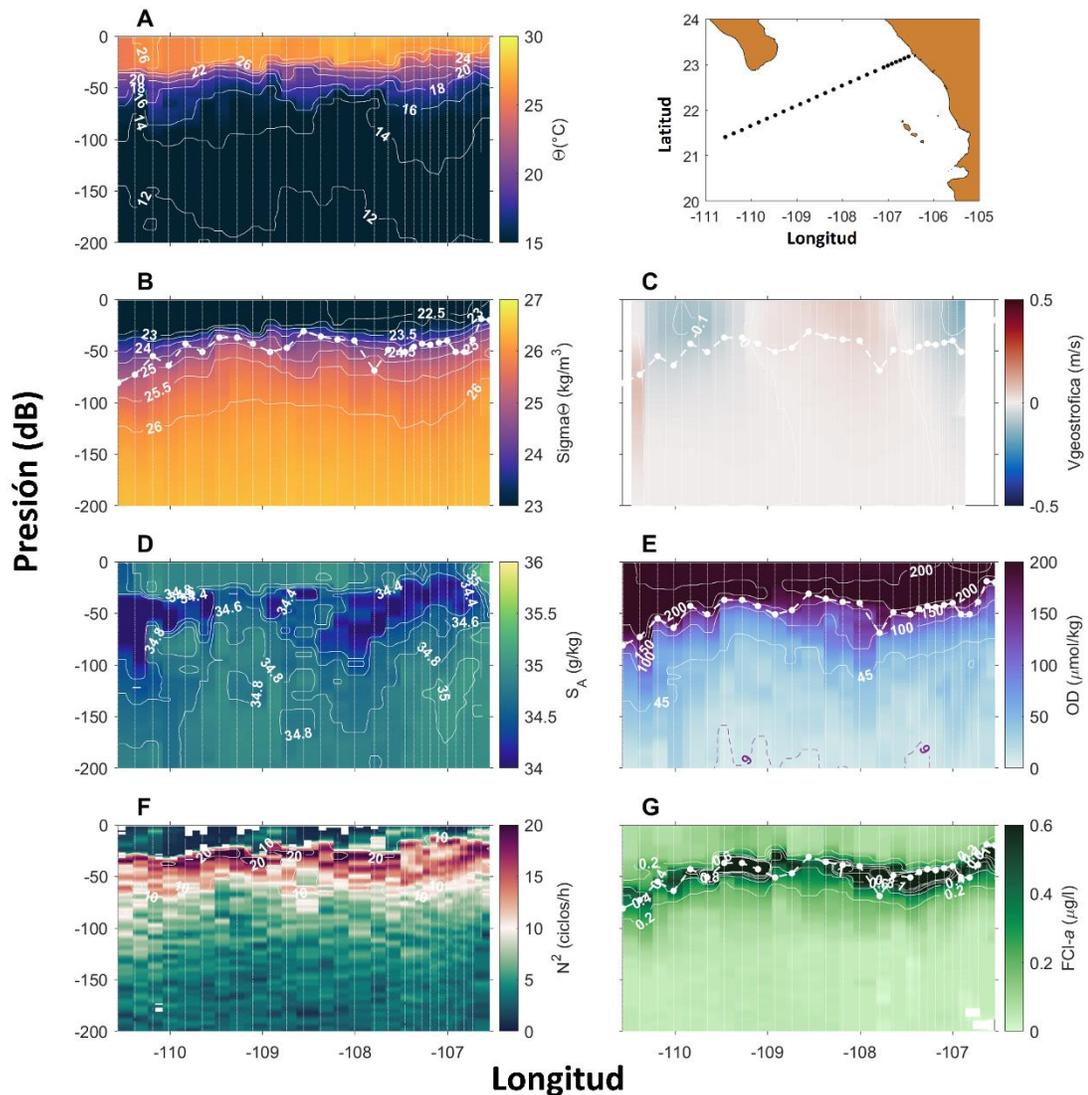


**Figura 23.** Distribución vertical de las diferentes masas de agua y su relación con los gradientes máximos de oxígeno, temperatura, densidad, el MSC y el IZMO durante el crucero PESCAR18 en noviembre del 2004. En la distribución de masas de agua (A), los contornos naranjas muestran las contribuciones (%) del AGC, de color verde del ATS y de color morado del AStSs. (B) Profundidades para cada estación de la oxiclina (azul), termoclina (naranja), picnoclina (amarillo), MSC (verde) e IZMO (morado).

En la Figura 23 se muestran los porcentajes de las distintas masas de agua del crucero *PESCAR18* (noviembre 2004, Figura 23A) y la posición de la profundidad de la oxiclina, la termoclina, picnoclina, el MSC y el IZMO (Figura 23B). En la superficie a lo largo de todo el transecto encontramos aguas de transición con mezcla del AGC y el ATS con contribuciones entre el 40-60% (Figura 23A), lo que concuerda con el diagrama  $\Theta - S_A$  de la Figura 9A. Por debajo, estas aguas interactúan con el AStSs, que se aleja ligeramente de la superficie por la presencia de ATS. Del mismo modo, la presencia del ATS, con altas concentraciones de oxígeno de  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , provoca un hundimiento de la oxiclina entre los  $108-108.5^\circ\text{W}$ . Este hundimiento no fue notable en la termoclina, picnoclina y el MSC (Figura 23B). El IZMO se encuentra por debajo de los 200 m y no alcanza a distinguirse en la sección.

