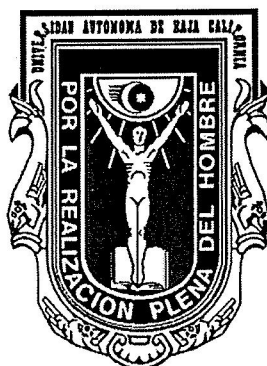


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



Facultad de Ciencias Marinas

MEDICIONES DEL SISTEMA DEL CARBONO, OXÍGENO Y NITRATOS EN EL PACÍFICO MEXICANO EN CONDICIONES DE VERANO.

T E S I S

que para obtener el título de

O C E A N Ó L O G O

presenta

Ana Cristina Franco Novela

Ensenada, B. C. agosto de 2009

RESUMEN

La absorción de CO_2 por el océano provoca un incremento en la concentración de carbono inorgánico disuelto (CID), lo cual disminuye el pH y el estado de saturación del carbonato de calcio. Esto tiene consecuencias negativas en la calcificación de los organismos que construyen sus esqueletos de este mineral en cualquiera de sus formas (aragonita o calcita). Debido al exceso de CO_2 antropogénico que el océano ha absorbido desde comienzos de la revolución industrial, se ha detectado en algunas regiones costeras de la península de Baja California la presencia de agua de bajo pH (~ 7.75) y subsaturada con respecto a aragonita a profundidades cercanas a los 60 m durante épocas de surgencia, lo cual no se esperaba que ocurriera hasta dentro de 50 años. Por lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es determinar la profundidad de subsaturación de aragonita y calcita en el Pacífico Mexicano en temporada de verano, así como observar las masas de agua presentes y asignarles un valor de CID y Alcalinidad Total (AT) que pueda ayudar a su caracterización. Para ello, se realizaron mediciones de las variables del sistema del CO_2 en el Pacífico frente a Baja California y por primera vez en la zona costera del Pacífico Subtropical Mexicano. Del 14 de junio al 7 de julio de 2008 se realizó un crucero oceanográfico que abarcó doce estaciones zarpando de San Diego, California y llegando a La Paz, Baja California Sur a bordo del R/V New Horizon. Durante el muestreo se realizaron lances de CTD con sensor de oxígeno, nitratos y fluorescencia, y se tomaron muestras discretas de CID y AT, las cuales fueron analizadas en laboratorio por coulometría y potenciometría respectivamente. Se utilizaron estándares certificados para dichas mediciones. A partir de estas dos variables se calculó el omega de aragonita y calcita, así como pCO_2 y pH in situ. Los resultados mostraron que en la región oceánica de Baja California la profundidad de subsaturación de aragonita se encuentra aproximadamente a 170 m de profundidad, mientras que en la región más costera del Pacífico Subtropical se encontró a 70 m de profundidad. A su vez, se observó una estrecha relación entre la profundidad a la que se detecta la masa de Agua Subsuperficial Ecuatorial (ASsE) y la profundidad de subsaturación de aragonita. Esta masa de agua en particular, presentó el mayor valor promedio de CID ($2261 \pm 13 \mu\text{mol kg}^{-1}$) y fue la única masa de agua con un valor promedio de omega aragonita < 1 (0.90 ± 0.08), por lo que se atribuye que el valor de subsaturación de omega aragonita se encuentre más somero en la región subtropical debido a que el ASsE domina en dicha región, contrario a lo que ocurre en la región de Baja California, donde es el ASA la masa de agua que predomina en la región oceánica.

MEDICIONES DEL SISTEMA DEL CARBONO, OXÍGENO Y NITRATOS EN EL PACÍFICO MEXICANO EN CONDICIONES DE VERANO.

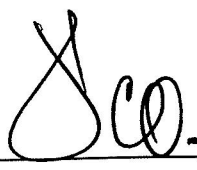
Tesis de licenciatura en Oceanología

Presenta

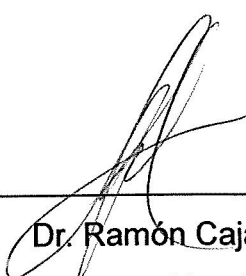
ANA CRISTINA FRANCO NOVELA



Dr. José Martín Hernández Ayón
Director de Tesis



Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa
Sinodal



Dr. Ramón Cajal Medrano
Sinodal

AGRADECIMIENTOS

Al profe Martín, por toda la comprensión, paciencia y tiempo dedicado durante la realización de este trabajo, muchísimas gracias.

A mis sinodales Dr. Francisco Delgadillo y Dr. Ramón Cajal, por los comentarios siempre tan pertinentes.

Al grupo del seminario de oceanografía química, por las observaciones tan atinadas que ayudaron a mejorar y enriquecer este trabajo.

A la Dra. Barbeau y su equipo, por permitirme ser parte del crucero DCM-2008 para la colecta de las muestras de este trabajo.

A Gabo, Joe y Mono por estar conmigo y ser los hermanos que pude escoger.

A Ekaterina, Gaby, Piñurris, y todos mis compañeros de generación, gracias por permitirme compartir estos 5 años con ustedes.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado durante la realización de esta tesis.

DEDICATORIA

PARA MI MAMÁ Y MI PAPÁ,
este fruto de su apoyo y ejemplo.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES.....	2
2.1. Descripción general.....	2
2.2. Mediciones de las variables del sistema del carbono en el Pacífico Mexicano	6
3. TEORÍA.....	7
4. OBJETIVOS.....	8
5. HIPÓTESIS.....	8
6. METODOLOGÍA	9
6.1. Muestreo	9
6.2. Análisis de Carbono Inorgánico Disuelto (CID)	9
6.3. Análisis de Alcalinidad Total (AT).....	11
6.4. Procesamiento de datos.....	12
7. RESULTADOS.....	13
7.1. Masas de agua.....	13
7.2. Región de Baja California.....	15
7.2.1. Características físicas.....	15
7.2.2. Características químicas y variables del sistema del CO ₂ en la RBC.....	16
7.2.3. Características Biológicas.....	24
7.3. Región Subtropical.....	26
7.3.1. Características Físicas.....	26
7.3.2. Características químicas.....	28
7.3.3. Características Biológicas.....	34
7.4. Asignación de valores de CID y AT a las masas de agua detectadas	36
8. DISCUSIÓN	39
8.1. Región de Baja California.....	40
8.2. Región subtropical.....	43
8.2.1. Relación entre Ω_{arag} y ASsE en la RS.....	47
8.2.3. Comparación de datos históricos (WOCE) y este trabajo.....	48
8.2.4. Máximo Profundo de Clorofila.....	50
8.3. Características hidrológicas en la profundidad de subsaturación de Ω_{arag}	51
8.4. Química de las masas de agua detectadas.....	52
9. CONCLUSIONES	53
10. LITERATURA CITADA	54

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Características físicas y químicas del agua de mar de las estaciones de la RS en que se detectó el segundo máximo de clorofila. La E6 fue la más alejada de la costa.....	36
Tabla II.- Valores promedio y desviación estándar de temperatura, salinidad, oxígeno y variables del sistema del CO ₂ para las masas de agua detectadas en la RBC y RS en los primeros 500 m. Los acrónimos indican: Agua Subártica (ASA), Agua del Golfo de California (AGC), Agua Superficial Subtropical (ASSt) y Agua Subsuperficial Ecuatorial (ASsE).....	39
Tabla III. Características químicas e hidrológicas a la profundidad de subsaturación en las dos regiones del área de estudio.....	52

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.- Costa del Pacífico Mexicano. Estaciones del crucero DCM-2008. Los tonos azules indican la batimetría de la región. La línea de color azul indica la profundidad de 250 m. Los recuadros señalan las dos regiones en las que fue dividida el área de estudio: Región de Baja California (RBC) y Región Subtropical (RS)..... 5
- Figura 2.- Diagrama T-S con las masas de agua presentes en cada región: Región de Baja California (RBC) y Región Subtropical (RS). Las masas de agua se identificaron según Durazo y Baumgartner (2002). Los acronimos son: Agua Subártica (ASA), Agua Superficial Subtropical (ASSt), Agua del Golfo de California (AGC) Agua de transición (ATr) y Agua Subsuperficial Ecuatorial (ASsE). Los colores indican la latitud a la cual se realizó cada medición de temperatura y salinidad. 14
- Figura 3. Distribución vertical de a) Salinidad, b) Temperatura y c) Sigma-t en la región de Baja California. Las líneas negras verticales corresponden a los lances de CTD. Los números superiores corresponden a las estaciones de muestreo de la Fig. 1. 17
- Figura 4. Distribución vertical de a) Oxígeno disuelto y b) Nitratos en la región de Baja California. Las líneas negras verticales corresponden a los lances de CTD. Las estaciones se muestran en la parte superior de la figura..... 19
- Figura 5. Distribución vertical de a) pH *in situ*, b) CID y c) pCO₂ en la región de Baja California. Los puntos indican la profundidad de muestreo. Las estaciones se muestran en la parte superior de la figura. 22
- Figura 6. Distribución vertical de a) Ω_{arag} y b) Ω_{cal} en la región de Baja California. Los puntos indican la profundidad de muestreo. Las estaciones se muestran en la parte superior de la figura. 23
- Figura 7. Perfiles de clorofila de cada estación de la RBC 25
- Figura 8. Distribución vertical de a) Salinidad, b) Temperatura y c) Sigma-t en la región Subtropical. Las líneas negras verticales corresponden a los lances de CTD. Las estaciones se muestran en la parte superior de la figura..... 27
- Figura 9. Distribución vertical de a) Oxígeno disuelto y b) Nitratos en la región Subtropical. Las líneas negras verticales corresponden a los lances de CTD. Las estaciones se muestran en la parte superior de la figura. Nótese que en la E10 no se obtuvo el perfil de nitratos. 29
- Figura 10. Distribución vertical de a) pH *in situ*, b) CID y c) pCO₂ en la región Subtropical. Los puntos indican la profundidad de muestreo. Las estaciones se muestran en la parte superior de la figura. 31

Figura 11. Distribución vertical de a) Ω_{arag} y b) Ω_{arag} en la región de Baja California. Los puntos indican la profundidad de muestreo. Las estaciones se muestran en la parte superior de la figura.	33
Figura 12. Perfiles de clorofila de la región subtropical de la E6, E7 y E8. El segundo máximo profundo de clorofila se atribuye a la cianobacteria <i>Prochlorococcus</i>	35
Figura 13. Perfiles de clorofila en la E9, E10, E11 y E12 de la RS.	35
Tabla I. Características físicas y químicas del agua de mar de las estaciones de la RS en que se detectó el segundo máximo de clorofila. La E6 fue la más alejada de la costa.	36
Figura 14. Diagramas T-S vs a) profundidad, b) valor de Ω_{arag} y c) concentración de oxígeno disuelto. Se indica también las masas de agua detectadas en este muestreo. La profundidad a la que se detectó el ASsE fue mayor en la RBC que en la RS, encontrándose subsaturada con respecto a aragonita y con concentraciones de oxígeno menores a 1 mL/L.	42
Figura 15. Mapa de altimetría de la región del muestreo. En la región de muestreo de la E8 se observó acumulación de agua (tomado de http://las.pfeg.noaa.gov/oceanWatch/oceanwatch.php).....	45
Figura 16. Mapa de corrientes geostroficas para el día 3 de julio de 2008, 1 día después del paso de la tormenta tropical Douglas por las costas de la RS (Tomado de http://las.pfeg.noaa.gov/oceanWatch/oceanwatch.php).....	46
Figura 17. a) Mapa de las estaciones del muestreo del WOCE realizado en 1994, b) sección transversal de Ω_{arag}	49

1. INTRODUCCIÓN

Desde la revolución industrial a la actualidad, la concentración de CO₂ en la atmósfera se ha incrementado debido a la quema de combustibles fósiles, deforestación e industrialización. Actualmente dicha concentración es de 380 μatm y se espera que continúe incrementándose hasta alcanzar 800 μatm para finales de este siglo (Prentice *et al.* 2001). Se ha calculado que aproximadamente el 30% de todo el CO₂ antropogénico liberado hacia la atmósfera está siendo absorbido por el océano (Sabine *et al.* 2004).

En el presente, la disolución de este exceso de CO₂ en el océano ha causado una disminución en el pH del agua de mar de aproximadamente 0.1 unidades, y se predice que disminuirá hasta 0.4 unidades para finales de este siglo (Feely *et al.* 2008). Al proceso de la disminución del pH del agua de mar debido a la disolución de CO₂ antropogénico se le llama acidificación. Cuando esto ocurre, la concentración de las especies de carbono que conforman el carbono inorgánico disuelto (CID) cambian, aumentando la concentración del ión bicarbonato (HCO₃⁻) y disminuyendo la concentración del ión carbonato (CO₃⁻²). Se considera que la disminución en la concentración de CO₃⁻² no es favorable en el proceso de calcificación para un gran número de organismos marinos, tales como el plancton calcáreo y los corales, los cuales necesitan incorporar el CO₃⁻² para formar sus esqueletos y conchas en la forma de aragonita o calcita (Kleypas *et al.* 1999; Feely *et al.* 2004). Además, dicha disminución de pH y disminución de carbonatos promueve la erosión de arrecifes coralinos (Manzello, 2008).

La profundidad a partir de la cual las estructuras carbonatadas compuestas de aragonita y/o calcita comienzan a disolverse se llama "lisoclina" o "profundidad de subsaturación", y es la profundidad en la columna de agua en la que el agua de mar se encuentra subsaturada con carbonato. Se caracteriza por presentar altas concentraciones de CID ($> 2200 \mu\text{mol kg}^{-1}$), pH bajo (< 7.7) y altos valores de pCO₂ ($> 800 \mu\text{atm}$). Algunos estudios han demostrado que la profundidad de subsaturación en los océanos del mundo se está haciendo cada vez más somera debido al rápido incremento de CO₂ antropogénico en la atmósfera y a su posterior absorción por el océano (Feely *et al.* 2004). En México, los estudios del sistema de los carbonatos son

escasos y sobre el proceso de acidificación solo existe un trabajo reciente, el cual abarcó parte de las costas de la península de Baja California (Feely *et al.* 2008). En ese estudio realizado sobre la plataforma continental desde Canadá hasta México, se detectó 1) la intrusión de agua subsaturada con respecto a aragonita a profundidades menores a 120 m y, aunque este muestreo llegó únicamente hasta la altura de San Gregorio, BCS (26°N), 2) la profundidad de subsaturación de aragonita mostró una clara tendencia a hacerse menos profunda hacia el sur de la península de Baja California (Feely *et al.* 2008). En el Pacífico Subtropical Mexicano (PSM), las únicas mediciones de variables del sistema del CO₂ disponibles son las que se realizaron en 1994 como parte del World Ocean Circulation Experiment (WOCE) en su transecto P18, el cual abarcó la región oceánica al sur de Los Cabos BCS sobre el meridiano 110°W. Esta investigación es muy valiosa porque son datos de referencia de más de 10 años, que permite comparar con las condiciones actuales. Sin embargo, de la zona costera del PSM no se tiene ninguna información disponible.

Por todo lo anterior, el propósito principal de este trabajo es determinar el grado de acidificación del océano observando la profundidad de subsaturación de aragonita y calcita calculada mediante mediciones de pH, Alcalinidad Total (AT) y CID frente a las costas de Baja California y, por primera vez en la región costera del PSM. Esto servirá para generar una línea base para futuras investigaciones de dicha región.

2. ANTECEDENTES

2.1. Descripción general

El área de estudio se localiza en el Pacífico Mexicano, desde la latitud 30°N frente a las costas de Baja California, hasta 18°N frente al estado de Jalisco y entre las longitudes 105°W a 118°W. Esta región comprende desde el final del sistema de la corriente de California (SCC) frente a las costas de la península de Baja California, hasta el Pacífico Subtropical frente a las costas de Colima y Jalisco (Fig. 1). Esta extensa zona de estudio comprende regiones con características oceanográficas muy distintas que se describen brevemente a continuación:

La zona del Pacífico frente a la península de Baja California se encuentra influenciada por el SCC que tiene dirección al ecuador. Las propiedades de esta región se atribuyen a la presencia de tres masas de agua: Agua Subártica (ASA), Agua Superficial Subtropical (ASSt) y Agua Subsuperficial Ecuatorial (ASsE); esta última también se conoce por otros autores como Agua del Pacífico Ecuatorial (APE), Agua del Pacífico Ecuatorial 13°C, y Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) (Lynn y Simpson, 1987). En la zona norte de la península (al norte de 28°N) el ASA domina la capa superficial durante todo el año, mientras que en la zona sur además del ASA, se tiene una mayor influencia tropical y subtropical en los meses de verano y otoño (Durazo, 2009). Esta combinación de masas de agua en la región frente a Baja California, hace que se presenten temperaturas <20°C, salinidades <34.5, y concentraciones altas de oxígeno disuelto (Lynn y Simpson, 1987; Durazo y Baumgartner, 2002). La profundidad y volumen de estas masas de agua pueden variar debido a la ocurrencia de eventos interanuales como El Niño o La Niña (Durazo y Baumgartner, 2002) o por fenómenos más locales como surgencias, que se presentan con mayor intensidad en primavera y verano (Durazo, 2009).

El clima en la parte norte de la península de Baja California se caracteriza como transicional entre mediterráneo y desértico, con lluvias en invierno y sequías en verano. En el resto de la península el clima es desértico, excepto por esporádicos ciclones tropicales que producen lluvias intensas (De la Cruz, 2006).

La región del PSM que se encuentra frente a las costas de Jalisco y Colima forma parte del límite norte del Pacífico Oriental Tropical, un sistema fuertemente estratificado donde el agua presenta una relativa mayor temperatura y salinidad en comparación con el agua frente a Baja California. Además, en esta zona se presenta la zona de mínimo de oxígeno más grande de los océanos del mundo (Fielder y Talley, 2006; Pennington *et al.*, 2006), con concentraciones de oxígeno menores a 0.1 mL/L (Barbeau y Hopkinson, 2007). Las masas de agua que proporcionan estas características hidrográficas a la región tienen un origen subtropical y ecuatorial, y se denominan: Agua Superficial Tropical (AST), con características de temperatura de 25 a 30°C y salinidad de 33 a 34; Agua Subsuperficial Ecuatorial (ASsE), la cual se caracteriza por salinidades entre 34.5 y 35; y Agua del Golfo de California (AGC) caracterizada por

salinidades >35 y un intervalo de temperatura entre 14 y 30°C (Torres-Orozco, 1993; Durazo y Baumgartner, 2002). En los meses de junio y julio se ha reportado la presencia de una corriente costera con dirección al polo que se denomina corriente mexicana. Esta corriente se ha detectado desde el Golfo de Tehuantepec hasta la altura de Cabo Corrientes, y es una extensión de la corriente costera de Costa Rica (CCCR) que modifica en esta época del año la hidrografía de la zona acarreado AST hacia la zona de estudio de este trabajo. Actualmente se están realizando estudios en los que se ha observado que la profundidad a la que se encuentran dichas masas de agua varía estacionalmente (Godínez *Com. Pers.*).

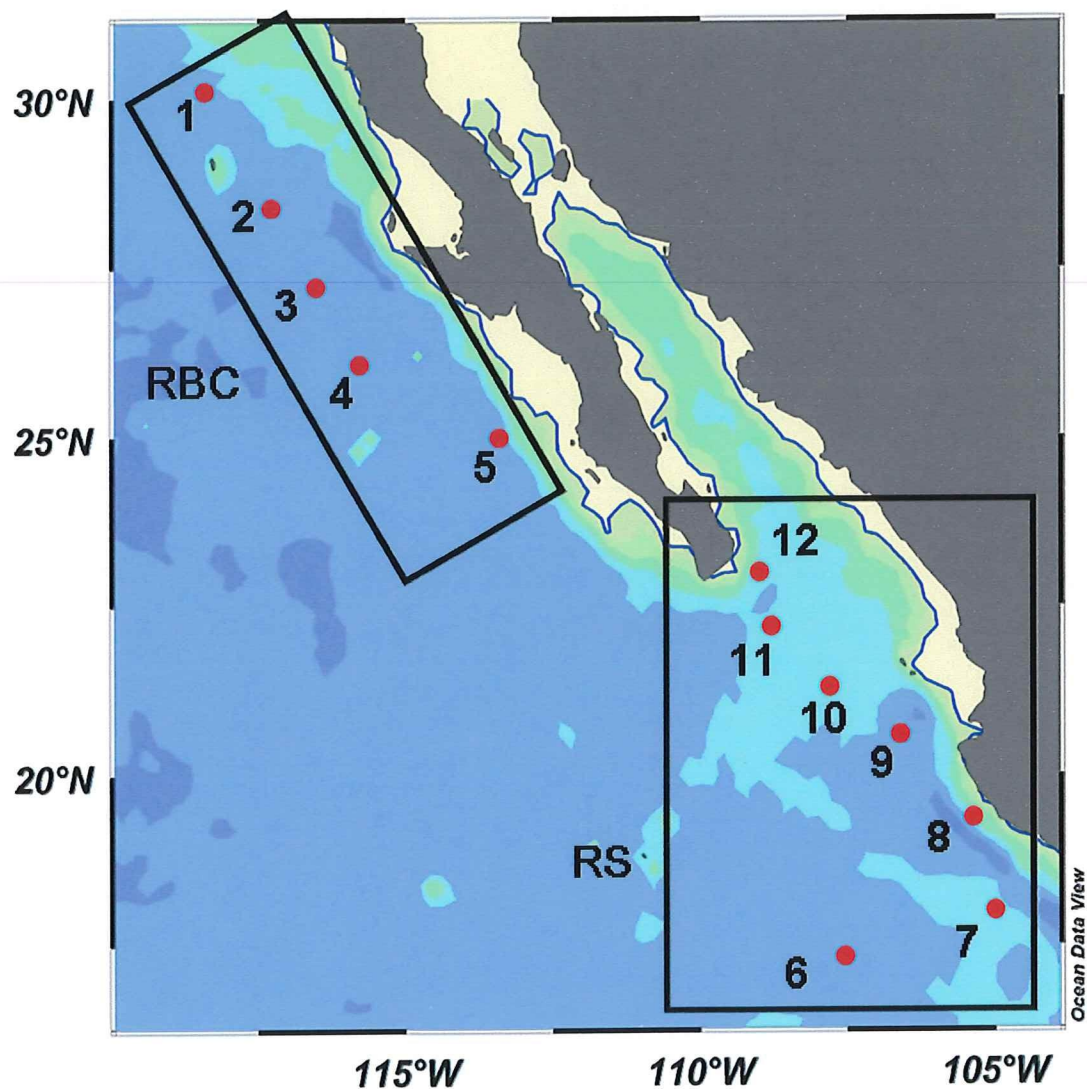


Figura 1.- Costa del Pacífico Mexicano. Estaciones del crucero DCM-2008. Los tonos azules indican la batimetría de la región. La línea de color azul indica la profundidad de 250 m. Los recuadros señalan las dos regiones en las que fue dividida el área de estudio: Región de Baja California (RBC) y Región Subtropical (RS).

2.2 Mediciones de las variables del sistema del carbono en el Pacífico Mexicano

En el océano pacífico existe una serie de muestreos de las variables del sistema del CO₂ llevados a cabo entre 1991 y 1996 (WOCE/ Joint Global Ocean Flux Study JGOFS). Feely *et al.* (2002) analizó el set de datos de las mediciones de carbono de estos experimentos y calculó la disolución de carbonato de calcio (CaCO₃) en la columna de agua del Pacífico, encontrando que, para el área de estudio de ese trabajo, la profundidad de subsaturación de aragonita fue aproximadamente de 250 m. Sin embargo, es necesario hacer notar que todos los transectos de esos cruceros fueron realizados en regiones oceánicas y no se tienen mediciones costeras, por lo que la profundidad de subsaturación de aragonita es resultado de una extrapolación y puede no ser válido para la zona costera.

En particular, en la zona costera del Pacífico Mexicano, solo existe un trabajo referido a la medición de las variables del sistema del carbono, el cual abarca únicamente la península de Baja California. En ese trabajo, Feely *et al.* (2008) encontraron que durante el verano de 2007, agua subsaturada con respecto a aragonita y con bajo pH (< 7.75) se detectó en la plataforma continental durante periodos de surgencia, lo cual no se esperaba que ocurriera hasta dentro de 50 años (Orr *et al.*, 2005).

Para la región subtropical, las únicas mediciones del sistema del CO₂ disponibles son las realizadas como parte del WOCE frente a Los Cabos, Baja California Sur. En abril de 1994 se colectaron muestras de agua a lo largo del Transecto P18 localizado sobre el meridiano 110°W; sin embargo, no existen trabajos publicados al respecto.

3. TEORÍA

El concepto de acidificación, describe el proceso en el que el pH del agua de mar disminuye debido a la disolución de CO_2 antropogénico en el océano. Este término pudiera causar confusión al proponer erróneamente que los océanos son ácidos, cuando en realidad, se espera que el pH del agua de mar disminuya a valores cercanos a 7.6 para el año 2100, si las emisiones de CO_2 a la atmósfera continúan a la tasa actual (Caldeira y Wickett, 2003).

La reacción del CO_2 con el agua de mar disminuye el pH, esto a su vez reduce la disponibilidad de iones CO_3^{-2} que son necesarios para la formación de conchas y esqueletos de CaCO_3 para un importante número de organismos marinos tales como corales y plancton calcáreo (Guinotte y Fabry, 2009; Fabry *et al.*, 2008; Kleypas y Langdon, 2006). Aragonita y calcita son dos formas de CaCO_3 con la misma fórmula química, pero con distinta estructura cristalina.

El grado al cual los organismos calcificadores son afectados por la disminución del ión CO_3^{-2} depende en gran medida del estado de saturación de CaCO_3 , el cual es producto de las concentraciones de Ca^{+2} y CO_3^{-2} dividido entre la constante del producto de solubilidad (Kps) ya sea para aragonita o calcita:

$$\Omega_{\text{arag}} = [\text{Ca}^{+2}] [\text{CO}_3^{-2}] / K_{\text{ps}_{\text{arag}}} \quad (1)$$

$$\Omega_{\text{cal}} = [\text{Ca}^{+2}] [\text{CO}_3^{-2}] / K_{\text{ps}_{\text{cal}}} \quad (2)$$

Donde la concentración de calcio es estimada a partir de la salinidad, y la concentración del ión carbonato es calculada a partir de las mediciones de CID y AT, debido a que son las únicas variables del sistema de los carbonatos que cuentan con estándares certificados de referencia.

En regiones donde omega aragonita (Ω_{arag}) u omega calcita (Ω_{cal}) es > 1 la formación de conchas y esqueletos se ve favorecida. Mientras que agua con un valor de Ω_{arag} o $\Omega_{\text{cal}} < 1$, limita la calcificación y facilita la disolución del CaCO_3 . Generalmente, la profundidad de subsaturación de la aragonita es más somera que la de calcita debido a que la solubilidad de la aragonita es aproximadamente 50% mayor que la de la calcita (Feely, 2002).

4. OBJETIVOS

- Determinar las masas de agua presentes durante el verano del 2008 en la región oceánica de Baja California y en el PSM mediante diagramas T-S.
- Determinar la profundidad de subsaturación de la aragonita y la calcita en las regiones de Baja California y el PSM bajo condiciones de verano..
- Comparar las profundidades de subsaturación de la aragonita y la calcita en las costas de Baja California y la región subtropical estimadas en este trabajo, con los valores obtenidos en el crucero North American Carbon Project (NACP) realizado en junio del 2007 en la región de Baja California y el transecto P18 del World Ocean Circulation Experiment (WOCE) realizado en abril de 1994 en la región subtropical.
- Caracterizar las condiciones de porcentaje de luz, T, S, Oxígeno disuelto, pH *in situ* y CID del ambiente marino donde se detecte el máximo profundo de clorofila (MPC) en el PSM.
- Asignar valores promedio de CID y AT a las masas de agua que se encontraron presentes durante el verano del 2008 en la zona de estudio.

5. HIPÓTESIS

Estudios previos realizados en las costas de Baja California, indican que la profundidad de subsaturación de aragonita es más somera hacia el sur de la península de Baja California, encontrándose a profundidades menores a 160 m. En este estudio se hipotetiza que la profundidad de subsaturación de aragonita en el PSM será aun más somera que en Baja California, y con valores de subsaturación a profundidades menores a 160 m debido a diferencias en la circulación de masas de agua.

6. METODOLOGÍA

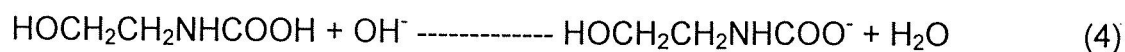
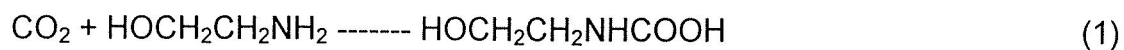
6.1. Muestreo

En este trabajo se analizaron las variables CID y AT de muestras colectadas en un crucero oceanográfico llevado a cabo del 14 de junio al 7 de julio de 2008, a bordo del R/V New Horizon. El muestreo cubrió un total de 12 estaciones en las costas del Pacífico Mexicano, cinco se realizaron frente a las costas de Baja California y siete en el PSM (Fig. 1). Durante el muestreo se utilizó un CTD SBE fijo a una roseta con botellas Niskin de 12 litros y se realizaron lances hasta 500 m de profundidad. El CTD contaba con sensores de temperatura, salinidad, presión, oxígeno disuelto, fluorescencia y nitratos. Las unidades de fluorescencia fueron transformadas a equivalentes de clorofila para su interpretación. Las muestras discretas de agua de mar para AT y CID se tomaron de profundidades estándares en los primeros 200 m de profundidad, y fueron colectadas en botellas de borosilicato de 500 mL a las cuales se les agregó 100 μ L de cloruro de mercurio. Las botellas fueron selladas con grasa Apiezon para evitar el contacto de la muestra con la atmósfera y la evaporación durante su almacenamiento hasta su análisis en el laboratorio.

6.2. Análisis de Carbono Inorgánico Disuelto (CID)

Para la medición de esta variable se utilizó el método de coulometría descrito por Johnson *et al.* (1987) y se usó material de referencia certificado como control de calidad. Previo al análisis de muestras, las soluciones catódica y anódica que absorben el CO₂ eran acondicionadas inyectando aproximadamente 10 adiciones de muestras de agua de mar filtrada. Posteriormente, se medía la exactitud y estabilidad utilizando el material certificado con valor de CID conocido, proporcionado por el Dr. Andrew Dickson de Scripps Institution of Oceanography. Si el valor obtenido del estándar se encontraba dentro del rango de ± 3 μ mol del valor certificado de CID, se procedía a medir las muestras. Para cada titulación se tomaban alícuotas de peso conocido determinado en una balanza analítica marca Mettler toledo. Posterior a cada inyección, la muestra se hace reaccionar con H₃PO₄ al 8% en una celda cerrada para convertir los carbonatos y bicarbonatos a CO₂.

La celda cerrada donde se realiza la acidificación, esta conectada a un flujo constante de gas nitrógeno, el cual transporta el CO₂ liberado hacia la celda donde se encuentra la solución catódica (monoetanolamina). Una vez que el gas CO₂ reacciona con la solución catódica forma un complejo en una celda de cristal en el coulómetro, la cual se localiza entre una fuente de luz y un fotodetector para registrar los cambios en transmitancia conforme se lleva a cabo la titulación. En la celda se encuentra una membrana porosa que separa un electrodo de platino (cátodo) inmerso en solución de monoetanolamina con un indicador colorimétrico de pH de un lado y, del otro lado de la membrana se encuentra un electrodo de plata (ánodo) inmerso en solución anódica. Cuando el CO₂ (g) llega a la celda, reacciona con la monoetanolamina formando un ácido carbámico que hace que el color indicador de esta solución se desvanezca (1). Conforme el %T se incrementa, automáticamente se activa una corriente que es registrada por el coulómetro en forma de conteos/min, cuando esto ocurre el electrodo de platino, en conjunto con el electrodo de plata comienza a liberar bases OH⁻ (2) y (3), neutralizando la solución y volviendo al %T original (4). Cuando esto sucede, la corriente se detiene y se registra en forma de conteos/min la corriente que fue necesaria para neutralizar la solución.



Para conocer la concentración de CO₂ de la muestra, se utilizan los conteos/min obtenidos de la titulación coulométrica en la siguiente ecuación:

$$CID = (\text{conteos} - Bco * t) / (FC * M)$$

Donde:

CID = Carbono Inorgánico Disuelto de la muestra

Conteos = Número de conteos dados por el coulómetro

Bco = Blanco, número de conteos/min que marca el coulómetro con ácido y gas nitrógeno en la celda, sin muestra.

t = Tiempo de medición de la titulación coulométrica

FC = Factor para calcular concentración, para convertir el contador de corriente en concentración, obtenido a partir de la medición de dos estándares diferentes.

M = Masa de la muestra añadida

6.3. Análisis de Alcalinidad Total (AT)

Una vez medidas las muestras para CID, se siguió con en el análisis de AT mediante el procedimiento potenciométrico utilizando la metodología descrita por Dickson *et al.* (2003). Previo a la medición de las muestras, se preparó el equipo realizando las mediciones de agua de mar necesarias para que el electrodo se encontrara en las condiciones óptimas antes de comenzar con los análisis. Un criterio utilizado fue iniciar con análisis de muestras después de que el valor medido del material de referencia se encontraba en el intervalo de $\pm 3 \mu\text{moles}$ del valor de referencia. La titulación se llevó a cabo con un equipo controlado por computadora utilizando un programa en Labview para el control de los instrumentos. Para llevar a cabo el análisis, normalmente se tomó una alícuota de la muestra de peso conocido, y se llevó a 20°C en una celda abierta conectada a un termocirculador de agua con temperatura controlada. La titulación se realizó con una pipeta automática marca Radiometer con la cual se añadió suficiente HCl ~0.1N, con fuerza iónica 0.7 moles kg^{-1} , hasta un pH aproximadamente de 3.5. A partir de este punto, la muestra se agitó y se burbujeó intensamente con aire libre de

CO₂ para ayudar a liberar el CO₂ producido por la acidificación. Posteriormente, para disminuir el pH hasta 3.0, se realizó un total de 20 adiciones de 0.025 mL de HCl, registrando los cambios de mV en cada adición. Con estos datos, el programa llevó a cabo una linealización entre el pH, masa de la muestra y el volumen del HCl que se necesita para neutralizar las bases contenidas en ella, entre un pH de 3.5 a 3.0. Con esta información, el programa calculó la AT de la muestra (detalles, ver Dickson *et al.*, 2003).

6. 4. Procesamiento de datos

Las masas de agua presentes en la zona de estudio fueron identificadas realizando un análisis hidrográfico de la temperatura y salinidad por medio de diagramas T-S, utilizando la clasificación descrita por Durazo y Baumgartner (2002). El Ω de calcita, aragonita, pCO₂ y pH *in situ* (en la escala de agua de mar) fueron estimados con el programa CO2Sys.xls (Lewis y Wallace, 1998), a partir de mediciones de CID, AT, salinidad, temperatura, presión y las constantes de disociación de Mehrbach *et al.* (1973). Considerando que la exactitud, tanto para CID como para AT, es $\sim 3 \mu\text{mol kg}^{-1}$, los errores asociados al método de Ω de calcita y aragonita, pCO₂ y pH *in situ*, haciendo variar $\pm 3 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de CID y AT durante el cálculo de las variables mencionadas, se estima que fueron de ± 0.04 unidades, $\pm 5 \mu\text{atm}$ y ± 0.01 unidades, respectivamente.

El ΔpCO_2 fue calculado restando el valor de pCO₂ atmosférico actual de 387 μatm (http://scrippsco2.ucsd.edu/program_history/keeling_curve_lessons.html) del valor de pCO₂ calculado en el agua de mar. La densidad del agua de mar fue calculada a partir de las mediciones de salinidad y de temperatura. El valor asignado de AT, CID, pH, O₂ y densidad a cada masa de agua identificada, fue el resultado del valor promedio aritmético y desviación estándar de todos los valores que se encontraron dentro del rango de temperatura y salinidad para cada masa de agua para cada variable.

7. RESULTADOS

7.1. Masas de agua

El diagrama T-S de la figura 2, muestra todos los datos generados durante el muestreo. En la figura se observó una clara separación de los datos en dos grupos como resultado de diferencias en salinidad y temperatura, los cuales corresponden a dos regiones geográficas distintas del área de estudio: 1) Estaciones de la región de la península de Baja California y 2) Estaciones de la región Subtropical (Los Cabos, BCS. a Colima). Por lo que en este trabajo se referirá al primer grupo como Región de Baja California (RBC) y al segundo grupo de estaciones como Región Subtropical (RS). En la misma figura se pueden identificar las masas de agua presentes en cada región. En la RBC las masas de agua detectadas fueron: ASA y ASsE. Mientras que para la RS fueron: ASSt, AGC y ASsE.

El ASA se detectó únicamente en las estaciones de la RBC, desde la superficie hasta una profundidad promedio de ~160 m. Las características T-S promedio de esta masa de agua fueron de $13.51 \pm 2.8^{\circ}\text{C}$ y 33.65 ± 0.18 , respectivamente.

El ASsE se detectó en la RBC en las estaciones localizadas de Punta Eugenia hacia el sur (E3, E4 y E5), mientras que en la RS, el ASsE se observó en todas las estaciones. En la RBC esta masa de agua se detectó en la E3 a partir de ~300 m de profundidad, mientras que en la E4 y E5 se detectó a partir de ~160 m de profundidad. En la RS, esta masa de agua se encontró más somera, a una profundidad de ~85 m, con la excepción de la E8 donde se observó a una mayor profundidad de 130 m. Sin embargo, en las estaciones de la RS más cercanas a Los Cabos (E11 y E12), esta masa de agua se detectó a profundidades de ~65 m. Las características de T y S promedio de esta masa de agua fueron 10.99 ± 1.73 y 34.67 ± 0.12 , respectivamente.