En la Figura 24 se muestra la sección vertical de uno de los transectos del crucero *PROCOMEX0511*, noviembre del 2005. Este transecto se extendió desde cerca de la costa de Sinaloa hacia el Oeste ( $\sim 110.7^\circ\text{W}$ ). En cuanto a la temperatura conservativa, se observa una capa bien mezclada a los 50 m en toda la sección, mientras que la termoclina ocurre por debajo de esta (Figura 24A). La anomalía de densidad potencial (Figura 24B) presenta un comportamiento convexo en la mitad occidental de la sección por la presencia de un flujo ciclónico para después elevarse en el extremo oriental. El campo de velocidad geostrofica (Figura 24C) muestra la presencia de una estructura ciclónica débil con flujo de salida/entrada con velocidades de  $0.1/0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , con influencia hasta los 75 m. En el extremo oriental, se distingue un flujo de  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  hasta los 50 m de profundidad. La sección de salinidad absoluta (Figura 24D) muestra núcleos del ACC ( $<34.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) entre los 50-100 m. Entre los  $108-110^\circ\text{W}$  estos núcleos de baja salinidad se encuentran en ambos extremos del remolino ciclónico. En la sección de oxígeno disuelto (Figura 24E) se observa una región con mayor concentración de OD a los 50 m por encima de la oxiclina, con valores de hasta  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ . En la mitad occidental la oxiclina se acerca a la superficie por la presencia del flujo ciclónico. En el extremo oriental la oxiclina asciende a una profundidad de 20 m coincidiendo con la presencia de un flujo de salida. El IZMO se encuentra por debajo de los 200 m de profundidad. En la sección de la frecuencia de Brunt-Väisälä (Figura 24F), la capa de mezcla se encontró somera, con un grosor menor a los 50 m de profundidad por la presencia del flujo ciclónico, hasta casi desaparecer en el extremo oriental del transecto. Por debajo de esta, entre los 25 y 50 m de profundidad, se encontraron los máximos de  $N^2$ , con valores superiores a los  $20 \text{ ciclos}\cdot\text{hora}^{-1}$ , lo que indica una zona ancha de estratificación fuerte. Estos máximos coinciden con la profundidad de la oxiclina, termoclina y picnoclina. En la sección de fluorescencia (Figura 24G) el MSC coincidió con la profundidad de la oxiclina, la isopícna de  $24.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$  y el máximo de estratificación en  $N^2$ .

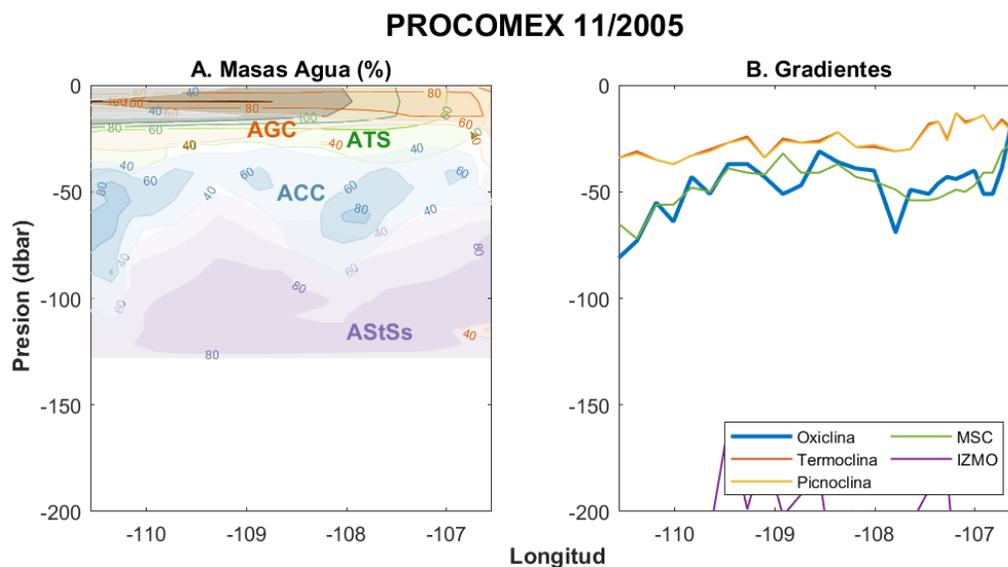
## PROCOMEX 11/2005



**Figura 24.** Secciones verticales del transecto CABOS del crucero PROCOMEX0511, del 5 al 9 de Noviembre del 2005. El mapa corresponde al derrotero. (A) Temperatura conservativa,  $\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); (B)  $\sigma_{\Theta}$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); (C) Velocidad geostrofica con referencia a 500 m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). (D.) Salinidad absoluta,  $S_A$  ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (E.) Oxígeno disuelto, OD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); (F.) Frecuencia de Brunt-Väisälä,  $N^2$  ( $\text{ciclos}\cdot\text{h}^{-1}$ ); (G.) Fluorescencia (FCl-a,  $\mu\text{g/l}$ ). Para la sección de OD (E) la isolínea morada de  $9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  indica el inicio de la zona del mínimo de oxígeno (Cepeda-Morares et al., 2013). La oxiclina viene señalada por una línea discontinua blanca superpuesta.

En la Figura 25 se muestra la distribución de las contribuciones de las distintas masas de agua del crucero *PROCOMEX0511* (noviembre 2005) y la posición de la profundidad de la oxiclina, termoclina, piconclina, el MSC y el IZMO. En la parte superficial, por encima de los 50 m, se detectaron aguas de transición (mezcla de ACC, ATS y AGC; Figura 25A), lo que concuerda con el diagrama  $\Theta - S_A$  de la Figura 9C. Sin embargo, al igual que el crucero *PROCOMEX0806*, el modelo no logra resolver bien las contribuciones de cada masa

de agua en superficie. Por debajo de los 50 m, observamos la incursión subsuperficial de ACC a lo largo de todo el transecto, con altas concentraciones de OD ( $200 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , Figura 24E). Los gradientes máximos de temperatura y  $\sigma_\theta$  (Figura 25B) se encontraron por encima de los 50 m de profundidad con una estrecha capa de mezcla (Figura 24F) debido a la presencia de la estructura ciclónica en la mitad occidental del transecto. Sin embargo, la presencia de ACC rica en OD provoca un hundimiento de la oxiclina y el MSC (Figura 25B). En el extremo oriental de la sección la oxiclina se elevó hasta los 20 m de profundidad por la presencia de un flujo de salida (Figura 24C). La presencia del flujo ciclónico y la corriente costera hacen que el AStSs se eleve por encima de los 100 m, sin embargo, el IZMO se encuentra por debajo de los 200 m y no alcanza a distinguirse en la sección.



**Figura 25.** Distribución vertical de las diferentes masas de agua y su relación con los gradientes máximos de oxígeno, temperatura, densidad, el MSC y el IZMO durante el crucero PROCOMEX0511 en noviembre del 2005. En la distribución de masas de agua (A), los contornos azules muestran las contribuciones (%) del ACC, de color naranja del AGC, de color verde del ATS y de color morado del AStSs. (B) Profundidades para cada estación de la oxiclina (azul), termoclina (naranja), pícnoclina (amarillo), MSC (verde) e IZMO (morado).