El AGC se localizó en estaciones cercanas a la boca del Golfo de California (E9, E11 y E12) y en la E6, la cual fue la estación más oceánica del muestreo (~350 km de la costa). Esta masa de agua se detectó desde la superficie hasta una profundidad promedio de ~26 m y una profundidad máxima de 40 m, observada en la E9. Las características de T y S de esta masa de agua en este muestreo fueron de 26.7 ± 0.79 y de 35.1 ± 0.04 , respectivamente.

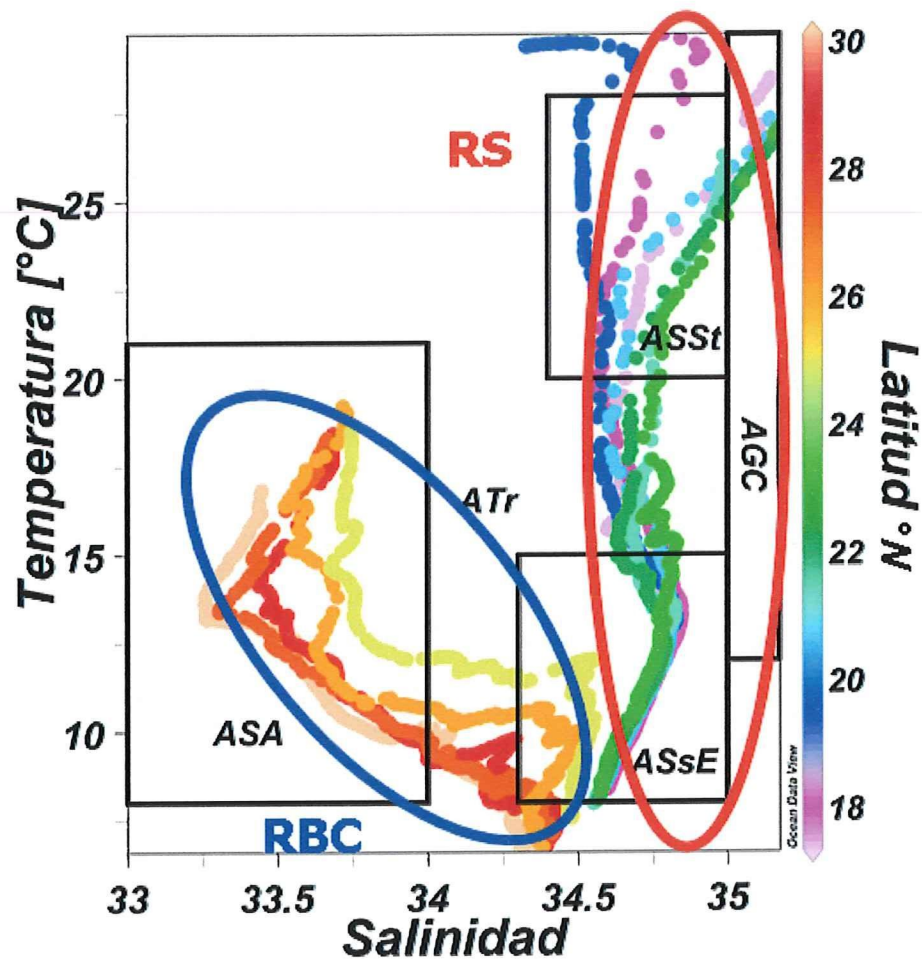


Figura 2.- Diagrama T-S con las masas de agua presentes en cada región: Región de Baja California (RBC) y Región Subtropical (RS). Las masas de agua se identificaron según Durazo y Baumgartner (2002). Los acrónimos son: Agua Subártica (ASA), Agua Superficial Subtropical (ASSt), Agua del Golfo de California (AGC) Agua de transición (ATr) y Agua Subsuperficial Ecuatorial (ASsE). Los colores indican la latitud a la cual se realizó cada medición de temperatura y salinidad.

El ASSt se observó sólo en la RS, por debajo del AGC partir de los ~28 m en promedio, sin embargo, en la E10, esta masa de agua se detectó desde la superficie. En promedio, esta masa de agua alcanzó una profundidad máxima en la columna de agua de ~50 m, sin embargo, en la E8 se encontró hasta ~90 m. Las características de T y S de esta masa de agua fueron 23.7 ± 1.97 y 34.7 ± 0.17 , respectivamente.

En resumen, se puede resaltar que en cada región se detectaron masas de agua con características físicas distintas, y por tanto se podrían esperar diferencias en las características químicas del agua entre las dos regiones, como por ejemplo, en las variables del sistema del CO₂, nutrientes, oxígeno, así como en la profundidad de subsaturación de la aragonita y la calcita, tanto en su distribución vertical como en la horizontal. Por lo tanto, se estará haciendo el análisis de las variables químicas tomando en consideración la presencia de las diferentes masas de agua.

7.2. Región de Baja California

7.2.1. Características físicas

La distribución vertical de la salinidad, temperatura y densidad, se muestra en la figura 3. En general, se observó un gradiente de norte a sur entre las estaciones localizadas al norte de Punta Eugenia (E1 y E2) y al sur de Punta Eugenia (E3, E4 y E5). Se observaron incrementos graduales de temperatura y salinidad a lo largo del transecto norte-sur, mientras que la densidad presentó una tendencia opuesta hacia el sur producto del incremento de temperatura.

Los valores superficiales de salinidad presentaron un incremento gradual de norte a sur. A su vez, en la columna de agua se observaron las isohalinas más someras hacia el sur (Fig. 3a). El valor de salinidad superficial mínimo fue de ~33.4 y fue detectado en la E1 al norte del transecto, mientras que el valor de salinidad superficial máximo de 33.7 se registró en la E5 al sur del transecto. En la vertical, se registró una capa subsuperficial con menor salinidad delimitada por el contorno de 33.6, el cual fue detectado en la E1 a ~150 m de profundidad, pero localizado a ~50 m de profundidad en la E4. Por debajo del contorno de 33.6, se observó el mismo gradiente norte-sur. Por ejemplo, el contorno de salinidad de 34 se registró a ~200 m de profundidad al norte del transecto, mientras que en el sur se detectó ~90 m de profundidad.

La temperatura presentó un escenario muy similar al mostrado por la salinidad, con valores incrementándose a lo largo del transecto de norte a sur (Fig. 3b). En el norte, se registraron los valores mínimos de temperatura superficial de $\sim 17^{\circ}\text{C}$, mientras que hacia el sur se registraron valores máximos superficiales de $\sim 19^{\circ}\text{C}$. Se puede observar como el contorno de temperatura de 10°C se detectó a profundidades entre 170 y 150 m desde la E1 hasta la E3, localizada frente a Punta Eugenia. En el resto de las estaciones del transecto, el contorno de 10°C no se detecta en los primeros 200 m ya que a esa profundidad se registraron temperaturas mayores a 10°C . Además, en la E3 se detectó la mayor diferencia en temperatura entre la superficie y los primeros 200 m, con una diferencia de 9°C . Mientras que en el norte y sur del transecto, la variabilidad entre los primeros 200 m fue $\sim 7^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, a pesar de presentar la misma diferencia en temperatura, hay que recordar que en la zona sur del transecto, la temperatura registrada fue mayor a la del norte tanto en la superficie, como en la columna de agua.

El comportamiento de la salinidad y temperatura descrito anteriormente se ve reflejado en las isolíneas de densidad (Fig. 3c), las cuales también se van haciendo más someras hacia el sur. Puede observarse que la isolínea sigma-t de 26 en el norte del transecto se encontró a ~ 125 m, mientras que en la E5 (la más sureña del transecto) se encontró ~ 80 m de profundidad.

7.2.2 Características químicas y variables del sistema del CO_2 en la RBC

La distribución vertical y espacial de las variables químicas y del sistema del CO_2 mostró una tendencia norte-sur similar a la presentada por la salinidad a profundidades mayores a 50 m. Por ejemplo, la nutriclina y las isolíneas de oxígeno fueron más profundas en el norte y se fueron haciendo gradualmente más someras hacia el sur (Fig.4).

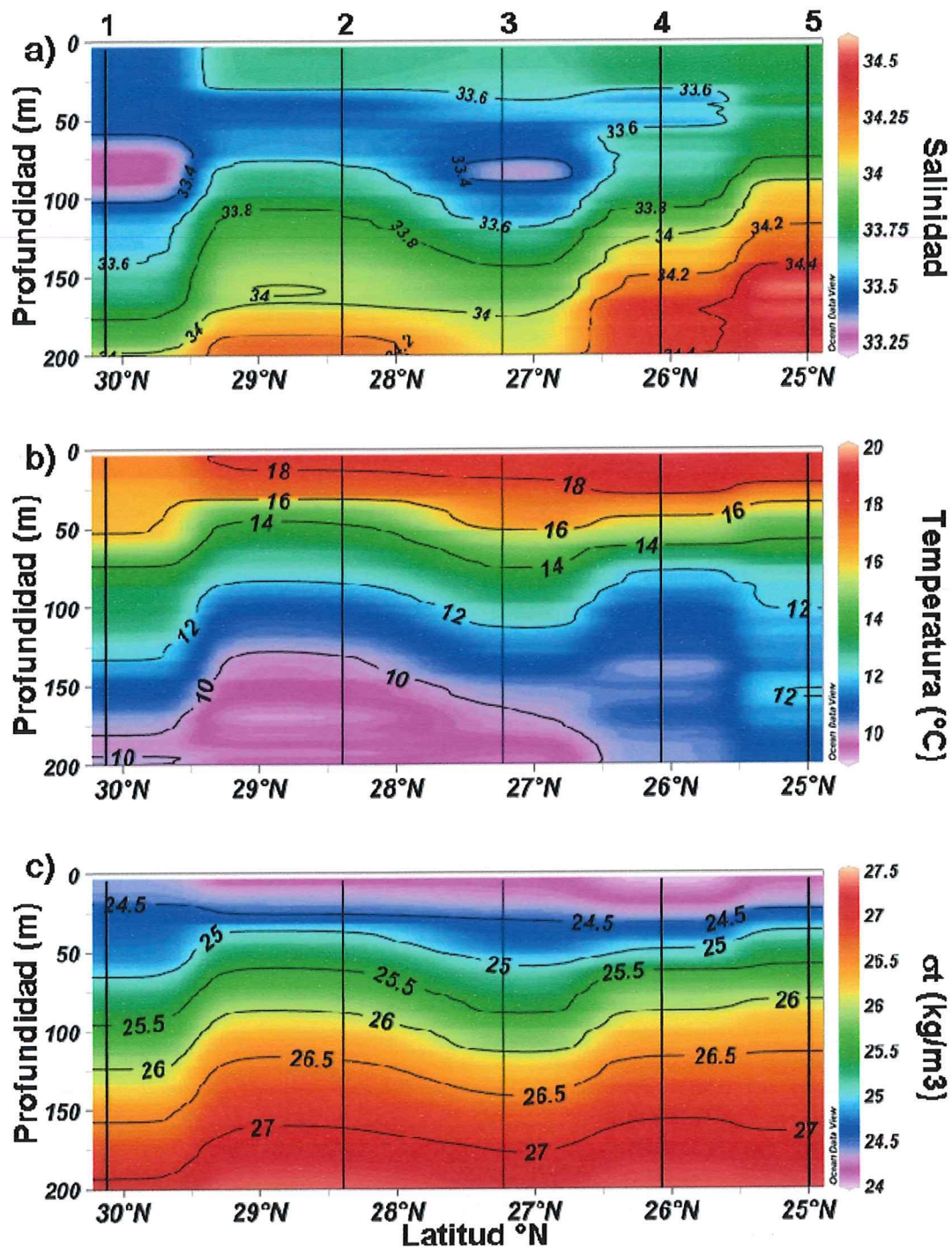


Figura 3. Distribución vertical de a) Salinidad, b) Temperatura y c) Sigma-t en la región de Baja California. Las líneas negras verticales corresponden a los lanzes de CTD. Los números superiores corresponden a las estaciones de muestreo de la Fig. 1.

Para el caso de la concentración superficial de oxígeno, se registraron valores que fluctuaron entre 5.2 y 5.4 mL/L a lo largo de todo el transecto (Fig. 4a). El valor máximo de oxígeno (6 mL/L) se detectó en la E2, a una profundidad de ~40 m. Pero como anteriormente se mencionó, la concentración de oxígeno disuelto presentó una tendencia a disminuir hacia el sur. Por ejemplo, el contorno que indica la concentración de oxígeno de 3 mL/L se localiza a ~200 m de profundidad al norte del transecto, y se hace más somero a medida que la latitud disminuye, hasta alcanzar una profundidad de ~80 m en la E5. En la E3 se registraron concentraciones de oxígeno menores a 1 mL/L a partir de 370 m de profundidad (esta información no se muestra en la figura), sin embargo, en las E4 y E5 estos valores se detectaron a partir de 150 m de profundidad. El transecto norte a sur de nitratos tuvo un comportamiento vertical similar al de oxígeno, en el cual se observó que la nutriclina es más profunda en el norte que en el sur (Fig. 4b). En las aguas superficiales las concentraciones fueron menores a 1 μ M. Estas bajas concentraciones se detectaron desde la superficie hasta ~120 m de profundidad en la E1. Sin embargo, en las estaciones al sur del transecto, la nutriclina se encontró más somera a ~75 m de profundidad. Este aumento en la concentración de nitratos hacia el sur, puede observarse claramente con el contorno de 16 μ M, el cual no se detectó en los primeros 200 m de la E1, sin embargo en la E5 se registró a partir de ~125 m de profundidad.

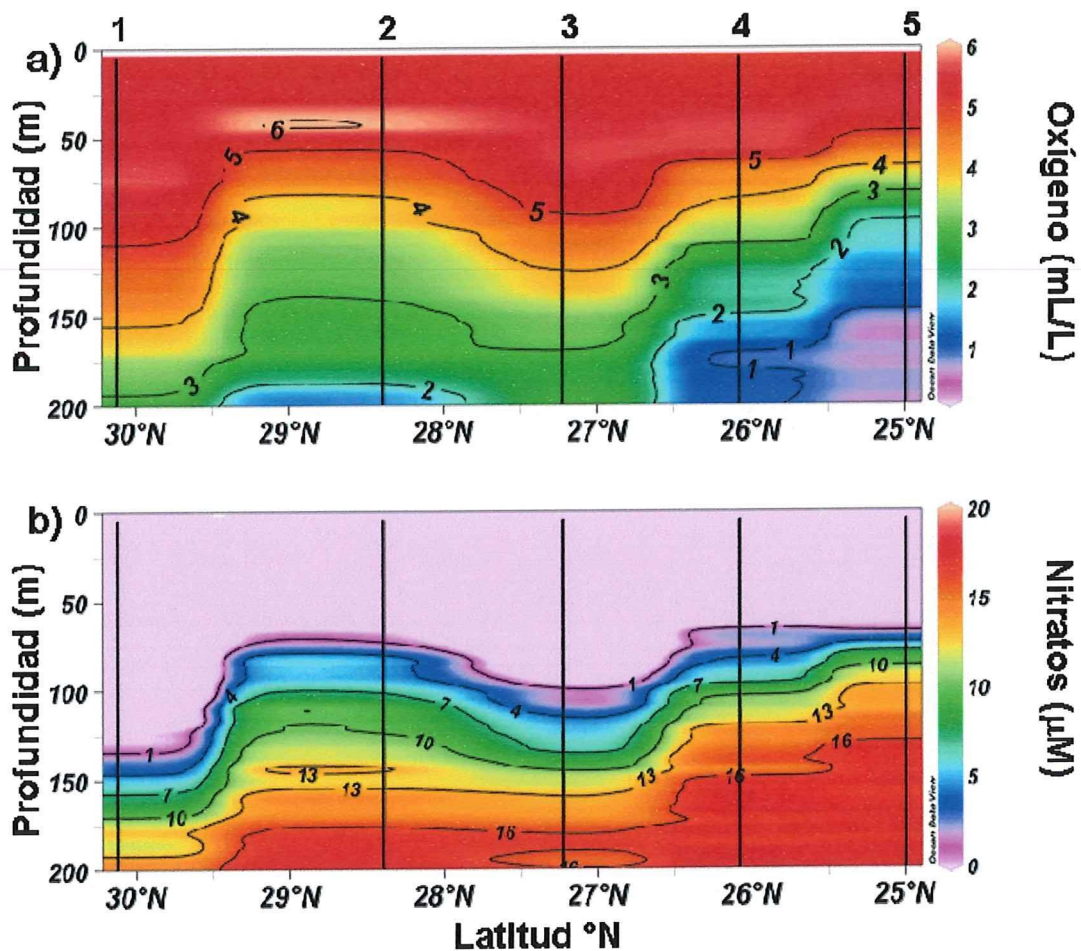


Figura 4. Distribución vertical de a) Oxígeno disuelto y b) Nitratos en la región de Baja California. Las líneas negras verticales corresponden a los lances de CTD. Las estaciones se muestran en la parte superior de la figura.

Por su parte, las variables del sistema del CO₂ en la RBC muestran una estructura similar al resto de las variables químicas en su distribución vertical (Fig. 5). Por ejemplo, el pH *in situ* superficial de la RBC fue de ~8.0 y no presentó variaciones claras a lo largo del transecto norte-sur (Fig. 5a).

Sin embargo, en la vertical se observaron aguas con valores menores de pH hacia el sur del área de estudio. Lo anterior puede observarse con el contorno de 7.9, el cual se localizó a ~150 m de profundidad en la E1, mientras que en la E5 se observó a 75 m de profundidad. A su vez, en la E2 se detectaron valores de pH <7.7 cerca de los 200 m de profundidad, mientras que en las E4 y E5 estos valores se encontraron a partir de ~125 m de profundidad. Adicionalmente en los primeros 200 m de las E1 y E3 no se detectaron valores de pH menores a 7.7. Sin embargo, en las E4 y E5 se detectaron valores de pH muy cercanos a 7.6 a 200 m de profundidad.

En el caso del CID se observó un comportamiento inverso al pH en el transecto norte-sur, encontrando una tendencia general a aumentar la concentración de CID hacia el sur. (Fig. 5b). La menor concentración superficial de CID fue de 2009 μmolkg^{-1} y se detectó en la E1 al norte del transecto, sin embargo, en la E4 y E5 las concentraciones superficiales de CID se incrementaron ligeramente a 2020 y 2025 μmolkg^{-1} , respectivamente. Esta tendencia a incrementar de la concentración de CID hacia el sur puede observarse igualmente en la columna de agua, siguiendo la isolínea de 2170 μmolkg^{-1} , la cual se detectó a ~200 m de profundidad en las estaciones al norte del transecto y se hizo más somera en las estaciones al sur del transecto, hasta alcanzar los 100 m de profundidad en la E5. Además, mientras en las E1 y E2 se observaron concentraciones no mayores a 2210 μmolkg^{-1} a 200m de profundidad, en la E5 se detectaron valores de hasta 2250 μmolkg^{-1} a esa profundidad.

En general, los valores superficiales de pCO₂ en la RBC se encontraron muy cercanos al valor en equilibrio con la atmósfera de 387 μatm (http://scrippsco2.ucsd.edu/program_history/keeling_curve_lessons.html) (Fig.5c). Únicamente en la E1, el valor de pCO₂ superficial en el océano fue ligeramente menor al valor atmosférico, con un ΔpCO_2 de -12 μatm sugiriendo que esa zona se comporta como sumidero de CO₂ atmosférico. Sin embargo, en el resto de las estaciones, a pesar de haber registrado valores de ΔpCO_2 positivos, estos no fueron mayores a 15 μatm . La excepción fue la E4, en la cual se

detectó el máximo $p\text{CO}_2$ superficial de $412 \mu\text{atm}$ y con un $\Delta p\text{CO}_2$ de $25 \mu\text{atm}$, lo que sugiere que esa zona se comporta como fuente de CO_2 hacia la atmósfera. En la E1, los valores de $p\text{CO}_2$ menores al valor en equilibrio se detectaron hasta ~ 75 m de profundidad. La variabilidad del $p\text{CO}_2$ en los primeros 200 m fue mayor en la zona sur que en las estaciones al norte del transecto, con una diferencia en $p\text{CO}_2$ entre la superficie y los 200 m de $\sim 730 \mu\text{atm}$, mientras que en la E1 la diferencia fue de $\sim 460 \mu\text{atm}$.

Los Ω_{arag} y Ω_{cal} fueron calculados a partir de mediciones de AT y CID como se mencionó anteriormente. En la RBC, se observó que la isolínea de subsaturación de aragonita ($\Omega_{\text{arag}} = 1$) se encontró en los primeros 200 m de la columna de agua en casi todas las estaciones, mientras que la isolínea de subsaturación de calcita ($\Omega_{\text{cal}} = 1$) fue mas profunda y por ello no fue posible detectarle en los primeros 200 m de profundidad (Fig.6).

En los primeros 25 m del transecto norte-sur, la Ω_{arag} superficial fluctuó entre 2.5 y 2.6 (Fig.6a). A partir de los 50 m de profundidad, se observaron claras disminuciones del valor de Ω_{arag} en las estaciones al sur del transecto en comparación con las del norte. Por ejemplo, el contorno de $\Omega_{\text{arag}} = 1.5$ se encontró a ~ 150 m de profundidad en la E1, mientras que en la E5 se detectó a ~ 100 m de profundidad. En los primeros 200 m no se detectaron valores de subsaturación de aragonita en la E1; sin embargo, a partir de la E2, la isolínea de subsaturación se elevó desde ~ 175 m hasta ~ 125 m de profundidad en la E5.

Las isolíneas de Ω_{cal} mostraron el mismo patrón de elevación de norte a sur como se describió anteriormente para Ω_{arag} (Fig. 6b). En general, los valores de Ω_{cal} superficiales fueron muy cercanos a valores de 4 en todo el transecto, sin embargo, en las E4 y E5 se detectaron los valores superficiales de Ω_{cal} ligeramente mayores a 4. La isolínea de $\Omega_{\text{cal}} = 2$ se elevó de 175 m en el norte hasta ~ 100 m en el sur. La isolínea de subsaturación no se observó en los primeros 200 m de profundidad, sin embargo, se registraron valores ligeramente menores a 1.5 en la E2 cerca de 200 m y en las E4 y E5 a ~ 150 m de profundidad.

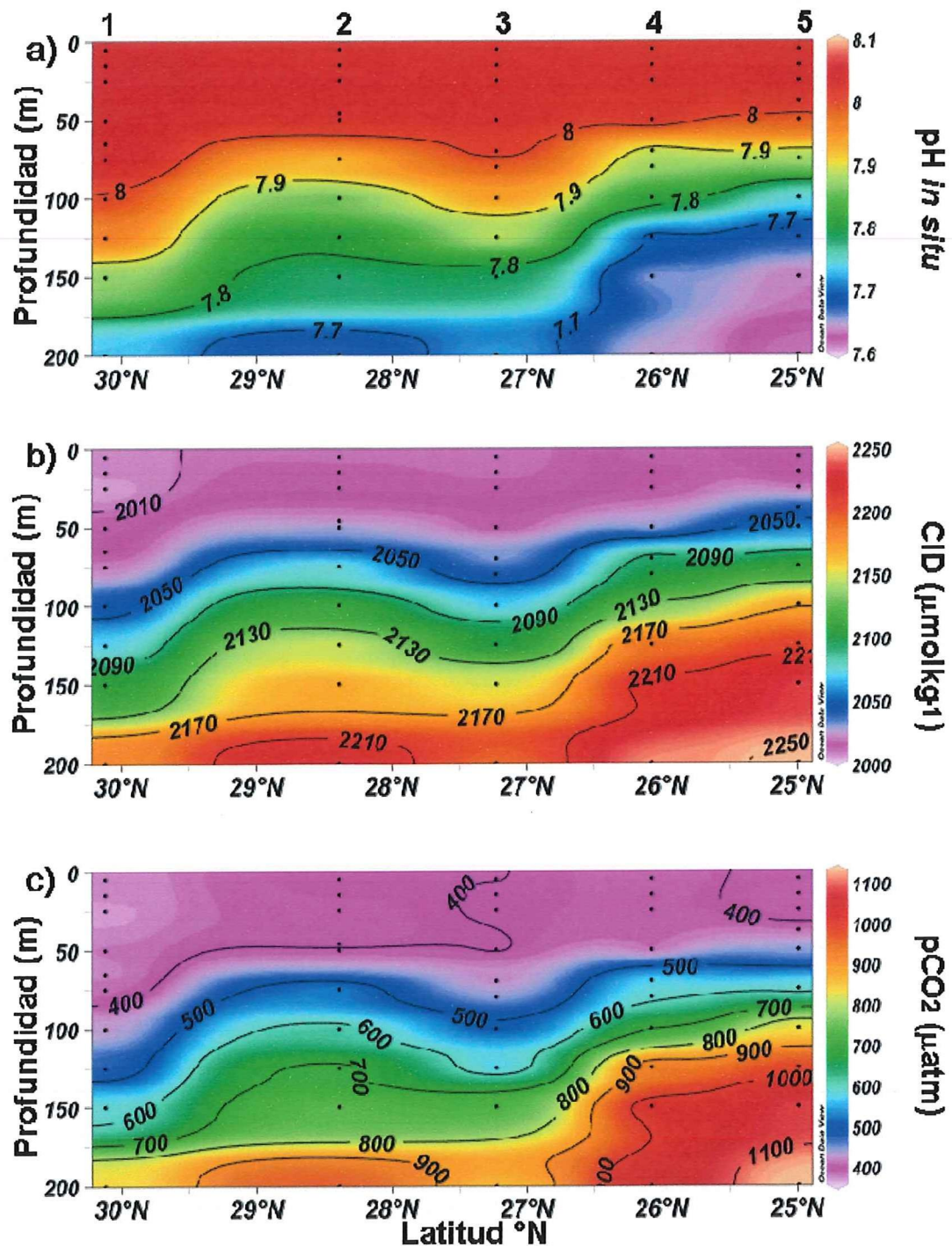


Figura 5. Distribución vertical de a) pH *in situ*, b) CID y c) pCO_2 en la región de Baja California. Los puntos indican la profundidad de muestreo. Las estaciones se muestran en la parte superior de la figura.

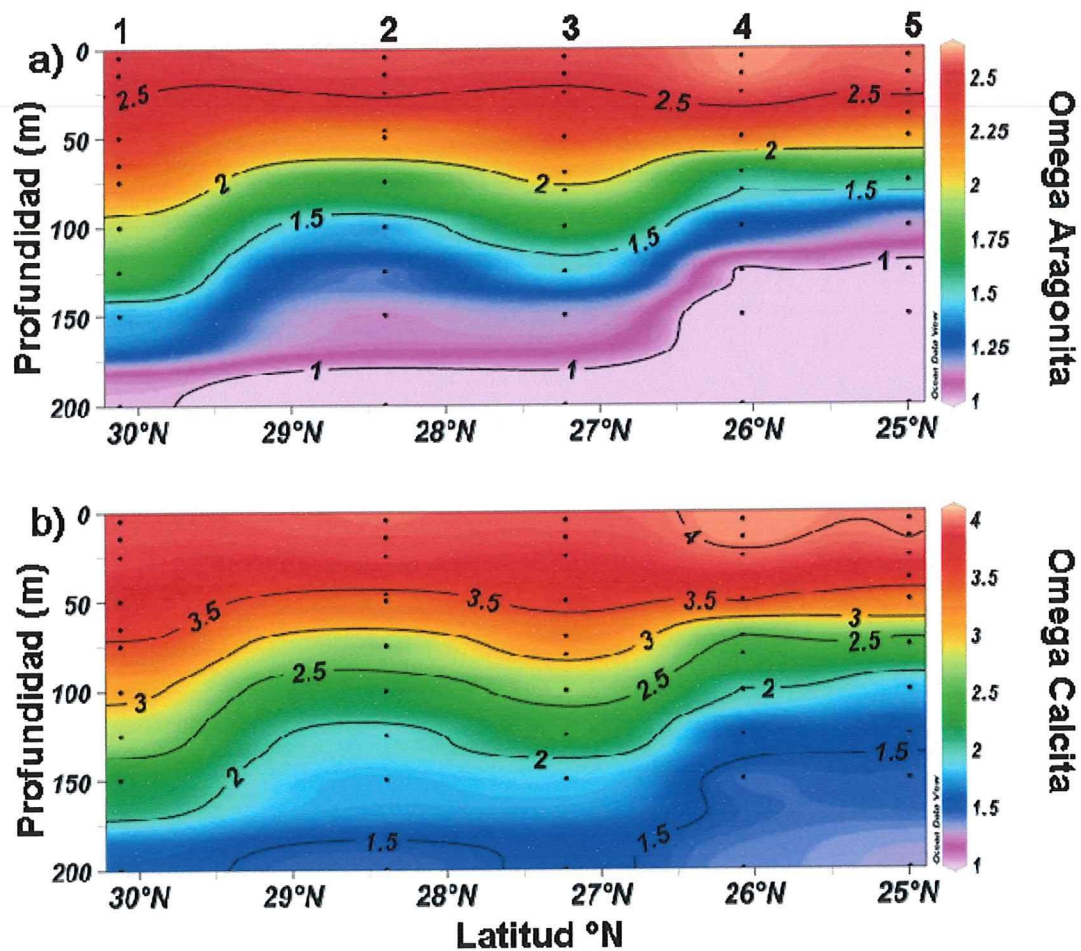


Figura 6. Distribución vertical de a) Ω_{arag} y b) Ω_{cal} en la región de Baja California. Los puntos indican la profundidad de muestreo. Las estaciones se muestran en la parte superior de la figura.

7.2.3 Características Biológicas

Mencionar en la metodología que del CTD se derivó la clorofila a partir de la fluorescencia, cambiar por clorofila donde dice fluorescencia.

Los perfiles de clorofila de cada estación de la RBC se muestran en la figura 7. Como era de esperarse, se detectaron picos de máxima clorofila en la zona eufótica a una profundidad de ~50 m, donde ocurre normalmente el proceso de fotosíntesis. Sin embargo, en la E1 y E3, los picos de máxima clorofila se detectaron ligeramente más profundos que en el resto de las estaciones, entre los 50 y 75 m de profundidad. El máximo valor de clorofila se detectó en la E5 (~1.75 $\mu\text{g/L}$), mientras que los valores menores se detectaron en las estaciones 1 y 3, con valores de aproximadamente 0.5 $\mu\text{g/L}$ en el pico de máxima clorofila.

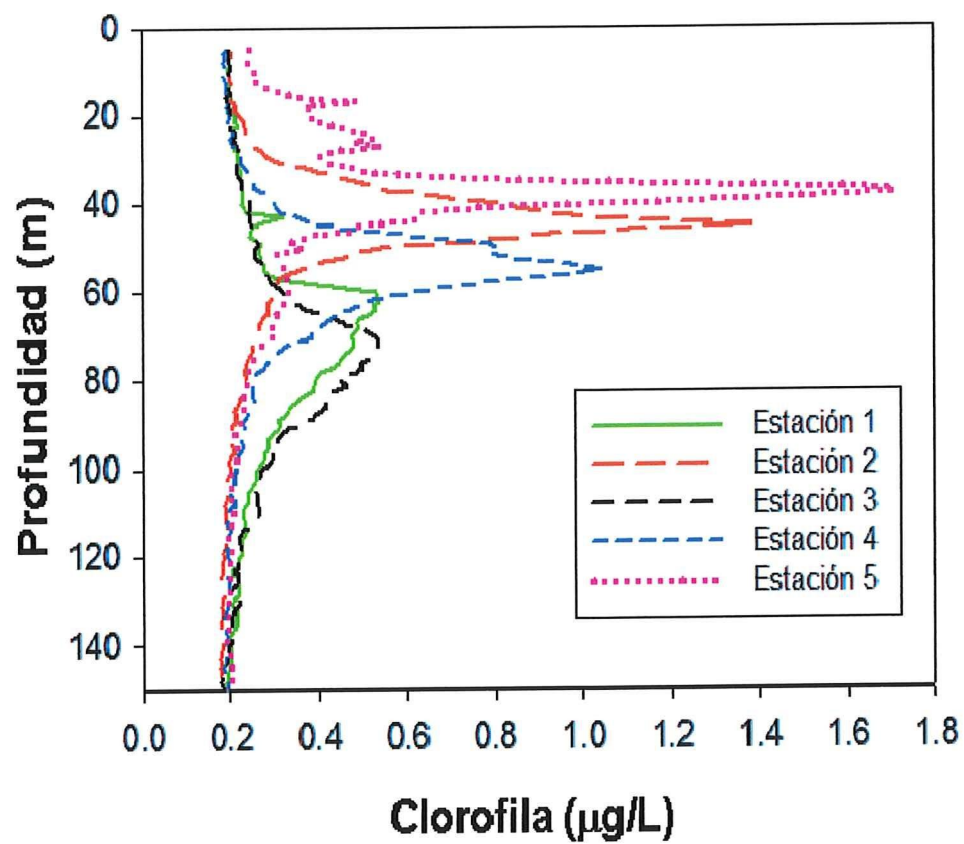


Figura 7. Perfiles de clorofila de cada estación de la RBC

7.3 Región Subtropical

7.3.1 Características Físicas

En contraste con lo encontrado en la RBC, las variables físicas de la RS no presentaron un gradiente norte-sur. Sin embargo, en el eje vertical permite observar una mayor estratificación con una capa de mezcla profunda reflejada por ejemplo, en la temperatura (Fig. 8). En esta región, se registraron los máximos valores de temperatura y salinidad del muestreo, así como valores mínimos de densidad. En los primeros 100 m de la E8, se presentó un hundimiento en la forma de los contornos. A partir de dicha estación, hacia el norte y hacia el sur, las isolíneas vuelven a elevarse, esta estructura se observó en todas las variables y no únicamente con las variables físicas.

En esta región, la salinidad alcanzó valores máximos superficiales mayores a 35 a lo largo de todo el transecto norte-sur (Fig. 8a). Sin embargo, en la E8, localizada a ~40 km de la costa frente a cabo corrientes, se observó que la salinidad superficial disminuyó a valores menores a 34.4. Desde la superficie, hasta los primeros 50 m de profundidad, se observó una clara disminución en los valores de salinidad hasta alcanzar el contorno de 34.8. Por debajo de dicha isohalina, el valor de salinidad permanece uniforme, con valores muy cercanos a 34.8, con excepción de la E8, en la cual se observaron valores de salinidad menores a 34.6 hasta ~100 m de profundidad.

La temperatura superficial presentó valores que fluctuaron entre 26 y 29°C, encontrándose el valor mínimo en la E10 y el máximo en la E8 (Fig. 8b). En esta última estación, la temperatura se incrementó probablemente debido a una acumulación de agua pudiera deberse a la presencia de un giro anticiclónico. Se observó también, una termoclina muy pronunciada y somera a ~50 m de profundidad, con excepción de la E8, donde se detectó a ~75 m de profundidad. En esta capa se observó la mayor variabilidad, con una diferencia en temperatura de ~13°C entre los 0 y 75 m de profundidad. A partir del contorno de temperatura de 15°C, detectado a ~80 m de profundidad (~100 m en la E8), la variabilidad disminuyó considerablemente y el cambio de temperatura entre dicha isoterma y 200 m de profundidad fue de ~3°C.

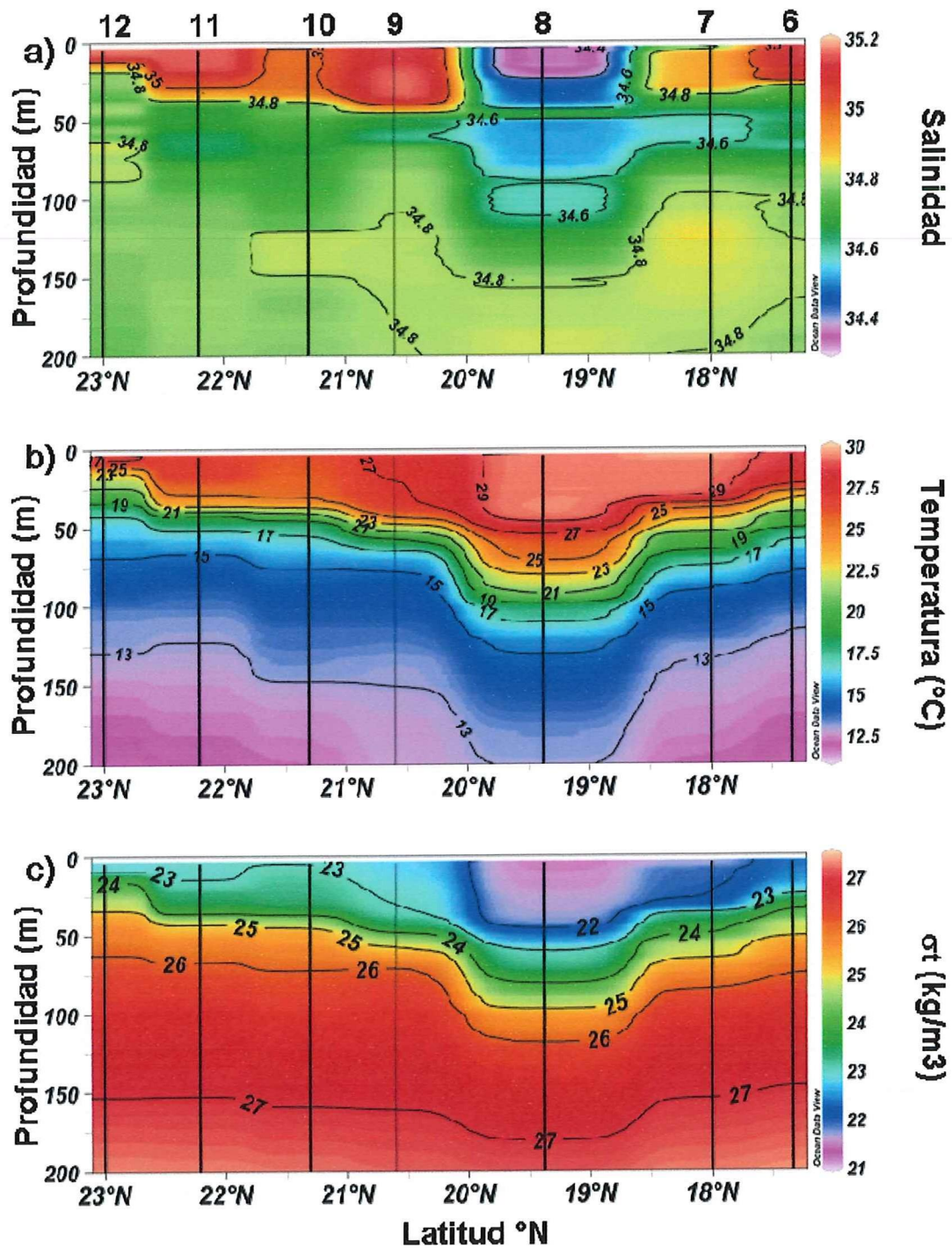


Figura 8. Distribución vertical de a) Salinidad, b) Temperatura y c) Sigma-t en la región Subtropical. Las líneas negras verticales corresponden a los lances de CTD. Las estaciones se muestran en la parte superior de la figura.