## Capítulo 4. Discusión

---

### 4.1 Procesos de mesoescala que modifican la profundidad de la oxiclina

#### Estructuras anticiclónicas

En este trabajo se pudo observar la presencia de estructuras de circulación anticiclónica durante los cruceros de marzo, abril y junio. Para el crucero *PROCOMEX0703* (Figura 12), el flujo de salida que se observó en la mitad occidental del transecto (Figura 12C), es parte de un remolino anticiclónico que transportó ACC hacia el sur, como fue reportado por la distribución de anomalía geopotencial por Godínez et al. (2010). En el caso del crucero *PESCAR24* (Figura 14), los resultados indicaron la presencia de una estructura anticiclónica en la entrada al GdeC, con un flujo de entrada frente a la PBC y un flujo de salida al Este del transecto frente a Sinaloa (Figura 14C). Los datos de anomalías del nivel del mar por Valle (2021) y de velocidad geostrofica en la capa superficial reportado en Castro et al. (2017) también muestran esta circulación anticiclónica. Por otro lado, respecto al crucero de *PROCOMEX0506* (Figura 18), el flujo de salida asociado a un hundimiento de la picnoclina fue parte de un remolino anticiclónico, lo cual fue mostrado en los mapas de anomalía geopotencial de Godínez et al. (2010).

Las estructuras anticiclónicas están asociadas a depresiones de la picnoclina acompañadas por el hundimiento de la oxiclina. Esto profundiza la oxiclina y genera una redistribución en el contenido de OD de la columna de agua superficial, con concentraciones máximas de hasta  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  en el interior del remolino. Este comportamiento se puede observar en los cruceros *PROCOMEX0703* y *PROCOMEX0506* (ver Figura 12E y 18E respectivamente) y en el crucero *PATO6* (Figura 10), donde la hidrografía es consistente con la presencia de un remolino aunque no hay otros datos para confirmarlo. En el caso del crucero *PESCAR24* (Figura 14) la presencia del flujo anticiclónico debido a un remolino subsuperficial genera una picnoclina convexa somera, acompañada del hundimiento de la oxiclina. Esta estructura profundiza la isopícnica de  $26 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  y la isoterma de  $14^\circ\text{C}$ , mientras el máximo de estratificación y el MSC siguen el comportamiento de la picnoclina convexa. Sobre el remolino subsuperficial hay una capa de agua cálida y menos densa, en los primeros 50 m superficiales (Figura 14A y B).

## Estructuras ciclónicas

Durante los cruceros de agosto y noviembre, *PROCOMEX0608* (Figura 20) y *PROCOMEX0511* (Figura 24) respectivamente, se observó la presencia de dos remolinos ciclónicos en la parte más oceánica del transecto, coincidiendo con los datos de anomalía geopotencial de Godínez et al. (2010). Estas estructuras elevan la picnoclina y la oxiclina, acercando el mínimo de OD a la superficie. Para ambos cruceros la termoclina, picnoclina y el máximo de estratificación se elevó por encima de los 25 m, sin embargo, la oxiclina y el MSC estuvieron por debajo debido a la presencia de ACC con alto contenido en OD. Para el crucero de agosto (Figura 20), la presencia del flujo ciclónico también elevó el IZMO a los ~75 m de profundidad. Por el contrario, en el crucero de noviembre el IZMO no se vio afectado ya que se encontró por debajo de los 200 m. En este crucero los valores del MSC fueron elevados en el núcleo del remolino ciclónico y se redujeron en la zona más oceánica del transecto, asociado a un descenso de la profundidad de la oxiclina.

## Corrientes costeras de frontera Oriental

La circulación costera también puede afectar la profundidad de la oxiclina y el límite superior de la ZMO (Cepeda-Morares et al., 2009; Ruelas y Trasviña et al., 2017). La mayor parte de los cruceros presentaron flujos costeros que tuvieron diferentes efectos sobre la profundidad de la oxiclina y el IZMO dependiendo de la zona y época del año. En el extremo oriental del crucero *PESCAR24*, frente a las costas de Sinaloa, la oxiclina y el IZMO se elevaron como consecuencia del flujo de salida del GdeC (Figura 14C). En este punto Castro et al. (2017) encontraron las anomalías negativas más amplias de OD ( $>20 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) correspondientes a AGC.

Al comparar la profundidad e intensidad de la oxiclina y la profundidad del IZMO frente a las costas de Cabo Corrientes (Figura 26A, C y E) y Sinaloa (Figura 26B, D y F), considerando todos los transectos de todos los cruceros que tienen transectos frente a Cabo Corrientes y Sinaloa, encontramos dos comportamientos diferentes:

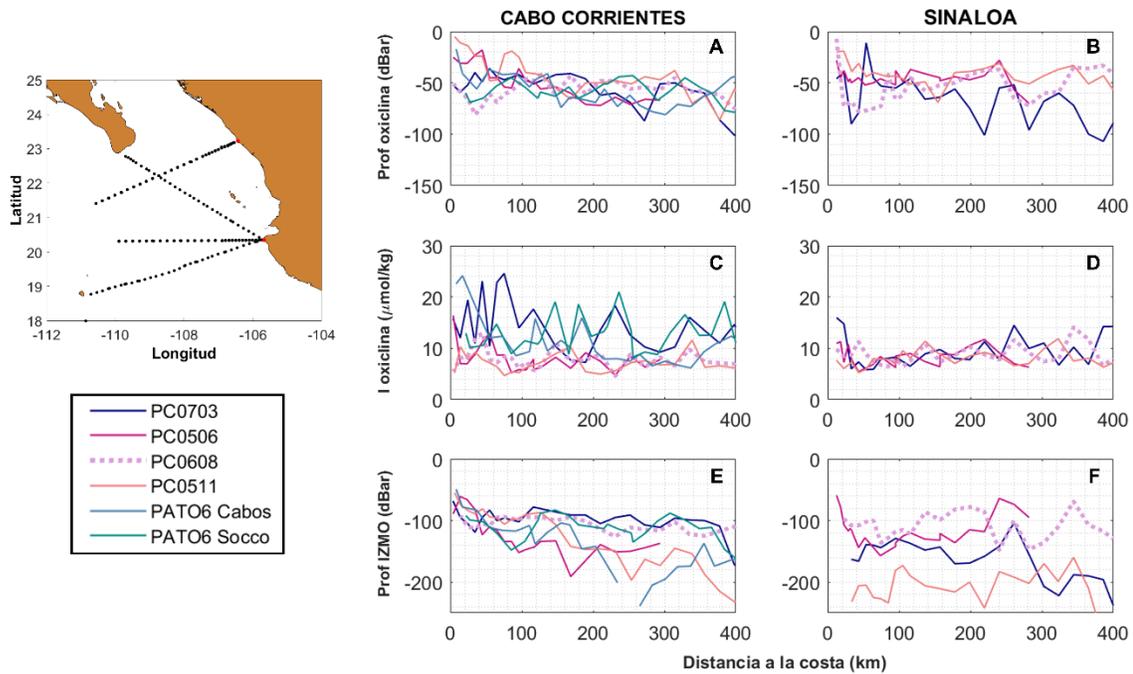
1. Frente a las costas de Cabo Corrientes (Figura 26A, C y E) tanto la profundidad de la oxiclina como del IZMO presentaron un pendiente marcada aumentando con la distancia a la costa. La intensidad de la oxiclina (Figura 26C) es máxima en invierno. Esta elevación frente a las costas de Cabo Corrientes se encuentra ligada a la presencia de surgencias costeras, con vientos favorables del noroeste casi todo el año, los cuales empiezan a debilitarse en junio y alcanzan su mínimo en