El valor de sigma-t superficial observado en la RS fue de $\sim 23 \text{ kg/m}^3$ (Fig. 8c). Sin embargo, como resultado de la alta temperatura y baja salinidad observada en la superficie de las estaciones 7 y 8, el valor de sigma-t superficial de estas dos estaciones es menor a 22 kg/m^3 . El hundimiento de las isotermas e isohalinas en la E8 se vio reflejado en las isopícnas de dicha estación. Por ejemplo, la isolínea sigma-t de 26 se encontró a $\sim 120 \text{ m}$ de profundidad en la E8, mientras que en el resto de las estaciones se detectó por arriba de 75 m de profundidad. Al igual que con las variables anteriores, la densidad presentó mayor variación en los primeros 100 m de la columna de agua, con una diferencia de densidad de $\sim 3 \text{ kg/m}^3$ entre 0 y 100 m de profundidad. A partir de la isolínea sigma-t de 26 la variabilidad disminuye y el cambio en densidad entre los 100 y 200 m de profundidad fue menor.

7.3.2 Características químicas

La distribución vertical de oxígeno disuelto y nitratos siguió el patrón descrito anteriormente para las variables físicas (Fig. 9). En esta región se observaron las concentraciones de oxígeno más bajas del muestreo tanto en la superficie como en la columna de agua, a su vez, la nutriclina se encontró en los primeros 100 m de profundidad, siendo la más somera del muestreo.

La concentración superficial de oxígeno fue de $\sim 4 \text{ mL/L}$ a lo largo de todo el transecto (Fig. 9a). Aproximadamente a los 50 m de profundidad, la concentración de oxígeno disminuyó de 4 mL/L a 1 mL/L en todas las estaciones, como se puede observar siguiendo la isolínea de 4 y de 1 mL/L . En la E8, se observó un hundimiento de los contornos, estructura que también se observó con salinidad y temperatura, y en dicha estación el contorno de 1 mL/L se encontró más profundo, aproximadamente a 100 m de profundidad.

El transecto norte – sur de nitratos mostró una estructura similar al oxígeno (Fig. 9b) A lo largo de todo el transecto, en los primeros 40 m de profundidad, la concentración de nitratos es cercana a cero. En la E8, estas bajas concentraciones se detectaron hasta $\sim 80 \text{ m}$ de profundidad. Por debajo de estas profundidades, la concentración de nitratos se incrementó y se detectó la nutriclina entre 40 y 50 m de profundidad, mientras que la

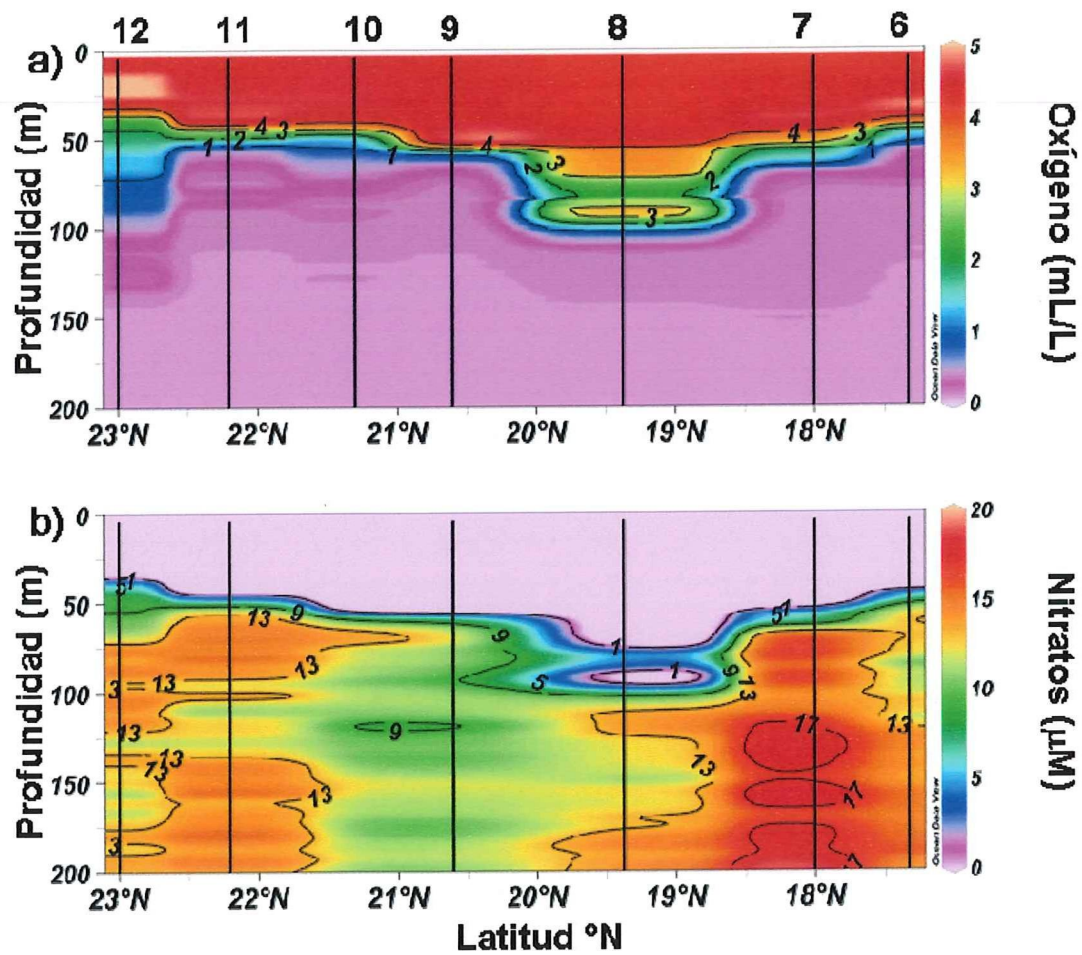


Figura 9. Distribución vertical de a) Oxígeno disuelto y b) Nitratos en la región Subtropical. Las líneas negras verticales corresponden a los lances de CTD. Las estaciones se muestran en la parte superior de la figura. Nótese que en la E10 no se obtuvo el perfil de nitratos.

nutriclina en la E8 se encontró entre 75 y 100 m de profundidad. En los primeros 200 m de la columna de agua, las concentraciones más altas ($>17 \mu\text{mol}$) se encontraron en la E7, a partir de aproximadamente 100 m de profundidad.

La estructura vertical de las variables del sistema del CO_2 en los transectos norte – sur se muestra en la figura 10. Al igual que con las variables físicas, se observó que la mayor variabilidad se encontró en los primeros 100 m de profundidad. En esta región se registraron los menores valores de pH *in situ* y las mayores concentraciones de CID y pCO_2 de todo el muestreo.

En general, los valores superficiales de pH fueron ligeramente mayores en las estaciones del sur que en las del norte del transecto (Fig. 10a). Por ejemplo, la isolínea de $\text{pH} = 8.0$ se elevó desde ~25 m en la E6 hasta alcanzar la superficie en la E9 (Fig. 10a). En la superficie de las estaciones del norte del transecto (E10 a E12) el valor de pH fue menor a 8.0. En los primeros 100 m, las isolíneas de pH mostraron un hundimiento en la E8 y esta se puede observar en el contorno de 7.7, el cual se detectó ~100 m de profundidad en dicha estación, mientras que en las E12 y E6 se encontró a ~50 m. La diferencia en pH entre la superficie y 100 m de profundidad fue de ~0.3 unidades de pH. Mientras que por debajo de los 100 m de profundidad, el cambio en pH con respecto a la profundidad es menor. Valores de 7.6 o menores se detectaron a una profundidad muy somera en la E12 (~75 m de profundidad) mientras que hacia el sur estos valores se encontraron más profundos a ~200 m en la E6.

Por su lado, la estructura vertical de las isolíneas de CID fue similar a la de pH (Fig. 10b). En la superficie, el mínimo valor se detectó en la E8 con una concentración de $1944 \mu\text{molkg}^{-1}$, mientras que en la E12 se detectó la máxima concentración superficial de $2060 \mu\text{molkg}^{-1}$. El contorno de $2020 \mu\text{molkg}^{-1}$ se detectó solamente en la E7 y 8 a ~50 m de profundidad. Mientras que la isolínea de $2260 \mu\text{molkg}^{-1}$ se encontró en la E12 a ~75 m de profundidad, pero hacia el sur se fue haciendo más profunda y en la E6 se localizó a ~175 m de profundidad.

En el transecto norte – sur de pCO_2 , se observó que todos los valores superficiales de pCO_2 fueron mayores a $400 \mu\text{atm}$ (Fig. 10c). Este valor es ligeramente mayor al valor de pCO_2 atmosférico de $387 \mu\text{atm}$ (http://scrippsco2.ucsd.edu/program_history/keeling_curve_lessons.html), resultando en valores de ΔpCO_2 positivos. El mínimo valor de

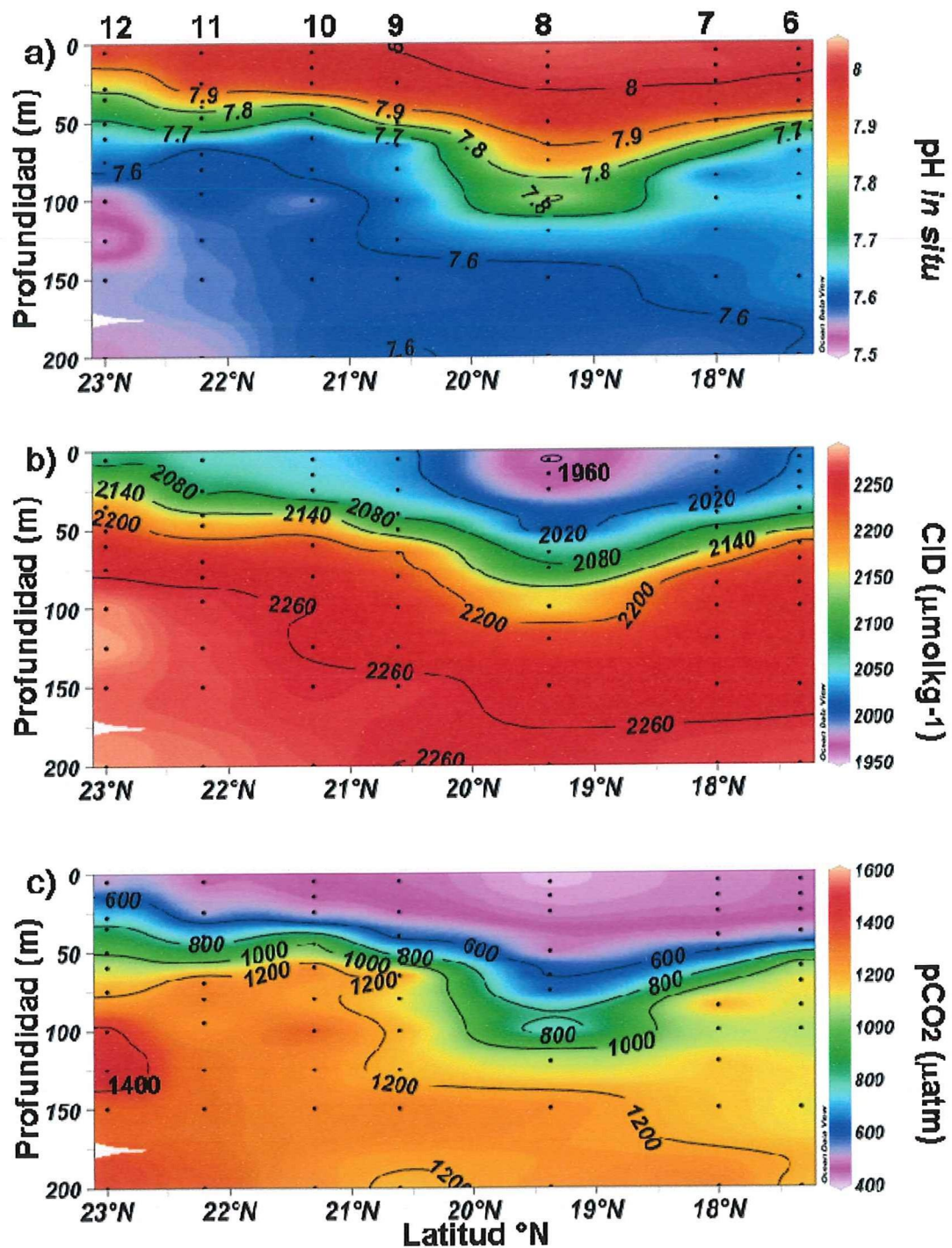


Figura 10. Distribución vertical de a) pH *in situ*, b) CID y c) pCO_2 en la región Subtropical. Los puntos indican la profundidad de muestreo. Las estaciones se muestran en la parte superior de la figura.

$\Delta p\text{CO}_2$ se registró en la E8 con un valor de $5.7 \mu\text{atm}$, mientras que el valor máximo de $\Delta p\text{CO}_2$ fue de $95 \mu\text{atm}$ y se detectó en la E12. En dicha estación, la isolínea de $p\text{CO}_2$ correspondiente a $600 \mu\text{atm}$ casi alcanzó la superficie, mientras que en las estaciones al sur del transecto, esta isolínea se encontró más profunda y se observó a ~ 50 m de profundidad en la E6. En la E8, se observó que las isolíneas de 800 y $1000 \mu\text{atm}$ se encuentran más profundas que en el resto de las estaciones. Mientras que la isolínea de $1200 \mu\text{atm}$ se encontró cercana a 200 m de profundidad en la E6, y se hizo más somera hacia la E12, donde alcanzó ~ 20 m de profundidad. Se observó un núcleo de agua con valores $>1400 \mu\text{atm}$ en la E12 entre los 100 y 150 m, y fue el nivel más alto de $p\text{CO}_2$ registrado en todo el muestreo.

En la RS se detectaron los máximos valores superficiales de Ω_{arag} y Ω_{cal} de todo el muestreo (Fig. 11), sin embargo en la vertical los valores de Ω_{arag} disminuyeron hasta el valor de subsaturación ($\Omega_{\text{arag}} = 1$) en menos de 100 m de profundidad. En esta región, no se detectaron valores de subsaturación de calcita en los primeros 200 m de la columna de agua.

En la RS los valores máximos superficiales de Ω_{arag} se localizaron en la zona sur del transecto y los valores menores se detectaron al norte (Fig. 11a). En la E8 se detectó el máximo superficial con un valor de 3.8 , mientras que el mínimo superficial de 3.3 se registró en la E12. Los cambios mayores de Ω_{arag} con respecto a la profundidad se observaron en los primeros 100 m, con una diferencia de ~ 3 unidades entre la superficie y 100 m. La isolínea de subsaturación de aragonita mostró una tendencia a hacerse más somera en las estaciones al norte del transecto, donde se detectó a una profundidad ~ 75 m, mientras que en las estaciones al sur del transecto se detectó aproximadamente a 125 m de la superficie.

Al igual que con Ω_{arag} , los valores máximos superficiales de Ω_{cal} se encontraron en la zona sur (Fig. 11b). En la E8 se observó el valor más alto de 5.7 , mientras que el valor mínimo superficial de calcita fue 5 y se observó en las estaciones 10 , 11 y 12 , al norte del transecto. La distribución vertical de calcita en la RS mostró el mismo patrón que las variables anteriores, con una depresión de las isolíneas en la E8 detectado en ~ 100 m. Esto puede observarse con el contorno de 2.5 , que se detectó aproximadamente a 100 m en la E8, mientras que en la E12 se encontró a ~ 40 m de profundidad. El contorno de

1.5 se encontró a ~75 m de profundidad, mientras que hacia el sur, este se hizo más profundo, hasta llegar a aproximadamente 125 m de profundidad en la E6.