agosto (García-Reyes, 2005). Las surgencias costeras implican el movimiento hacia la superficie de aguas profundas con bajo contenido de OD, como el AStSs (ver Figura 11A; Ruelas y Trasviña, 2017). El acercamiento de estas aguas de la ZMO a la superficie, aumenta la posibilidad de mezcla vertical entre la ZMO y la superficie (Maske et al., 2010). La única excepción es el crucero de agosto (color rosa con línea discontinua) porque en esa época no hay evidencia de surgencias y como consecuencia de un remolino anticiclónico frente a las costas de Cabo Corrientes (Godínez et al., 2010). En el caso del crucero de junio, *PROCOMEX0506* (color fucsia Figura 26A, C y E; también Figura 18), la elevación de la oxiclina y del IZMO estuvo asociada a una circulación ciclónica con flujo hacia el polo en la costa (Valle, 2021; Lavín et al., 2006). Esta corriente costera hacia el polo, Lavín et al. (2006) la identifican como Corriente Costera Mexicana (CCM) y acarrea aguas con alto contenido de oxígeno disuelto.

2. Frente a las costas de Sinaloa (Figura 26B, D y F), la oxiclina también se encontró por encima de los 50 m excepto en el caso del crucero *PROCOMEX0608* (color rosa con línea discontinua). En este crucero un flujo hacia el polo de agua cálida provoca el hundimiento de la picnoclina, oxiclina y el IZMO frente a las costas de Sinaloa. En el crucero *PROCOMEX0511* (color coral) se produjo la mayor elevación de la oxiclina a la superficie como consecuencia de un flujo hacia el ecuador. La intensidad de la oxiclina fue similar para todos los cruceros frente a las costas de Sinaloa, no pudiendo destacar ningún comportamiento estacional. La profundidad del IZMO fue bastante variable, sin presentar ningún patrón de comportamiento cercano a la costa.

### **Corrientes Costeras frente a Baja California**

Frente a las costas de la Península de Baja California, en los cruceros *PATO6* (Figura 10) y *PESCAR24* (Figura 14) se observó un flujo de entrada de agua fría, con salinidades bajas y OD relativamente alto hacia el interior del golfo que se identificó como ACC (Figura 11 y 15). Este flujo costero proveniente de la Corriente de California (CC) ocasiona la mezcla entre ACC y el AGC en la entrada al GdeC en esta época del año (Lavín et al., 2009; Portela et al., 2016). Para ambos cruceros la presencia de un flujo costero ocasionó un ligero descenso de la profundidad de la oxiclina y el IZMO debido a las altas concentraciones de OD del ACC. En las estaciones más próximas a la costa, la oxiclina se elevó hacia la superficie a menos de 50 m de profundidad. Frente a Cabo San Lucas se encontraron los valores más altos de clorofila-*a* para el crucero *PATO6*, debido a que se trata de agua rica en nutrientes (Ruelas y Trasviña, 2017).



**Figura 26.** Comparación de la profundidad de la oxiclina (Prof oxiclina), intensidad de la oxiclina (I oxiclina) y profundidad del IZMO (Prof IZMO) entre las costas de Cabo Corrientes y Sinaloa.

## 4.2 Influencia de la distribución y advección horizontal de masas de agua y de su advección horizontal en la oxiclina

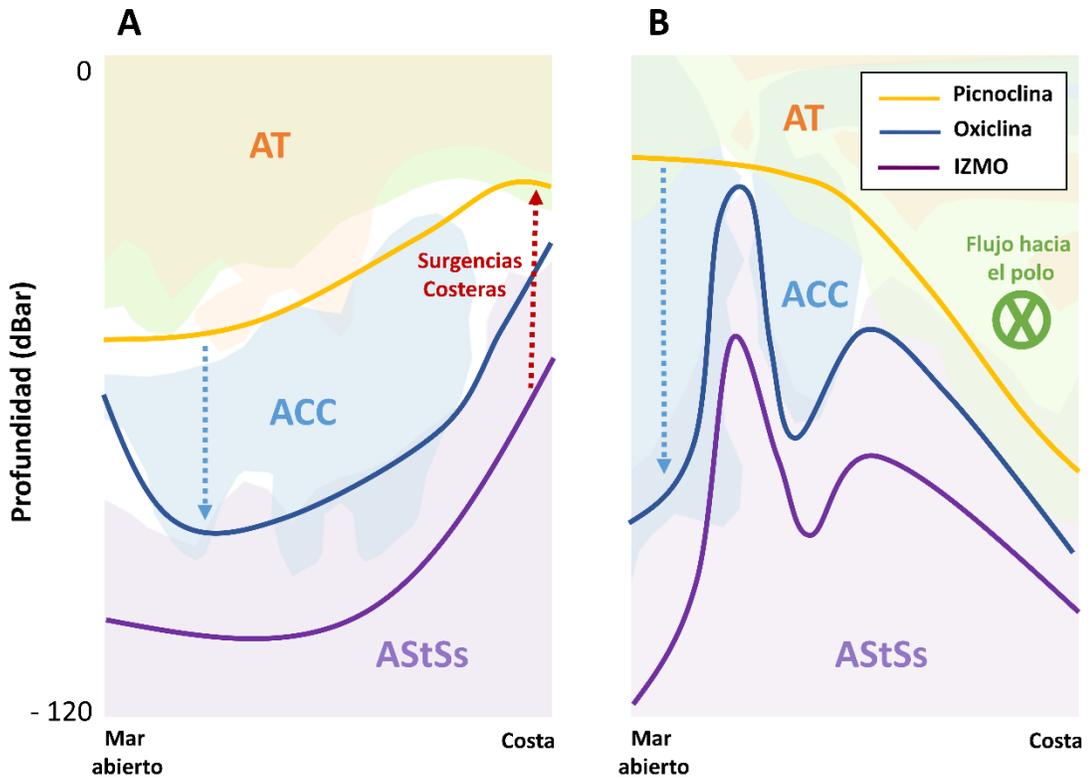
La distribución y mezcla de masas de agua en el océano generalmente está controlada por una combinación de procesos de transporte asociados con la circulación oceánica. A lo largo de este trabajo hemos podido ver que la entrada al Golfo de California es una zona de confluencia de diferentes masas de agua, donde la influencia de procesos de mesoescala altera la composición de la superficie generando masas de agua de características intermedias. Con el objetivo de estudiar cómo afectan estos procesos a los cambios en la distribución y mezcla de las masas de agua, tanto por advección horizontal como vertical, y su influencia sobre las concentraciones de OD se decidió utilizar el método de análisis óptimo multiparamétrico (AOM) junto con los diagramas  $\Theta-S_A$ .

En la capa superficial nos encontramos ACC, ATS y AGC con altas concentraciones de OD, mientras que, por debajo de la superficie, se encuentra el AStSs, caracterizada por bajas concentraciones de OD y estrechamente relacionada con la ZMO. Como hemos visto anteriormente, la presencia de procesos de mesoescala modifican la profundidad de la oxiclina y el inicio de la ZMO (IZMO). Estas alteraciones se deben a la influencia que producen estos procesos en la distribución de las masas de agua en la región.

Además, la presencia bajo la superficie del ACC provoca la ventilación del AStSs. El ACC es superficial en todo su recorrido por la costa occidental de Baja California, pero en la entrada al GdeC todos los datos indican que se encuentra entre los 50-100 m de profundidad. Su intrusión en la región de estudio aporta aguas más frías, con baja salinidad y altas concentraciones de OD. La presencia del ACC aumenta la concentración de OD en la columna de agua, y la oxiclina y el IZMO se profundizan. La presencia de estas aguas está ligada a la estacionalidad del patrón de circulación de la Corriente de California, que muestran su máxima influencia en la entrada al GdeC en la primavera tardía y el verano, aunque también se han observado intrusiones de ACC bajo la superficie en otoño e invierno (Castro et al., 2017). Durante los cruceros de junio, agosto y noviembre el ACC fue acarreada hacia la entrada del GdeC por la presencia a un remolino ciclónico al sur de la península. En los cruceros de marzo y abril no se observa un remolino, sin embargo, un flujo costero de la ACC dobla el cabo de la península hacia el interior del GdeC (Godínez et al., 2010; Castro et al., 2017). El ACC generalmente se encuentra en la zona más oceánica, por debajo del AGC, del ATS o de mezclas de estas dos. La presencia de estas masas de aguas aleja el AStSs de la superficie, sin embargo, más cerca de la costa a menudo no se detecta ACC y el AStSs tiende a encontrarse muy cerca de la superficie, lo que aumenta la posibilidad de que procesos de mezcla vertical por viento generen el afloramiento de aguas de bajo contenido de OD por influencia de la ZMO. Por último, presentamos evidencia en los cruceros de mes de junio, en los cuales del flujo costero de la CCM transporta aguas superficiales con altas concentraciones de OD que alejan el AStSs y la ZMO de la superficie.

Fiedler y Talley (2006) mencionan que una causa de la deficiencia de oxígeno de la ZMO es la falta de ventilación de las aguas subsuperficiales y profundas, asociada a la picnoclina permanente. En la entrada al GdeC la advección horizontal de masas de agua ricas en oxígeno funciona como un mecanismo de ventilación (Cepeda-Morales et al., 2013). Por ejemplo, la intrusión del ACC con altas concentraciones de OD, provoca la profundización del IZMO y de la oxiclina. En los transectos en los que se observó la presencia de estructuras anticiclónicas y, además, la intrusión de ACC encontramos un mayor hundimiento de la oxiclina y del IZMO (ver también Cepeda-Morales et al., 2013). Este fenómeno ocurrió en los cruceros *PROCOMEX0703*, *PESCAR24* y *PROCOMEX0506*, donde la presencia de ACC en la parte más oceánica, al Oeste del transecto, hizo que la oxiclina se hundiera por debajo del ACC. En la Figura 28 se puede ver que la presencia del remolino anticiclónico produce el hundimiento de la picnoclina en la mitad Oeste. Por debajo de esta, encontramos la incursión subsuperficial de ACC que aleja la oxiclina y el IZMO de la superficie. La ACC se mueve a lo largo de superficies isopícnicas, y no parece influenciar de manera significativa la posición de la picnoclina. En la Figura 27B se presenta un caso contrastante. Aquí la presencia de un remolino ciclónico eleva la picnoclina. Se observa presencia de ACC dentro del remolino acompañada del hundimiento de la oxiclina y del IZMO. Este previene el ascenso del AStSs y de la ZMO.

Este efecto se observa en dos cruceros (*PROCOMEX0608* y *PROCOMEX0511*). El gradiente máximo de OD siempre se da entre ACC y AStSs ya que la diferencia de OD es mayor entre estas dos masas de agua.



**Figura 27.** Esquema del comportamiento de la oxiclina y del IZMO ante intrusiones del ACC. También se señala el efecto de las corrientes costeras (AT: aguas superficiales de transición, ACC: agua de la Corriente de California y AStSs: agua Subtropical Subsuperficial).

El AOM clásico no resolvió bien la distribución de masas de agua en la superficie para algunos de los cruceros. Esto es debido a que el oxígeno y los nutrientes no son parámetros conservativos en la superficie, y no podremos distinguir entre tres masas de agua (ACC, AGC y ATS) usando solo la temperatura y salinidad. Esta variabilidad local en la concentración de los parámetros medidos se debe principalmente a los procesos de mezcla (Mackas et al., 1987). También puede haber dificultades para caracterizar las masas de agua de la región al utilizar el AOM clásico. Esto se debe a que en la escala regional se consideran despreciables los cambios biogeoquímicos del OD y nutrientes. Por consiguiente, la identificación de los valores tipo de las distintas masas de agua es un aspecto clave en este modelo (Llanillo et al., 2012). En la entrada al GdeC solo se conocen los valores tipos de  $\Theta$  y  $S_A$  (ver por ejemplo Portela et al., 2016), mientras que los del OD, nitratos y fosfatos no se conocen para la región.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