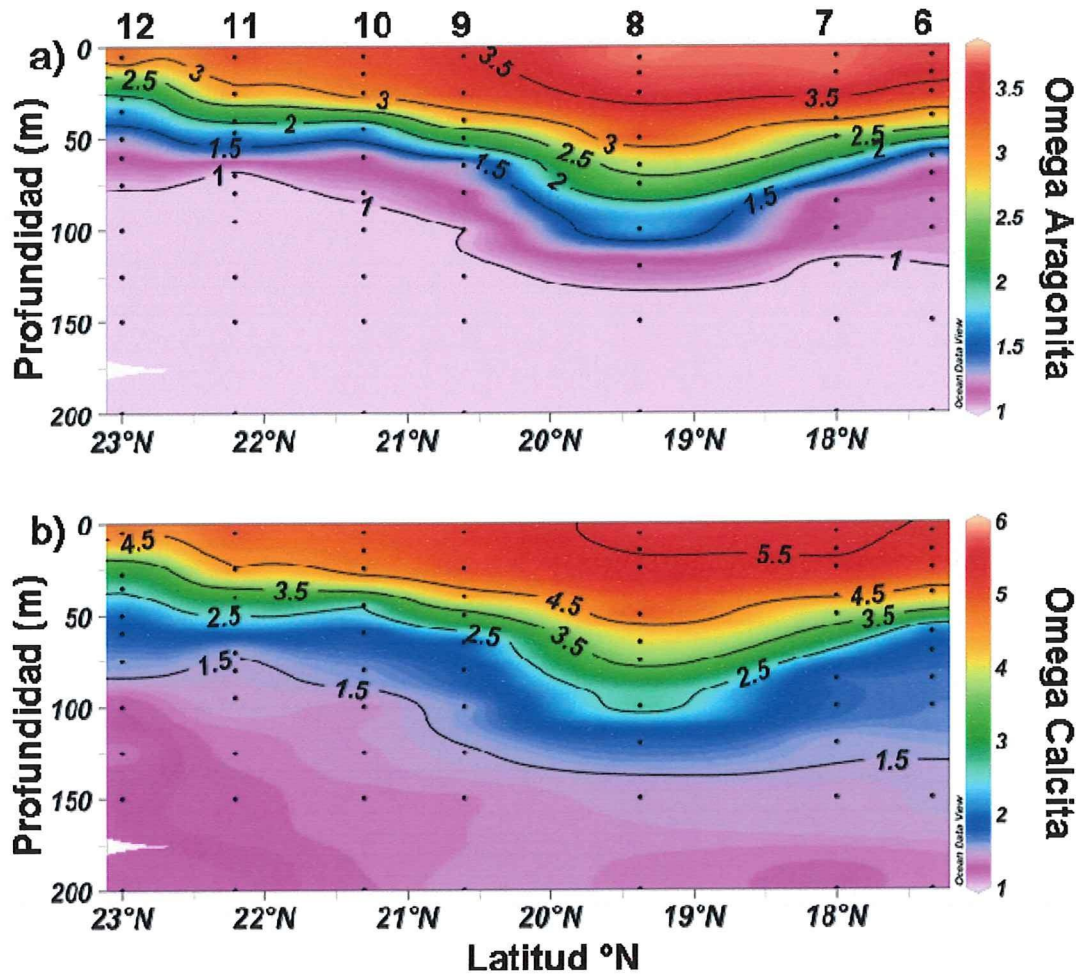


Figura 11. Distribución vertical de a) Ω_{arag} y b) Ω_{arag} en la región de Baja California. Los puntos indican la profundidad de muestreo. Las estaciones se muestran en la parte superior de la figura.

7.3.3 Características Biológicas

Los perfiles de clorofila de la región subtropical se muestran en las figuras 12 y 13. Los perfiles muestreados en esta región mostraron máximos subsuperficiales de clorofila típicos por arriba de 50 m de profundidad (Fig. 13) y similares a los encontrados en las costa de RBC. Los valores máximos encontrados fueron de $\sim 1.3 \mu\text{g/L}$ y se detectaron en la E6, la cual se localiza en la parte más sureña del transecto.

Sin embargo, algo totalmente distinto a lo encontrado en la RBC, fue el segundo máximo profundo de clorofila, medido específicamente en las E6, E7 y E8, el cual se atribuye al crecimiento monotípico de la cianobacteria *Prochlorococcus* que se ha detectado en esa zona por diversos autores (Goericke *et al.* 2000; Barbeau y Hopkinson, 2007) (Fig. 12). Este segundo máximo subsuperficial se observó en las E6, E7 a profundidades de aproximadamente 100 m, mientras que en la E8 se presentó entre 125 y 150 m de profundidad. En general, los valores de clorofila en el máximo profundo fueron de $\sim 0.5 \mu\text{g/L}$ y con una intensidad de luz menor al 0.4%. A su vez, a esas profundidades la concentración de oxígeno fue menor a 0.1 mL/L con valores por debajo del Ω_{arag} de saturación y con una alta concentración de nitratos (Tabla I).

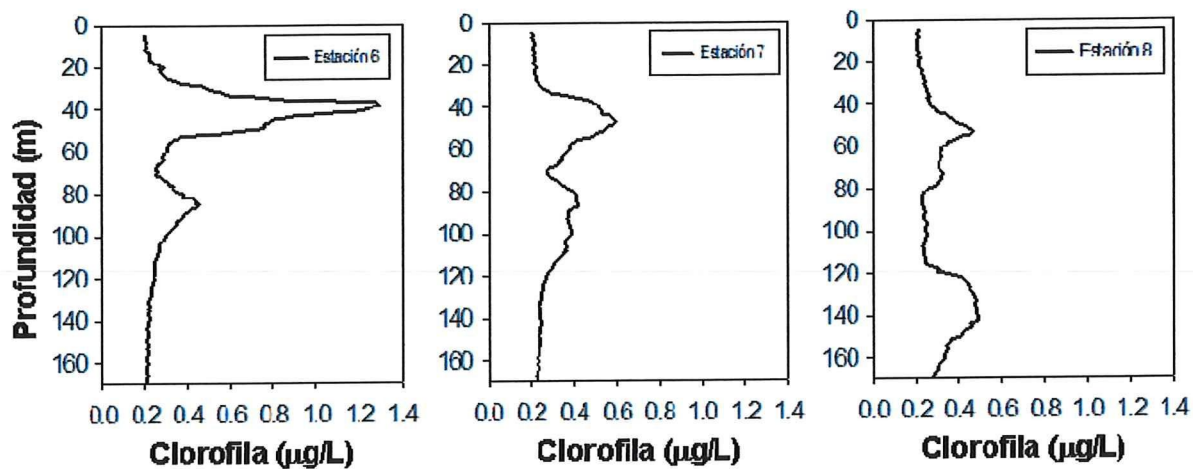


Figura 12. Perfiles de clorofila de la región subtropical de la E6, E7 y E8. El segundo máximo profundo de clorofila se atribuye a la cianobacteria *Prochlorococcus*.

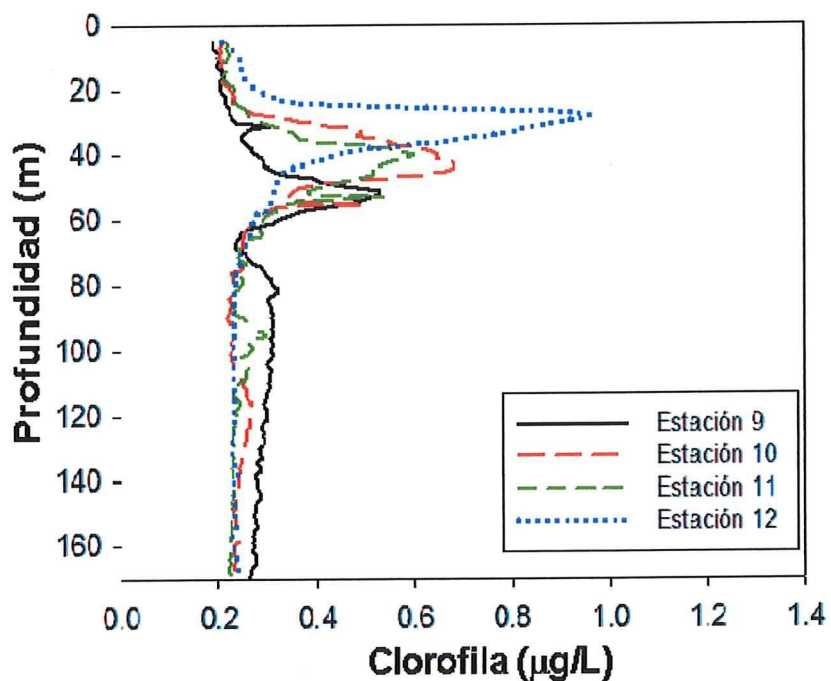


Figura 13. Perfiles de clorofila en la E9, E10, E11 y E12 de la RS.

Tabla I. Características físicas y químicas del agua de mar de las estaciones de la RS en que se detectó el segundo máximo de clorofila. La E6 fue la más alejada de la costa.

Estación	T (°C)	Salinidad	O ₂ (mL/L)	pH <i>in situ</i>	DIC ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)
6	14.5	34.74	0.1	7.64	2245
7	14.36	34.8	0.1	7.65	2246
8	14.68	34.73	0.1	7.6	2240

7.4. Asignación de valores de CID y AT a las masas de agua detectadas

Para generar los promedios y desviaciones estándar de sigma-t, pH *in situ*, AT, CID, Ω_{cal} y Ω_{arag} de cada masa de agua, se consideraron las características T-S de las masas de agua identificadas al principio del capítulo (Fig. 2). Los valores calculados se muestran en la tabla II.

Es conveniente recordar que las masas de agua que se detectaron en la superficie de la columna de agua fueron el ASA, AGC y ASSt, mismas que presentaron los máximos valores promedio de oxígeno disuelto (>4 mL/L). Estas masas de agua también presentaron bajos valores de CID ($<2061 \mu\text{mol kg}^{-1}$). Sin embargo, tiene que tenerse en cuenta que en la superficie se favorece el intercambio gaseoso y además es donde se ve reflejado el efecto debido a los procesos biológicos como el consumo de CID por fitoplancton, que dan como resultado alta variabilidad que puede ser observada en los valores de las desviaciones estándar. Aun con estos procesos es posible notar diferencias en AT, y densidad entre las tres masas de agua superficial. Algo relevante son las diferencias en los Ω_{cal} y Ω_{arag} que tienen estas masas de agua y que muestran valores bajos en el ASA ($\Omega_{\text{arag}} = 2.06$ y $\Omega_{\text{cal}} = 3.21$) con respecto a las otras dos masas de agua superficiales, que son las que bañan la zona de corales en la región subtropical y donde los valores de Ω_{cal} y Ω_{arag} son mayores. Por lo anterior aun cuando es difícil asignar una concentración característica a las aguas superficiales como el caso de CID,

sugerimos tomarse en cuenta las observaciones antes mencionadas ante el posible uso de los promedios asignados a las masas de agua.

Algo a resaltar fue que la ASsE fue la única masa de agua en presentar valores promedio de AT, CID, pH in situ, Ω_{cal} y Ω_{arag} , y oxígeno claramente diferentes a las otras tres masas de agua. Dos variables que llamaron la atención fueron 1) el Ω_{arag} , en la cual se calcularon valores menores a 1 indicando subsaturación y 2) que adicionalmente fue la masa de agua con valores de oxígeno disuelto menores a 1 mL/L. Además, esta masa de agua presentó los valores promedio de Calcita más bajos (1.40 ± 0.13) con respecto al resto de las masas de agua observadas. Adicionalmente el ASsE presentó un valor promedio de CID aproximadamente 200 μ moles más alto que el calculado para las otras masas de agua detectadas, lo cual resultó en valores más bajos de pH.

Tabla II.- Valores promedio y desviación estándar de temperatura, salinidad, oxígeno y variables del sistema del CO₂ para las masas de agua detectadas en la RBC y RS en los primeros 500 m. Los acrónimos indican: Agua Subártica (ASA), Agua del Golfo de California (AGC), Agua Superficial Subtropical (ASSt) y Agua Subsuperficial Ecuatorial (ASsE).

Masa Agua	T (°C)	Salinidad	$\sigma - t$ (kg/m ³)	AT (μmolkg^{-1})	CID (μmolkg^{-1})	pH <i>in situ</i>	Ω_{arag}	Ω_{cal}	O ₂ (mL/L)	num. Datos
ASA	13.52 ± 2.80	33.650 ± 0.186	25.59 ± 0.87	2233 ± 11	2053 ± 53	7.97 ± 0.10	2.06 ± 0.53	3.21 ± 0.81	4.5 ± 1.0	41
AGC	26.99 ± 0.79	35.130 ± 0.044	22.89 ± 0.26	2337 ± 10	2038 ± 12	8.00 ± 0.01	3.43 ± 0.17	5.16 ± 0.24	4.4 ± 0.1	9
ASSt	23.70 ± 1.97	34.734 ± 0.171	23.70 ± 0.58	2305 ± 16	2061 ± 45	7.94 ± 0.06	2.82 ± 0.50	4.28 ± 0.73	4.1 ± 0.8	11
ASsE	10.99 ± 1.73	34.670 ± 0.127	27.76 ± 0.77	2302 ± 8	2261 ± 13	7.59 ± 0.03	0.90 ± 0.08	1.40 ± 0.13	0.2 ± 0.2	34

8. DISCUSIÓN

Los resultados de este trabajo, mostraron dos regiones oceanográficamente distintas como resultado de las diferencias de las propiedades físicas y químicas entre las muestras colectadas en la región de Baja California (RBC) y la región Subtropical (RS). Un ejemplo de ello son las diferencias de temperatura y salinidad que se muestran en el diagrama T-S de la figura 2. Las propiedades del agua y la circulación de cada región han sido estudiadas por varios autores, encontrando que la RBC se encuentra principalmente influenciada por la Corriente de California CC, la cual acarrea la masa de agua ASA que tiene como principal característica temperaturas menores a 21°C, y salinidades menores a 34, así como altas concentraciones de oxígeno (Durazo y Baumgartner, 2002). A su vez, se ha detectado que en la parte oceánica de esta región, la profundidad de subsaturación de aragonita tiende a hacerse más somera hacia el sur de la península (Feely *et al.* 2008).

Por otro lado, la RS se caracteriza por encontrarse en una de las más grandes zonas del mínimo de oxígeno de los océanos del mundo. Adicionalmente, en esta región se presentan altas salinidades (>34.4) y temperaturas (>25°C) debidas a la influencia de agua tropical y subtropical (Lavín *et al.*, 2006; Kessler, 2006; Fiedler y Talley, 2006). Cabe señalar que en esta región no existen trabajos publicados sobre las variables del sistema del CO₂, por lo que la importancia de este trabajo, entre otras, radica en que se presentarán los primeros datos costeros del sistema del CO₂ en el PSM en época de verano.

En particular, la profundidad de subsaturación de la aragonita se detectó en los primeros 200 m de la columna de agua en las dos regiones de muestreo, encontrándose más somera en la RS que en la RBC. El escenario para la calcita es diferente, dado que la profundidad de subsaturación de calcita se encuentra más profunda que la de la aragonita (Feely *et al.* 2002) y en este muestreo se corroboró lo anterior al no detectar aguas subsaturadas en los primeros 200 m de profundidad. En la siguiente discusión, se hará un especial hincapié en el Ω_{arag} , debido a que la profundidad de subsaturación de aragonita se encontró sobre la plataforma y podría eventualmente llegar a la superficie. Producto del análisis de este trabajo es necesario mencionar que las diferencias en la química del sistema del CO₂ entre una región y

otra, son consecuencia de las diferentes propiedades físicas y químicas del agua presentes en cada región de estudio, por lo que para su entendimiento, es necesario comprender la circulación e hidrografía, así como las características químicas de cada región en particular.

8.1 Región de Baja California

Las propiedades físicas del agua frente a la región costera y más oceánica de Baja California están dadas por el ASA y el ASsE. El ASA es acarreada por la Corriente de California con un flujo hacia el ecuador y se caracteriza por baja temperatura ($<21^{\circ}\text{C}$), baja salinidad (<34) y altas concentraciones de oxígeno, mientras que el ASsE se presenta por debajo del ASA con un flujo subsuperficial hacia el polo dado por la Contracorriente de California (CCC) que presenta mayor salinidad y nutrientes, así como una baja concentración de oxígeno disuelto (Durazo y Baumgartner, 2002). Se ha reportado que en verano y otoño existe una mayor influencia del ASsE en la zona al sur de Punta Eugenia, debido a que la CCC presenta una estacionalidad que incrementa el volumen del ASsE la cual es acarreada hacia el norte en dichas épocas del año (Durazo, 2009).

En este muestreo, se observó que el ASA dominó en los primeros 200 m de las estaciones al norte de Punta Eugenia (28°N), mientras que en las estaciones 4 y 5 se detectó hasta ~ 120 m de profundidad. El ASsE se detectó por debajo del ASA en la E3 a partir de ~ 300 m de profundidad, y en la E4 y E5 a partir de ~ 160 m de profundidad, esto puede observarse en la figura 3(a) la cual está delimitada por los contornos de 34.2 y también en el diagrama T-S de la figura 14(a) la cual muestra el T-S vs Profundidad. Se ha reportado que en la región de muestreo, el ASsE suele detectarse a una profundidad aproximada de 150 m (Durazo y Baumgartner, 2002), por lo que es posible atribuir el gradiente norte – sur descrito en resultados a la entrada de esta masa de agua la cual en su recorrido se mezcla en proporciones distintas de norte a sur. Las características químicas relevantes del ASsE pueden observarse por medio de los diagramas T-S vs Ω_{arag} y oxígeno de la figura 14, en la cual se muestra que esta masa de agua se encontró completamente subsaturada con respecto a Ω_{arag} y con

concentraciones de oxígeno menores a 1 mL/L. Estas características en la región de la RBC solo se pudieron detectar en las estaciones al sur de Punta Eugenia (al sur de 28°N).

Específicamente en la región del sur de Punta Eugenia, se observó un incremento en temperatura, mayor salinidad, altos nitratos, pCO_2 y CID, así como las bajas concentraciones de oxígeno disuelto y del Ω_{arag} previamente señalados, los cuales se pueden observar en los transectos norte – sur por las elevaciones recurrentes de los contornos hacia el sur en las variables medidas (Figs. 3 – 6). Particularmente, la profundidad de subsaturación de aragonita se detectó a ~180 m en las estaciones al norte de Punta Eugenia, mientras que en las estaciones del sur se encontró a ~125 m de profundidad (Fig. 6a). Cabe señalar que este gradiente fue observado en un muestreo realizado un año antes en junio del 2007 por Feely *et al.* (2008). En dicho trabajo se encontró que para esa época del año, la profundidad de subsaturación de aragonita en la región oceánica frente a la península de Baja California se encontraba ~200 m al norte de Punta Eugenia y que alcanzó ~140 m de profundidad en la región oceánica a la altura de San Gregorio, BCS.

Adicionalmente, como consecuencia de la elevación de la nutriclina hacia el sur por la entrada de ASsE, en la estación más sureña de la RBC (E5), el máximo subsuperficial de clorofila de la RBC se encontró más somero en comparación con las estaciones del norte (Fig. 7). Sin embargo, en la superficie no se observó ninguna variación norte – sur en ninguna de las variables. Por ejemplo, el Ω_{arag} superficial osciló entre 2.5 y 2.6 en todas las estaciones, siendo consistente con los valores calculados por Feely *et al.* (2009) e igualmente respecto a los reportados en 2007 por Feely *et al.* (2008).

No obstante, dadas las características de subsaturación del ASsE, la variación temporal en la profundidad de esta masa de agua al verse combinada con otros procesos, tales como surgencias que acarreen ASsE hacia la zona eufótica, podrían cambiar eventualmente las características químicas de la superficie. Las consecuencias que esto pudiera tener sobre los ecosistemas se discutirán más adelante, utilizando la información generada de las estaciones más costeras y en donde estos procesos se hacen más evidentes.