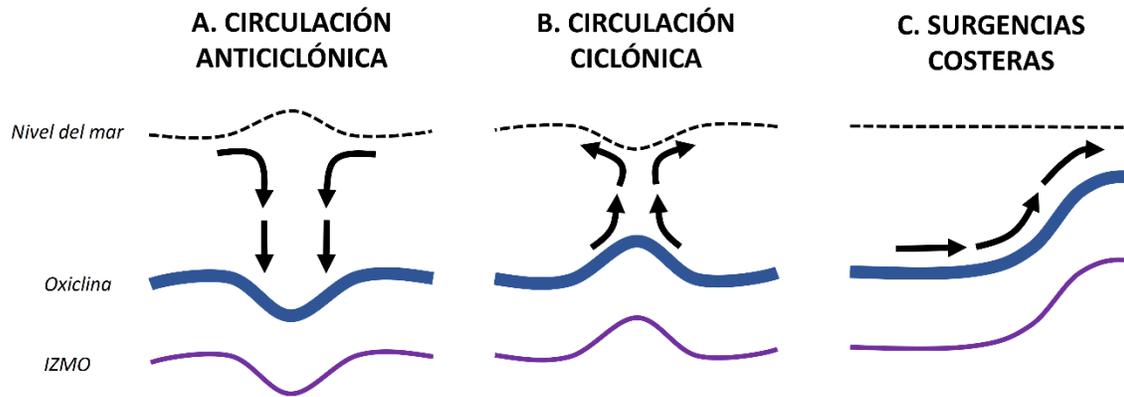
En este trabajo nos hemos enfocado en estudiar la relación entre los procesos de mesoescala, corrientes costeras y la advección horizontal de las diferentes masas de agua en la entrada al Golfo de California, con la profundidad de la oxiclina y la ZMO.

Definimos oxiclina como el gradiente máximo de la columna de agua, en base a lances hidrgráficos cada metro. Y el límite superior o inicio de la ZMO (IZMO) se definió como la isolínea de  $OD = 9 \mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ . En la Figura 29 se muestra un esquema del comportamiento de la oxiclina y el IZMO ante la influencia de los procesos de mesoescala:

Los remolinos anticiclónicos (Figura 29A) incrementan la profundidad de la oxiclina en la región oceánica en la entrada al GdeC. Este incremento aumenta la concentración de OD en la capa superficial y provoca el hundimiento del IZMO. La presencia de estas estructuras aumenta el grosor de la capa de mezcla superficial, el hundimiento de la picnoclina y de la termoclina, del máximo de estratificación y del máximo subsuperficial de clorofila (MSC). El alejamiento del mínimo de OD de la superficie está asociado al hundimiento del AStSs, que se caracteriza por bajas concentraciones de OD. El mejor ejemplo es el crucero *PATO6* (Figura 12)

Los remolinos ciclónicos (Figura 29B) elevan la estructura vertical y estimulan la producción biológica, pero también elevan la oxiclina y el IZMO. Estas estructuras acercan el AStSs a la superficie con su baja concentración de OD. El mejor ejemplo es el crucero *PROCOMEX0608* (Figura 20).

Las surgencias costeras (Figura 29C) implican la elevación de la estructura vertical hacia la superficie. Esto acarrea aguas más frías y ricas en nutrientes que las aguas superficiales, pero también acercan a la superficie agua con bajo contenido de OD, por tanto, elevan la oxiclina y el IZMO. La presencia de surgencias costeras aumenta la intensidad de la oxiclina. Su ocurrencia en Cabo Corrientes ha sido reportada durante marzo a junio, debido a los vientos predominantes del noroeste. El aumento del gradiente de la oxiclina en marzo puede ser indicativo de surgencias más intensas en ese mes. El mejor ejemplo es el crucero *PROCOMEX0506* (Figura 18).



**Figura 28.** Esquema del comportamiento de la oxiclina y el IZMO ante la influencia de procesos de mesoescala: (A) circulación anticiclónica, (B) circulación ciclónica y (C) surgencias costeras.

En la mayor parte de los casos se ha observado una relación clara entre oxiclina, termoclina y pinoquina, lo que demuestra que los procesos de mesoescala afectan a la distribución de OD en la columna de agua. Esta relación se altera cuando hay advección horizontal de las aguas con propiedades distintas. Las intrusiones de ACC actúan como mecanismo de ventilación de las aguas subsuperficiales, profundizando el mínimo de OD. Para el caso del crucero *PESCAR18*, la presencia de ATS con altas concentraciones de OD también provocó el hundimiento de la oxiclina.

También observamos que la intensidad de la oxiclina aumenta con la cercanía entre la profundidad de la oxiclina y del IZMO. Por ejemplo, frente a las costas de Cabo Corrientes en los cruceros *PATO6* y *PROCOMEX0506*.

No encontramos un comportamiento estacional de la profundidad de la oxiclina y el IZMO pero creemos que esto se debe a la carencia de datos a lo largo del año. Sin embargo queda claro que hay relación con los cambios en la circulación de la entrada al GdeC. Godínez et al. (2010) reporta que en el mes de agosto la pinoquina se profundiza y Cepeda-Morales et al. (2013) documenta una oxiclina e IZMO más profunda.

Para el Análisis Óptimo Multivariado (AOM) de la distribución de masas de agua presentes utilizamos los parámetros de temperatura potencial, salinidad, OD, la ecuación de la conservación de masa y agregamos los nitratos y fosfatos. Estos dos últimos los estimamos a partir de la climatología del WOA2013, aunque se tratan de valores promedios en una malla de baja resolución ( $1^\circ$ ). Estos datos siempre llevan el menor peso del análisis AOM pero su inclusión nos permitió analizar la mezcla de las cuatro masas de agua de la

región de estudio. Los resultados proporcionan una buena idea de la variabilidad de la profundidad de la oxiclina y el IZMO con relación a la distribución de las masas de agua y la influencia de procesos de mesoescala. A pesar de la escasez de observaciones, podemos apreciar la variabilidad de masas de agua de la región y su influencia sobre la concentración de OD en la columna de agua.

Para futuras investigaciones es conveniente medir oxígeno, nitratos y/o fosfatos para ampliar el número de parámetros con base a observaciones, sin necesidad de recurrir a otras bases de datos de baja resolución. Además llevar a cabo estudios para la caracterización de los parámetros biogeoquímicos de las masas de agua de la región. Artigue et al. (2020) recomiendan la realización del análisis de sensibilidad de Monte Carlo. Este análisis nos permite estimar qué tan sensibles son nuestros resultados ante los parámetros utilizados y los pesos elegidos, lo que nos ayudaría a determinar el origen del error en las masas de agua superficiales. Además, para nuestro trabajo nos permitiría conocer la confiabilidad y robustez de los parámetros de nitratos y fosfatos añadidos del WOA 2013.

## Literatura citada

---

- Anderson, J. C. (1971). Oxygen Analysis. Marine Technician Handbook. Sea Grant Publication no. 9. SIO Ref, (71-8).
- Artigue, L., Lacan, F., Van Gennip, S., Lohan, M. C., Wyatt, N. J., Woodward, E. M. S., Mahaffey, C., Hopkins, Y., & Drillet, Y. (2020). Water mass analysis along 22 N in the subtropical North Atlantic for the JC150 cruise (GEOTRACES, GApr08). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 158, 103230. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2020.103230>
- Auger, P. A., Bento, J. P., Hormazabal, S., Morales, C. E., & Bustamante, A. (2020). Mesoscale variability in the boundaries of the oxygen minimum zone in the eastern South Pacific: Influence of intrathermocline eddies. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(2). <https://doi.org/10.1029/2019JC015272>
- Barnes, S. L. (1964). A technique for maximizing details in numerical weather map analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 3(4), 396-409. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1964\)003<0396:ATFMDI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1964)003<0396:ATFMDI>2.0.CO;2)
- Bertrand, A., Ballon, M., & Chaigneau, A. (2010). Acoustic observation of living organisms reveals the upper limit of the oxygen minimum zone. *PLoS one*, 5(4), e10330. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010330>
- Brusca, R. C. (Ed.). (2010). *The Gulf of California: biodiversity and conservation*. University of Arizona Press.
- Budillon, G., Pacciaroni, M., Cozzi, S., Rivaro, P., Catalano, G., Ianni, C., & Cantoni, C. (2003). An optimum multiparameter mixing analysis of the shelf waters in the Ross Sea. *Antarctic Science*, 15(1), 105-118. <https://doi.org/10.1017/S095410200300110X>
- Castro, R., Collins, C. A., Rago, T. A., Margolina, T., & Navarro-Olache, L. F. (2017). Currents, transport, and thermohaline variability at the entrance to the Gulf of California (19–21 April 2013). *Ciencias Marinas*, 43(3), 173-190. <https://doi.org/10.7773/cm.v43i3.2771>
- Cepeda-Morales, J., Beier, E., Gaxiola-Castro, G., Lavín, M. F., & Godínez, V. M. (2009). Effect of the oxygen minimum zone on the second chlorophyll maximum. *Ciencias Marinas*, 35(4), 389-403. <https://doi.org/10.7773/cm.v35i4.1622>
- Cepeda-Morales, J., Gaxiola-Castro, G., Beier, E., & 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>
- Emery, W.J., & Thomson, R.E. (1998). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon Press, 1ª Ed
- Escribano, R., Daneri, G., Farías, L., Gallardo, V. A., González, H. E., Gutiérrez, D., Lange, C.B., Morales, C.E., Pizarro, O., Ulloa, O. & Braun, M. (2004). Biological and chemical consequences of the 1997–1998 El Niño in the Chilean coastal upwelling system: a synthesis. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(20-21), 2389-2411. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.08.011>

- Fernández-Álamo, M. A., & Färber-Lorda, J. (2006). Zooplankton and the oceanography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2-4), 318-359. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.003>
- Fiedler, P. C., & Talley, L. D. (2006). Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2-4), 143-180. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.008>
- Firing, E. (1995). Processing ADCP data with the CODAS software system version 3.1. Joint Institute for Marine and Atmospheric Research, University of Hawaii & National Oceanographic Data Center.
- García, J. (2005). Calibración del sensor de Oxígeno SBE 43 usando oxígeno disuelto obtenido por titulación MicroWinkler. Informe Técnico. Comunicaciones Académicas, Serie Oceanografía Física, CICESE 15 pp. (30779).
- García-Reyes M. (2005). Procesos físicos que controlan la variabilidad estacional de la temperatura superficial del mar y de la concentración de clorofila en la entrada al Golfo de California. [Tesis de Física]. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gaxiola-Castro, G., Alvarez-Borrego, S., Lavín, M. F., Zirino, A., & Nájera-Martínez, S. (1999). Spatial variability of the photosynthetic parameters and biomass of the Gulf of California phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 21(2), 231-245. <https://doi.org/10.1093/plankt/21.2.231>
- Godínez, V. M., Beier, E., Lavín, M. F., & Kurczyn, J. A. (2010). Circulation at the entrance of the Gulf of California from satellite altimeter and hydrographic observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C4). <https://doi.org/10.1029/2009JC005705>
- Karstensen, J., & Tomczak, M. (1998). Age determination of mixed water masses using CFC and oxygen data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C9), 18599-18609. <https://doi.org/10.1029/98JC00889>
- Karstensen, J., Stramma, L., & Visbeck, M. (2008). Oxygen minimum zones in the eastern tropical Atlantic and Pacific oceans. *Progress in Oceanography*, 77(4), 331-350. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.05.009>
- Kessler, W. S. (2006). The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69, 181-217. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.009>
- Lavín, M. F., & Marinone, S. G. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics*, 173-204. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1_11)
- Lavín, M. F., Beier, E., Gómez-Valdés, J., Godínez, V. M., & García, J. (2006). On the summer poleward coastal current off SW México. *Geophysical Research Letters*, 33(2), 5-8. <https://doi.org/10.1029/2005GL024686>
- Lavín, M. F., Castro, R., Beier, E., Godínez, V. M., Amador, A., & 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). <https://doi.org/10.1029/2008JC004896>