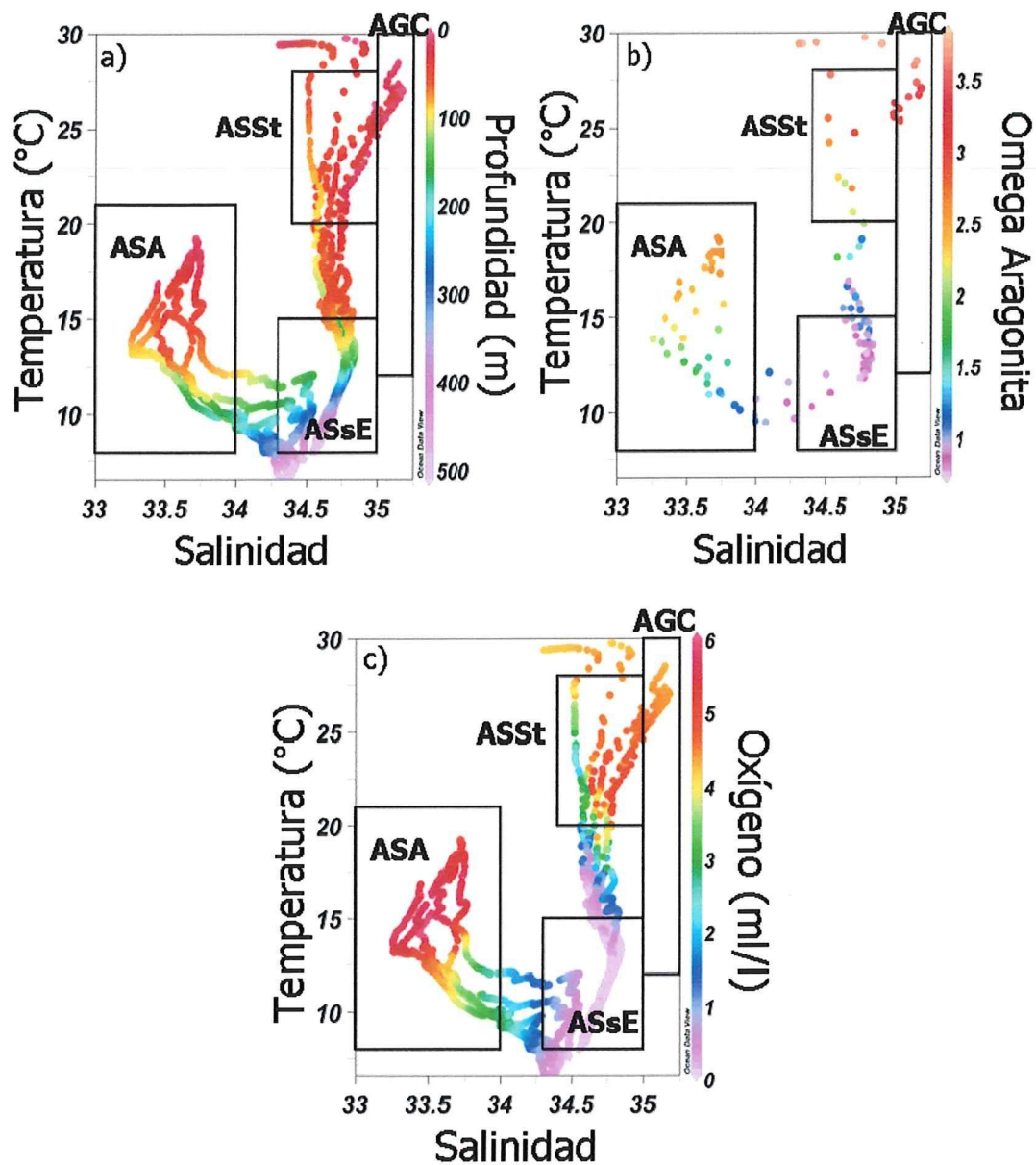


Figura 14. Diagramas T-S vs a) profundidad, b) valor de Ω_{arag} y c) concentración de oxígeno disuelto. Se indica también las masas de agua detectadas en este muestreo. La profundidad a la que se detectó el ASsE fue mayor en la RBC que en la RS, encontrándose subsaturada con respecto a aragonita y con concentraciones de oxígeno menores a 1 mL/L.

8.2 Región subtropical

La presencia de agua de origen ecuatorial en el PSM da como consecuencia la clara separación por temperatura y salinidad de las estaciones de la RS de las de la RBC observadas en la figura 2. Las masas de agua detectadas en la RS fueron: ASSt, AGC y ASsE, mismas que han sido reportadas para la misma estación del año por Lavín *et al.* (2009).

Por debajo de las masas de agua superficiales (ASSt y AGC) a una profundidad aproximadamente >50 m, se observó la presencia de una termoclina somera y fuerte (dT/dz alto) que coincidió con la presencia de la haloclina y la oxiclina. Este es un rasgo característico de los océanos tropicales y que se hace más evidente en la RS (Fielder y Talley, 2006). También se ha reportado que la nutriclina coincide con la profundidad a la que se encuentra la termoclina (Pennintong, *et al.* 2006), la cual igualmente es una característica que fue observada en este muestreo (Fig. 8b y 9b). Un rasgo que es importante resaltar es que, a diferencia de la RBC, en la RS las isolíneas tanto de la termoclina, como de la haloclina y oxiclina se encontraron prácticamente horizontales, con excepción de la E8 y de la región cercana a Los Cabos (E11 y E12). En esta última región se sugiere la presencia de un evento de surgencia que se puede apreciar en las imágenes de satélite de "Ekman Upwelling" derivadas de los registros de viento para la fechas de muestreo (<http://las.pfeg.noaa.gov/oceanWatch/oceanwatch.php>). En la E8 se observó que la termoclina, y en general los contornos de todas las variables (medidas independientemente), mostraron una depresión a pesar de su cercanía con la costa (~ 40 km) (Fig. 8 – 11). Una posible explicación a esta estructura, es que dicha estación fue muestreada dos días después del paso de la tormenta tropical Douglas, la cual trajo vientos de ~ 35 nudos que provocaron una acumulación de agua en el lugar de muestreo de dicha estación. En la figura 15 se presenta la altura superficial del océano que muestra la acumulación de agua en la región costera (E8) donde se detectó la depresión de los contornos. Lo anterior provocó que la termoclina, oxiclina, nutriclina y profundidad de subsaturación de aragonita, así como los contornos de las otras variables se hicieran más profundos. Otra posible explicación es que la RS es conocida por la presencia recurrente de giros ciclónicos y anticiclónicos los cuales cambian la estructura de la columna de agua modificando la posición de la termoclina (Willett *et al.*,

2006; Lavín *et al.*, 2006), por lo que en este caso lo observado en la E8 pudiera ser explicado por la presencia de un giro costero anticiclónico. A su vez, en dicha estación se observó una disminución relativa en la salinidad, posiblemente debida a la influencia de la Corriente Mexicana descrita por Lavín *et al.*, (2006), la cual indican los autores se presenta en verano y se detecta hasta la altura de la costa de cabo corrientes, llevando agua de transición con influencia del AST hacia la zona de estudio. En este muestreo, fue posible observar esta corriente a través de la imagen de satélite representada en la figura 16, la cual muestra las corrientes geostróficas para la fecha en que se realizó la colecta de muestras en esas estaciones.

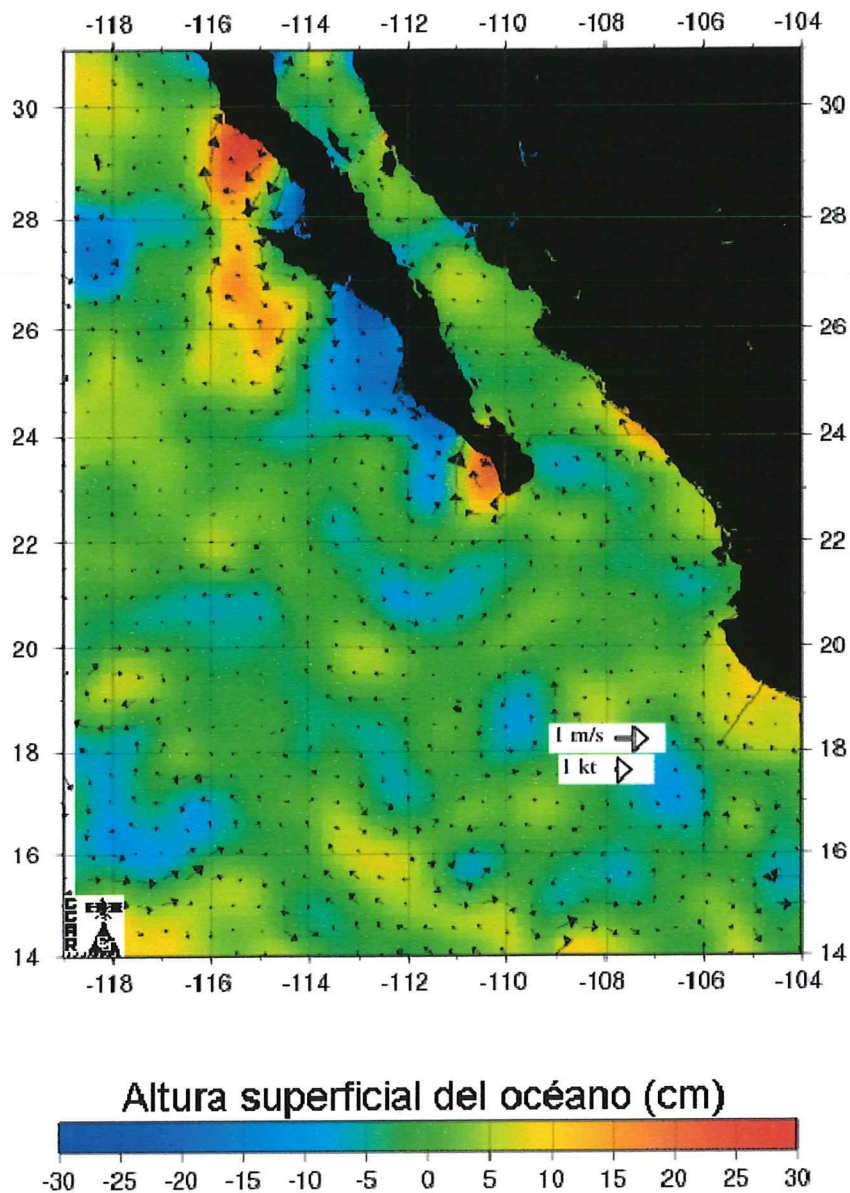


Figura 15. Mapa de altimetría de la región del muestreo. En la región de muestreo de la E8 se observó acumulación de agua (tomado de <http://las.pfeg.noaa.gov/oceanWatch/oceanwatch.php>).

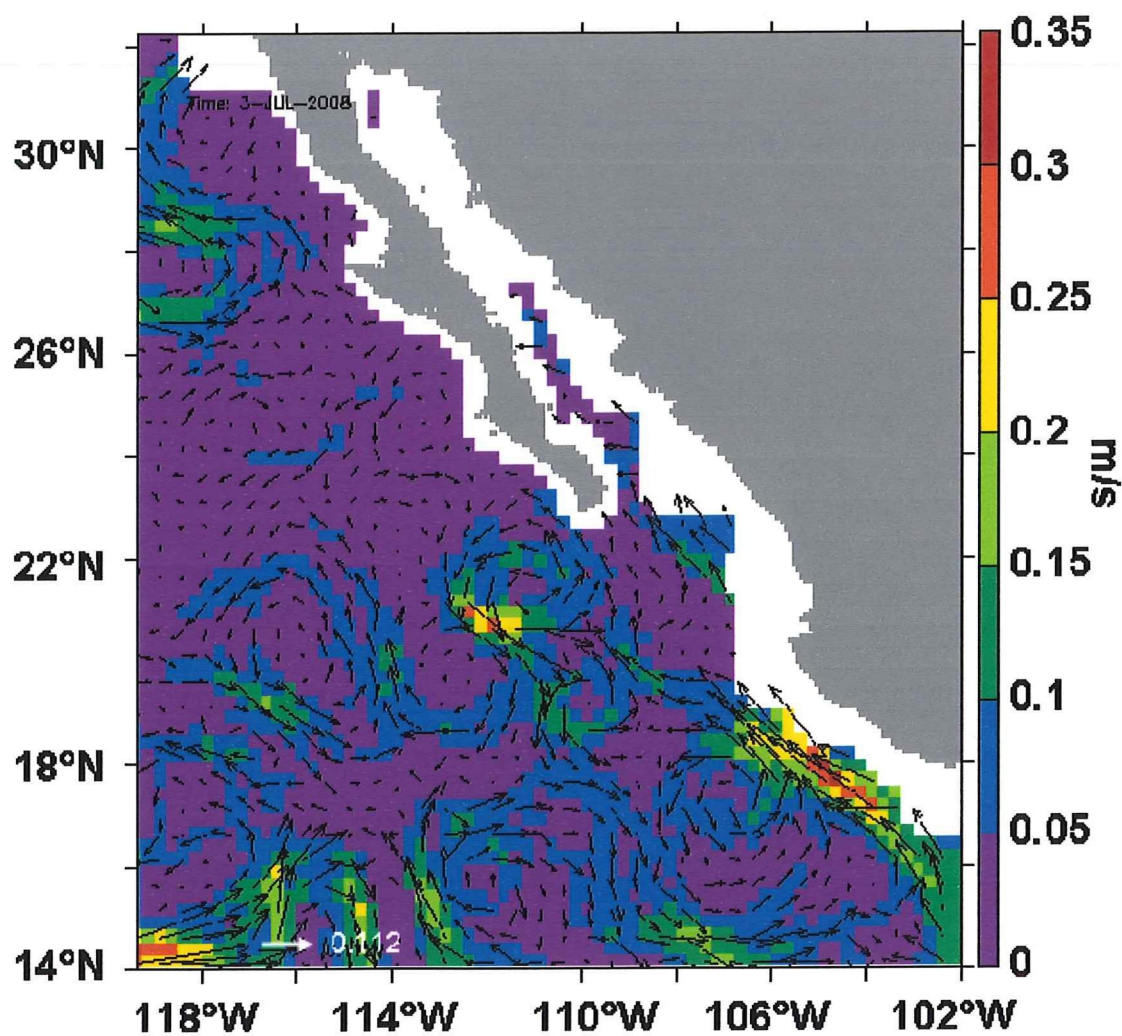


Figura 16. Mapa de corrientes geostróficas para el día 3 de julio de 2008, 1 día después del paso de la tormenta tropical Douglas por las costas de la RS (Tomado de <http://las.pfeg.noaa.gov/oceanWatch/oceanwatch.php>).

8.2.1. Relación entre Ω_{arag} y ASsE en la RS

Justo debajo de la termoclina, a una profundidad aproximada de 85 m se detectó el ASsE. A esta misma profundidad se detectó la isolínea de subsaturación de aragonita y se observó que la concentración de oxígeno alcanzó valores menores a 1 mL/L. Por lo que al igual que en la RBC, se pudo establecer una estrecha relación entre el ASsE, concentraciones de oxígeno menores a 1 mL/L y de $\Omega_{\text{arag}} < 1$ (Fig. 14). Distintos estudios han demostrado que si el océano no hubiera absorbido una parte del CO_2 antropogénico liberado a partir de la revolución industrial, la profundidad de subsaturación de aragonita se encontraría más profunda (Feely *et al.* 2004; Feely *et al.* 2008), por lo que probablemente no coincidiría con el ASsE. Del mismo modo, si los niveles de CO_2 que absorbe el océano continúan incrementándose, la profundidad de subsaturación de aragonita será más somera que la profundidad a la que se detecta el ASsE. En el presente, la relación entre ASsE y agua subsaturada resulta conveniente dado que el detectar esta masa de agua puede indicar de manera indirecta que se trata de agua subsaturada con respecto a aragonita. Estudios de la oceanografía física del PSM demuestran que el volumen y la profundidad a la que se detecta el ASsE varían estacionalmente (Godínez, *et al.* En preparación). Los autores muestran que en las cercanías a la costa, dicha masa de agua llega a detectarse a ~40 m de profundidad en los meses de invierno, mientras que en verano se detecta a ~80 m. A su vez, las surgencias en esta región son más fuertes en la época de invierno y primavera y menos fuertes o no presentes en verano y otoño (Pennintong, *et al.* 2006). Esta combinación de surgencias y variación estacional del ASsE pudiera provocar que agua subsaturada con respecto a aragonita llegara a profundidades aún más someras que las que se detectan en este trabajo.

Las consecuencias de la exposición intermitente de los organismos calcificadores, tales como los corales o el plancton calcáreo, al agua subsaturada con respecto a aragonita han sido pobremente estudiadas. Sin embargo, los pocos estudios realizados, han mostrado que existe una fuerte dependencia de la calcificación de los organismos con el estado de saturación del CaCO_3 en el agua (Kleypas *et al.*, 2006). En lo referente a corales, se han realizado trabajos que demuestran que con un decremento del estado de saturación de aragonita, incluso sin llegar al valor de subsaturación, se detectan

efectos en la tasa de calcificación, lo que resulta en esqueletos calcáreos más débiles y susceptibles a erosión (Kleypas *et al.*, 1999; Kleypas *et al.*, 2006; Manzello *et al.*, 2008). Incluso en aquellos organismos adaptados a altos niveles de CID como los del Pacífico Oriental Tropical (Manzello *et al.* 2008).

8.2.3. Comparación de datos históricos (WOCE) y este trabajo

En abril de 1994 se realizó el WOCE, durante el cual se realizaron mediciones del sistema del carbono en gran parte de los océanos del mundo. Particularmente, en la región oceánica al sur de Los Cabos se llevó a cabo el transecto P18 sobre el meridiano 110°W (Fig. 17a). En dicho muestreo, se observó que la profundidad de subsaturación de aragonita se encontraba por debajo de 100 m de profundidad (Fig. 17b), mientras que en el presente trabajo la profundidad de subsaturación se encontró más somera (<80 m de profundidad). Sin embargo, es importante aclarar que el transecto P18 y este trabajo fueron realizados en diferentes estaciones del año (abril y junio respectivamente), por lo que es difícil establecer que el hecho de que la profundidad de subsaturación de aragonita sea más somera en este muestreo sea resultado del incremento en la absorción de CO₂ por el océano, cuando previamente se señaló la variación estacional de ASsE. Otro rasgo diferente a considerar, es que las mediciones realizadas en este trabajo se encuentran más cercanas a la costa, mientras que los datos generados del WOCE son más oceánicos, y alejados de estar expuestos a diferentes tipos de fenómenos como surgencias o corrientes costeras como los datos de esta tesis. Es por ello que este trabajo puede servir de línea base para futuras investigaciones cercanas a la costa de la RS.

Una comparación “válida” adicional entre ambos muestreos se relaciona con el rango de valores superficiales de Ω_{arag} , el cual fluctuó entre 3.3 a 3.8, y que fue consistente no solo con los valores encontrados en el WOCE en 1994, sino que también con los calculados para ese mismo año por Feely *et al.* (2009). Esto indica que los valores superficiales de Ω_{arag} no han disminuido a pesar del incremento de CO₂ atmosférico observado desde 1994 al presente.