- Llanillo, P. J., Pelegrí, J. L., Gasser, M., Emelianov, M., Gourrion, J., Rodríguez-Santana, A., & Duarte, C. M. (2012). Meridional and zonal changes in water properties along the continental slope off central and northern Chile. *Ciencias Marinas*, 38(1B), 307-332. <https://doi.org/10.7773/cm.v38i1B.1814>
- Mackas, D. L., Denman, K. L., & Bennett, A. F. (1987). Least squares multiple tracer analysis of water mass composition. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 92(C3), 2907-2918. <https://doi.org/10.1029/JC092iC03p02907>
- Mauzole, Y. L., Torres, H. S., & Fu, L. L. (2020). Patterns and dynamics of SST fronts in the California Current System. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(2), e2019JC015499. <https://doi.org/10.1029/2019JC015499>
- Maske, H., Medrano, R. C., Castro, A. T., Mercado, A. J., Almeda Jauregui, C. O., Castro, G. G., & Ochoa, J. (2010). Inorganic carbon and biological oceanography above a shallow oxygen minimum in the entrance to the Gulf of California in the Mexican Pacific. *Limnology and oceanography*, 55(2), 481-491. <https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.2.0481>
- McClain, C. R., Signorini, S. R., & Christian, J. R. (2004). Subtropical gyre variability observed by ocean-color satellites. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(1-3), 281-301. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2003.08.002>
- McDougall, T. J. (2003). Potential enthalpy: A conservative oceanic variable for evaluating heat content and heat fluxes. *Journal of Physical Oceanography*, 33 (5), 945-963. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<0945:PEACOV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<0945:PEACOV>2.0.CO;2)
- McDougall, T. J., & Klocker, A. (2010). An approximate geostrophic streamfunction for use in density surfaces. *Ocean Modelling*, 32(3-4), 105-117. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.10.006>
- McDougall, T. J., Feistel, R., Millero, F. J., Jackett, D. R., Wright, D. G., King, B. A., Marion, G.M., Chen, C-T.A., Spitzer, P. & Seitz, S. (2009). The international thermodynamic equation of seawater 2010 (TEOS-10): Calculation and use of thermodynamic properties. Global ship-based repeat hydrography manual, IOCCP report no, 14.
- Owens, W. B., & Millard Jr, R. C. (1985). A new algorithm for CTD oxygen calibration. *Journal of Physical Oceanography*, 15(5), 621-631. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1985\)015<0621:ANAFCO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015<0621:ANAFCO>2.0.CO;2)
- Pantoja, D. A., Marinone, S. G., Parés-Sierra, A., & Gómez-Valdivia, F. (2012). Numerical modeling of seasonal and mesoscale hydrography and circulation in the Mexican Central Pacific. *Ciencias Marinas*, 38(2), 363-379. <https://doi.org/10.7773/cm.v38i2.2007>
- Paulmier, A., & Ruiz-Pino, D. (2009). Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean. *Progress in Oceanography*, 80(3-4), 113-128. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.08.001>
- Paulmier, A., Ruiz-Pino, D., & Garçon, V. (2011). CO<sub>2</sub> maximum in the oxygen minimum zone (OMZ). *Biogeosciences*, 8(2), 239-252. <https://doi.org/10.5194/bg-8-239-2011>
- Paulmier, A., Ruiz-Pino, D., Garçon, V., & Farias, L. (2006). Maintaining of the eastern south Pacific oxygen minimum zone (OMZ) off Chile. *Geophysical Research Letters*, 33(20). <https://doi.org/10.1029/2006GL026801>

- Pond, S., & Pickard, G. L. (1983). *Introductory dynamical oceanography*. Gulf Professional Publishing.
- Portela, E., Beier, E., Barton, E.D., Castro, R., Godínez, V., Palacios-Hernández, E., Fiedler P.C., Sánchez-Velasco, L., & 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. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0068.1>
- Roden, G. I. (1958). Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pacific Science* 12, 21–45.
- Ruelas, J.A., & Trasviña, A. (2017). Hidrografía de la entrada al Golfo de California: La frontera superior del mínimo de oxígeno. *Revista Bio Ciencias*, 4(5), 21. <https://doi.org/10.15741/revbio.04.05.02>
- Ryabenko, E., Kock, A., Bange, H. W., Altabet, M. A., & Wallace, D. W. (2012). Contrasting biogeochemistry of nitrogen in the Atlantic and Pacific Oxygen Minimum Zones. *Biogeosciences*, 9(1), 203-215. <https://doi.org/10.5194/bg-9-203-2012>
- Sánchez-Velasco, L., Beier, E., Godínez, V. M., Barton, E. D., Santamaría-del-Angel, E., Jiménez-Rosemberg, S. P. A., & Marinone, S. G. (2017). Hydrographic and fish larvae distribution during the “Godzilla El Niño 2015–2016” in the northern end of the shallow oxygen minimum zone of the Eastern Tropical Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(3), 2156-2170. <https://doi.org/10.1002/2016JC012622>
- Sankar, S., Polimene, L., Marin, L., Menon, N. N., Samuelsen, A., Pastres, R., & Ciavatta, S. (2018). Sensitivity of the simulated Oxygen Minimum Zone to biogeochemical processes at an oligotrophic site in the Arabian Sea. *Ecological Modelling*, 372, 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.01.016>
- Sarma, V. V. S. S., Jagadeesan, L., Dalabehera, H. B., Rao, D. N., Kumar, G. S., Durgadevi, D. S., Yadav, K., Behera, & Priya, M. M. R. (2018). Role of eddies on intensity of oxygen minimum zone in the Bay of Bengal. *Continental Shelf Research*, 168, 48-53. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.09.008>
- Sea-Bird Electronics, INC., Application note no. 64-2, SBE 43 Dissolved Oxygen Sensor Calibration using Winkler Titrations, 6 pp, 2002.
- Thomas, A. C., Strub, P. T., Carr, M. E., & Weatherbee, R. (2004). Comparisons of chlorophyll variability between the four major global eastern boundary currents. *International Journal of Remote Sensing*, 25(7-8), 1443-1447. <https://doi.org/10.1080/01431160310001592418>
- Tomczak, M. (1999). Some historical, theoretical and applied aspects of quantitative water mass analysis. *Journal of Marine Research*, 57(2), 275-303.
- Tomczak, M., & Large, D. G. (1989). Optimum multiparameter analysis of mixing in the thermocline of the eastern Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 94(C11), 16141-16149. <https://doi.org/10.1029/JC094iC11p16141>
- Trucco-Pignata, P. N., Hernández-Ayón, J. M., Santamaria-del-Angel, E., Beier, E., Sánchez-Velasco, L., Godínez, V. M., & 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>

- Valle Rodríguez, J. (2021). Dinámica costera en la entrada del Golfo de California y su interacción con la península de Baja California. [Tesis de Maestría en Oceanografía Física]. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C.
- Welschmeyer, N. A. (1994). Fluorometric analysis of chlorophyll a in the presence of chlorophyll b and pheopigments. *Limnology and oceanography*, 39(8), 1985-1992.  
<https://doi.org/10.4319/lo.1994.39.8.1985>
- Wyrcki, K. (1965). Surface currents of the eastern tropical Pacific Ocean. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin*, 9 (5): 268-305.
- Wyrcki, K. (1966). Oceanography of the Eastern Equatorial Pacific Ocean. *Oceanography and Marine Biology, An Annual Review*, 4, 33–68.
- Wyrcki, K. (1967). Equatorial Pacific Ocean. *Journal of Oceanology and Limnology*, 1 (2), 117-147.
- Zamudio, L., Hurlburt, H. E., Metzger, E. J., & Tilburg, C. E. (2007). Tropical wave-induced oceanic eddies at Cabo Corrientes and the Maria Islands, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C5).  
<https://doi.org/10.1029/2006JC004018>