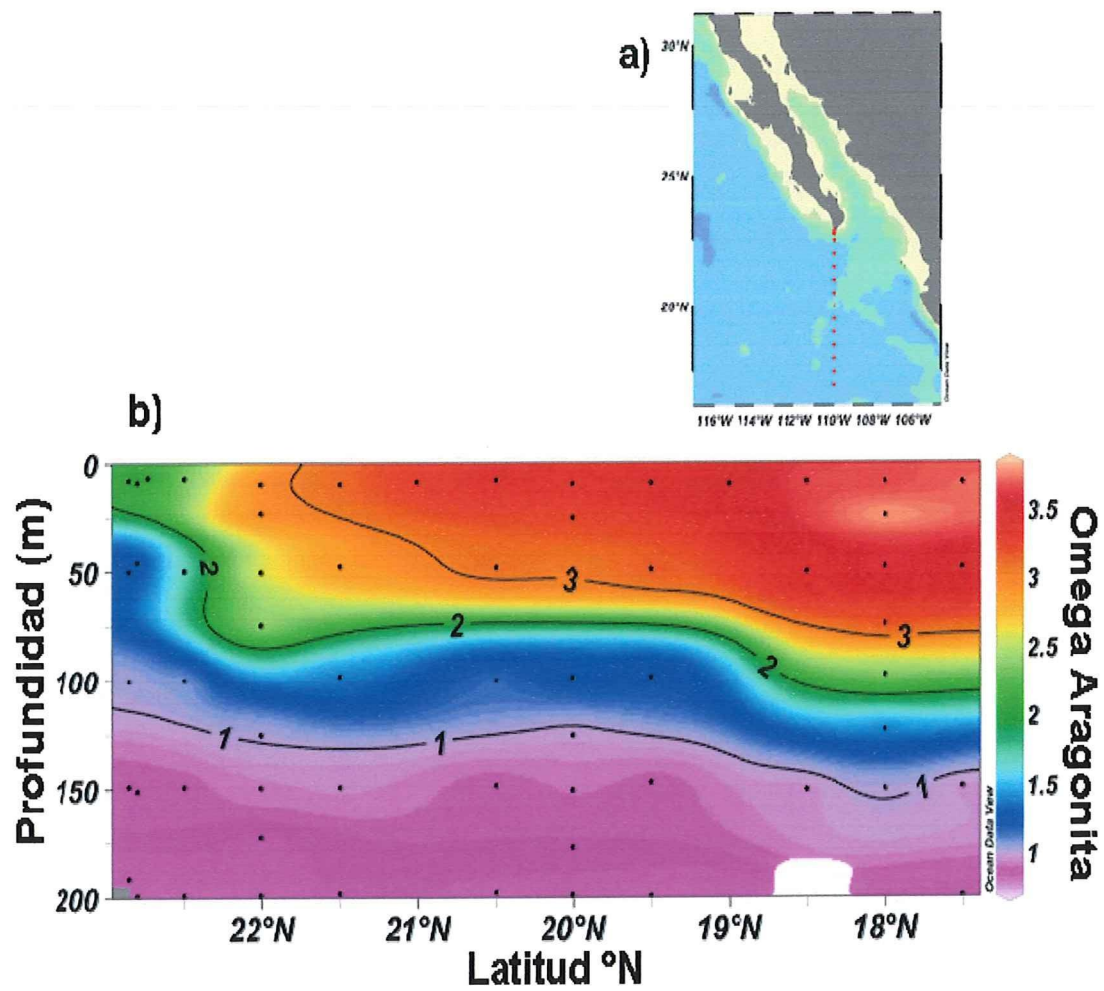


Figura 17. a) Mapa de las estaciones del muestreo del WOCE realizado en 1994, b) sección transversal de Ω_{arag} .

8.2.4. *Máximo Profundo de Clorofila*

En la E6, E7 y E8 se detectó un máximo profundo de clorofila (MPC) mediante mediciones directas y adicionalmente mediante mediciones de fluorescencia que fueron transformadas a unidades de clorofila (Sensor instalado en la Roseta). El MPC, formado por la cianobacteria *Prochlorococcus* (Goericke *et al.* 2000; Barbeau y Hopkinson, 2007), se localizó por debajo de la oxiclina y nutriclina entre 100 y 150 m de profundidad (Fig. 12). Estos resultados son consistentes con lo reportado en otros trabajos realizados en el Pacífico Subtropical (Barbeau y Hopkinson, 2007). En este trabajo se observó que en los MPC de la RS, se midió un pH, una concentración de CID, oxígeno y cantidad de luz muy similar en las tres estaciones, a pesar de encontrarse en diferentes profundidades. Se conoce muy poco acerca de las condiciones en las cuales esta cianobacteria encuentra el óptimo de crecimiento, por lo que se considera y espera que esta información adicional contribuya en un mejor conocimiento de las condiciones *in situ* en las que se desarrolla esta cianobacteria. Por lo que se sugiere considerar las condiciones ambientales *in situ* observadas como un inicio y que se resumen en la tabla I.

En el contexto del ciclo del carbono, se ha reportado que globalmente las cianobacterias como *Prochlorococcus* contribuyen hasta en un 50% en la fijación del carbono en los sistemas marinos (Fei – Xue, 2007), por lo que es de interés conocer el efecto que un incremento en la concentración de CID por efecto antropogénico pudiera tener sobre *Prochlorococcus*. Fei – Xue (2007) realizó un estudio sobre el tema que sugiere que un incremento combinado de la temperatura y concentración de CID actual pudiera no alterar el crecimiento y fotosíntesis de *Prochlorococcus*, por lo que la fisiología de esta cianobacteria no se vería afectada con una disminución del valor de saturación de aragonita, contrario al efecto negativo que tendría en arrecifes coralinos mencionado anteriormente. Esto tiene sentido al observar simplemente las condiciones mostradas de CID, pH y Ω_{arag} en la Tabla I que claramente demuestran que este organismo vive en condiciones de pH bajo aparentemente sin problemas.

8.3. Características hidrológicas en la profundidad de subsaturación de Ω_{arag}

En la tabla III se muestran las características químicas e hidrográficas en la profundidad de subsaturación de la aragonita, donde es posible observar como difieren entre las dos regiones del área de estudio.

En la RBC no fue posible asociar al valor de $\Omega_{\text{arag}} = 1$ con alguna isopicna en particular, sino que este valor se encontró dentro del rango de valores de sigma - t de ~27.2 al norte de la RBC y hasta 26.6 al sur de la región. Esto difiere con lo encontrado por Feely *et al.* (2008) en un transecto perpendicular a la costa frente a Oregon, donde se observó que la isolínea de subsaturación de aragonita siguió a la isopicna de 26.2. A pesar de esto, las características químicas encontradas en 2007 a esa profundidad (CID = 2200 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, pH = 7.7 y $\text{pCO}_2 = 800 \mu\text{atm}$) fueron similares a las encontradas en este trabajo en la RBC. Las diferencias en densidad podrían explicarse si se considera que la temperatura se incrementa en el recorrido del agua hacia el sur cambiando la densidad, lo que explica la dificultad por relacionar una isopicna con la profundidad Ω_{arag} de saturación.

En la RS únicamente en las estaciones cercanas a los cabos se asoció el contorno de $\Omega_{\text{arag}} = 1$ con la isopicna de 26.4. A esta profundidad, el valor de pCO_2 fue mayor en la RS que en la RBC mientras que la concentración de oxígeno fue menor. A su vez, el valor de CID fue 50 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ mayor en la RS que en la RBC, por lo que también se observó una disminución en el valor de pH *in situ* de 0.1 unidades. Esto es debido a que la salinidad es mayor en la RS, lo que incrementa la concentración de CID. Por lo que, si se quita el efecto de la salinidad en el cálculo del pH *in situ* normalizando con un mismo valor para las dos regiones, el valor de pH *in situ* resulta muy similar.

Tabla III. Características químicas e hidrológicas a la profundidad de subsaturación en las dos regiones del área de estudio.

Región	Prof. Subsaturación	$\sigma - t$ (kg/m ³)	CID (μmolkg^{-1})	pCO ₂ (μatm)	pH <i>in situ</i>	Oxígeno (mL/L)
RBC	>150m	27.2 – 26.6	2200	~850	7.7	2.5
RS	<80m	26.2 – 26.4	2250	~1200	7.6	< 1

8.4. Química de las masas de agua detectadas

Considerando las características de T – S de cada masa de agua, se estimaron los valores promedio de las variables del sistema del CO₂ (Tabla II), esto con la finalidad de que, combinando las variables físicas utilizadas para la clasificación de las masas de agua, con variables químicas se facilite la identificación de estos cuerpos de agua, ya que algunas veces masas de agua con las mismas características reciben diferentes nombres dependiendo de la región donde se localicen. Por ejemplo, según la clasificación de Durazo y Baumgartner (2002) el ASsE presenta características de temperatura y salinidad muy parecidas al Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) de la clasificación de Torres – Orozco (1993). Al comparar los valores estimados para cada masa de agua con los encontrados en el muestreo en las costas de la península de Baja California en 2007 (Feely, *et al.* 2008), se observó que los valores promedio aritmético de cada variable cayeron dentro del rango estimado para el ASA y ASsE mostrado en la tabla II, incluyendo el valor de Ω_{arag} menor a 1. Lo anterior corrobora la calidad de los datos presentados y confirma que los valores estimados para cada masa de agua pudieran utilizarse para su futura identificación en esta zona de estudio.

9. CONCLUSIONES

1. En la RBC la profundidad de subsaturación de aragonita se encontró por debajo de 150m, similar a lo reportado por Feely, *et al.* (2008) en 2007 para la misma región, mientras que en la RS la profundidad de subsaturación fue más somera, detectándose < 70m. Diferencia que se atribuye a una mayor proporción de la masa de agua ASsE en la RS.

2. La profundidad a la que se detectó el ASsE coincidió con la profundidad de subsaturación de aragonita y concentraciones bajas de oxígeno < 1 mL/L, así como con altos valores nitratos y CID y bajos valores de pH. Por lo tanto, es de gran importancia la influencia del aumento o disminución de la proporción de esta masa, en las aguas superficiales y la plataforma, dado que ahí se encuentran los organismos que requieren formar estructuras carbonatadas.

3. Las masas de agua detectadas durante el verano del 2008 en la RBC fueron: ASA y ASsE, mientras que en la RS se detectó el ASSt, AGC y ASsE.

3b. Producto de las mediciones realizadas en este trabajo, a las masas de agua presentes en el verano del 2008 en el area de estudio se les asignaron los siguientes valores promedio de CID (μmolkg^{-1}) y AT (μmolkg^{-1}): El ASA presentó un valor de CID de 2053 ± 53 y AT de 2233 ± 11 . El ASSt un valor de AT de 2305 ± 16 y de CID de 2061 ± 45 . El AGC presentó promedio mayor alto de AT 2337 ± 10 y el menor de CID de 2038 ± 12 . El ASsE fue la masa de agua mas profunda y presentó un valor promedio de AT de 2302 ± 8 , además de concentraciones de CID más altas, con valores promedio de 2261 ± 13 y con los valores de pH más bajo de pH de 7.59 ± 0.03 .

4. Los cambios más notorios de Ω_{arag} respecto a datos históricos se observaron en la vertical y no en la superficie al comparar los datos de la región subtropical de este trabajo con datos históricos de hace 14 años.

10. LITERATURA CITADA

- Barbeau, K. A. y B. M. Hopkinson, 2007. Organic and redox speciation of iron in the eastern tropical North Pacific suboxic zone. *Marine Chemistry* 106: 2–17.
- Caldeira K. y M. E. Wickett, 2003. Oceanography: Anthropogenic carbon and ocean pH, *Nature* 425(6956):365.
- De la Cruz-Orozco, M. E., 2006. Contribución de la producción primaria a la variabilidad de la presión parcial de bióxido de carbono ($p\text{CO}_2$) durante otoño (2004), invierno y primavera (2005) en la región del IMECOCAL. Tesis Maestría. CICESE. Ensenada, México. 114pp.
- Dickson, A. G., J. D. Afghan and G. C. Anderson, 2003. Reference materials for oceanic CO_2 analysis: a method for the certification of total alkalinity. *Mar. Chem.* 80: 185 – 197.
- Durazo, R., A. M. Ramírez, L. E. Miranda y L. A. Soto-Mardones, 2009. Upper ocean interannual variability off Baja California, Mexico: 1997-2008. Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California: 1997-2007. Instituto Nacional de Ecología y Centro de Investigación Científica y de Educación de Ensenada. En prensa.
- Durazo, R. and T. Baumgartner, 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997-1999. *Prog.Oceanogr.* 54: 7–31.
- Fabry, V. J., B. A. Seibel, R. A. Feely and J. C. Orr, 2008. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes, *Journal of Marine Science*, 65: 414-432.
- Feely, R. A., C. L. Sabine, J. M. Hernández – Ayón, D. Ianson and B. Hales, 2008. Evidence for upwelling of corrosive “acidified” water onto the continental shelf, *Science*, 320:1490 – 92.
- Feely, R. A., C. L. Sabine, K. Lee, F. J. Millero, M. F. Lamb, D. Greeley, J. L. Bullister, R. M. Key, T.-H. Peng, A. Kozyr, T. Ono, and C. S. Wong, 2002. *In situ* calcium carbonate dissolution in the Pacific Ocean, *Global Biogeochem. Cycles*, 16(4): 1144,doi:10.1029/2002GB001866, 2002.
- Feely, R. A., C. L. Sabine, K. Lee, W. Berelson, J. Kleypas, V. J. Fabry and F. J. Millero, 2004. Impact of anthropogenic CO_2 on the CaCO_3 system in the oceans, *Science*, 305:362–66.
- Feely, R. A., C. L. Sabine, D. Greeley, R. H. Byrne, J. C. Orr, and F. Millero, 2009. Present and future changes of the carbonate system in the global oceans. *Global Change Newsletter*, 73, April 2009.

- Fei-Xue F., M. E. Warner, Y. Zhang, Y. Feng, y D. A. Hutchins, 2007. Effects of increased temperature and CO₂ on photosynthesis, growth, and elemental ratios in marine *Synechococcus* and *Prochlorococcus* (Cyanobacteria). *J. Phycol.* 43: 485–496.
- Fiedler, P. C. and L. D. Talley, 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: a review, *Prog. Oceanogr.*, 69:143 – 180.
- Godínez, V., *et al.* Tesis doctoral en preparación. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada CICESE. Ensenada, Baja California.
- Goericke, R., R. J. Olson, A. Shalapyonok, 2000. A novel niche for *Prochlorococcus* sp. in low-light suboxic environments in the Arabian Sea and the Eastern Tropical North Pacific. *Deep Sea Res. I*, 47:1183-1205. Pergamon Press.
- Guinotte J., y V. J. Fabry, 2009. The threat of acidification to ocean ecosystems. *The journal of marine education*, 25(1): 2-7.
- Johnson, K. M., J. M. Sieburth, P. J. L. Williams, and L. Brandstrom, 1987. Coulometric total carbon dioxide analysis for marine studies: automation and calibration, *Mar. Chem.*, 21:117 – 133.
- Kessler, W. S., 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: a review, *Prog. Oceanogr.* 69:181 – 217.
- Kleypas, J. A., R. A. Feely, V. J. Fabry, C. Langdon, C. L. Sabine, and L. L. Robbins, 2006. Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and Other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a workshop held 18–20 April 2005, St. Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA, and the U.S. Geological Survey, 88 pp.
- Kleypas, J. A., R. W. Buddemeier, D. Archer, J.-P. Gattuso, C. Langdon and B. N. Opdyke, 1999. Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science*, 284(5411): 118-120.
- Kleypas, J. A. and C. Langdon, 2006. Coral reefs and changing seawater chemistry, Chapter 5 in *Coral Reefs and Climate Change: Science and Management*, JT Phinney, O Hoegh-Guldberg, J Kleypas, W Skirving and A Strong (eds), AGU Monograph Series, Coastal and Estuarine Studies, Am. Geophys. Union, Washington DC, 61:73-110.
- Lavín, M. F., E. Beier, J. Gómez – Valdéz, V. M. Godínez, and J. García, 2006. On the summer poleward coastal current off SW México, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L02601, doi:10.1029/2005GL024686.

- Lavín, M. F., R. Castro, E. Beier, V. M. Godínez, A. Amador, and P. Guest, 2009. SST, thermoaline structure, and circulation in the southern Gula of California in June 2004 during the North American Monzón Experiment, *J. Geophys. Res.*, 114, CO2025, doi:10.1029/2008JC004896.
- Lewis, E. and D. W. R. Wallace, 1998. Program Developed for CO2 System Calculations. Oak Ridge National Laboratory. ORNL/CDIAC-105.
- Lynn, R. J., y J. J. Simpson, 1987. The California current system: the seasonal variability of physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 92, 12947–12966.
- Manzello, D. P., J. A. Kleypas, D. A. Budd, C. M. Eakin, P. W. Glynn, and C. Langdon, 2008. Poorly cemented coral reefs of the eastern tropical Pacific: possible insights into reef development in a high – CO₂ world. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105(30): 10450-10455.
- Mehrbach, C., C. H. Culbertson, J. E. Hawley y R. M. Pytowicz, 1973. Measurement of the apparent dissociation constants of carbonic acid in seawater at atmospheric pressure, *Limnol. Oceanogr.* 18:897 – 90.
- Orr, J. C., V. J. Fabry, O. Aumont, L. Bopp, S. C. Doney, R. A. Feely, A. Gnanadesikan, N. Gruber, A. Ishida, F. Joos, R. M. Key, K. Lindsay, E. Maier-Reimer, R. Matear, P. Monfray, A. Mouchet, R. G. Najjar, G.K. Plattner, K. B. Rodgers, C. L. Sabine, J. L. Sarmiento, R. Schlitzer, R. D. Slater, I. J. Totterdell, M. F. Weirig, Y. Yamanaka and A. Yool, 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms, *Nature*, 437: 681-686.
- Pennington, J. T., K. L. Mahoney, V. S. Kuwahara, D. D. Kolber, R. Calienes and F. P. Chavez, 2006. Primary production in the eastern tropical Pacific: a review, *Prog. Oceanogr.*, 69: 285 – 317.
- Prentice *et al.*, in Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, J. Houghton *et al.*, Eds. (Cambridge Univ. Press, New York, pp. 183–238.
- Sabine C. L., R. A. Feely, N. Gruber, R. M. Key, K. Lee, J. L. Bullister, R. Wanninkhof, C. S. Wong, D. W. R. Wallace, B. Tilbrook, F. J. Millero, T.-H. Peng, A. Kozyr, T. Ono and A. F. Rios, 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂, *Science*, 305: 367-71.
- Torres – Orozco, E., 1993. Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de maestría. CICESE, Ensenada, México. 80pp.
- Willett, C. S., R. R. Leben and M. F. Lavín, 2006. Eddies and tropical instability waves in the eastern tropical Pacific: a review, *Prog. Oceanogr.*, 69:218 – 238.