



# **Universidad Autónoma de Baja California**

## **Facultad de Ciencias Marinas**

**“Distribución vertical de hierro disuelto y su relación con la biomasa fitoplanctónica en la región central del Golfo de California”**

**TESIS**

**Para obtener el título de:**

**OCEANÓLOGO**

**Presenta:**

**Selene Estefanía Andrade Hernández**

Ensenada, Baja California.

Abril del 2020.

## Resumen

El hierro (Fe) es un elemento bioactivo y un micronutriente limitante para la producción primaria, además tiene una fuerte influencia sobre el ciclo biogeoquímico de los principales elementos como el carbono y el nitrógeno. El Golfo de California (GC) se considera uno de los mares marginales más productivos del mundo; sin embargo, durante el verano, la combinación del intenso flujo de calor y la disminución de la intensidad del viento, promueve la estratificación de la columna de agua disminuyendo el transporte vertical de nutrientes y una reducción de la productividad primaria. Bajo estas condiciones, el fitoplancton puede agotar rápidamente los nutrientes de las aguas superficiales, permitiendo que se generen condiciones de oligotrofia. El objetivo de este trabajo fue estudiar la variabilidad de corto periodo de la concentración de hierro disuelto ( $Fe_d$ ) dentro de la región central del GC y analizar si, bajo condiciones de verano, los productores primarios pueden encontrarse en condiciones de limitación por Fe. Para ello, en septiembre de 2016 se llevó a cabo un crucero oceanográfico de tres días en una estación fija en la Cuenca de Guaymas, cada día se realizaron lances repetidos de CTD hasta una profundidad de 100 m y se recolectaron muestras de agua en la zona eufótica para el análisis de  $Fe_d$ , nutrientes, clorofila a y abundancia del fitoplancton. El  $Fe_d$  se midió por espectrofotometría de absorción atómica, los nutrientes por colorimetría, la clorofila a por espectrofotometría uv-visible y la abundancia del fitoplancton mediante un microscopio invertido Zeiss Axio Vert A1. Durante los tres días de muestreo en la estación, se encontró una columna de agua muy cálida y fuertemente estratificada con características de la

masa de Agua del Golfo de California (AGC), Agua superficial Ecuatorial (ASE) y Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt). Bajo estas condiciones, el nitrógeno inorgánico ( $\text{NO}_3+\text{NO}_2$ ) y el silicato ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) presentaron perfiles del tipo nutriente, indicando que sus distribuciones verticales estuvieron controladas por la actividad biológica. Sin embargo, el hierro disuelto ( $\text{Fe}_d$ ) fue verticalmente homogéneo en los primeros dos días y del tipo nutriente en el tercer día. En general, en los primeros 50 m de la columna de agua se presentaron bajas concentraciones de  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  (<0.2 a 4.31  $\mu\text{M}$ ) así como de clorofila a (0.24 a 1.63  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), mientras que el  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  y  $\text{Fe}_d$  (2.24 a 12.70  $\mu\text{M}$  y 0.71 a 1.63 nM, respectivamente) estuvieron dentro de los valores que se han reportado previamente para esta región del GC. Los bajos niveles de  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  y clorofila a, así como la comunidad fitoplanctónica representada por dinoflagelados, sugieren que durante el periodo de muestreo prevalecieron condiciones de oligotrofia en la región central del GC. Además, las concentraciones de  $\text{Fe}_d$  medidas estuvieron por encima del requerimiento para diatomeas oceánicas y dinoflagelados, mientras que las de  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  estuvieron por debajo del requerimiento de nitrógeno inorgánico reportados para estos mismos grupos de fitoplancton. Así, además de la condición de oligotrofia, las razones Fe:N (48.15 nmol/ $\mu\text{mol}$ ) y N:Si (0.40  $\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$ ) demuestran que, bajo las condiciones hidrográficas registradas durante los primeros días de septiembre del 2016, el fitoplancton de la región central del GC se encontró limitado por N inorgánico y no por  $\text{Fe}_d$ .

**Universidad Autónoma de Baja California**

**Facultad de Ciencias Marinas**

**“Distribución vertical de Hierro y su relación con la biomasa fitoplanctónica  
en la región central del Golfo de California”**

**TESIS**

**Para obtener el título de:**

**OCEANÓLOGO**

**Aprobado por:**



---

**Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa**

**Director de tesis**



---

**M.C Eunise Vanessa Torres Delgado**

**Sinodal**



---

**Dra. Mary Carmen Ruiz de la Torre**

**Sinodal**

## **Dedicatoria**

A las dos personas más importantes de mi vida:

*A mi hermana, gracias por siempre estar conmigo y apoyarme en todo momento.*

*A mi abuelita, la mujer más maravillosa, buena y perfecta que he conocido.*

*Siempre estarás en mi corazón y mis recuerdos, gracias por ser una madre perfecta.*

## **Agradecimientos**

Al Dr. Francisco Delgadillo por el apoyo y tiempo invertido en este trabajo, por todos los comentarios y sugerencias que me ayudaron a enriquecer esta investigación y a mejorar académicamente. Gracias por darme la oportunidad de colaborar con ustedes.

A la MC. Vanessa Torres, por todas las atenciones y disponibilidad que siempre ha tenido conmigo para llevar a cabo este proyecto y por hacerme parte del gran equipo de trabajo donde he aprendido mucho.

A la Dra. Mary Carmen Ruiz, por tomarse el tiempo de ayudarme con este trabajo, por sus correcciones y por inspirarme a ser una mejor profesionista con su entusiasmo en la docencia.

A mis tíos porque sin tenerlo que hacer me ayudaron a llegar donde estoy ahora, gracias.

A mi hermana porque a pesar de los malos momentos que hemos pasado, siempre los hemos enfrentado juntas y siempre ha sido la mejor hermana, por siempre estar conmigo animándome y apoyándome en todo y sobre todo por cuidarme siempre.

A mi novio, por nunca dejarme sola, por apoyarme en todo, por siempre confiar en mí y por estar en los mejores y peores momentos.

A mis amigos Karely y Ricardo por tantos años de amistad compartiendo todos nuestros éxitos y fracasos. A Ilian por siempre ser la amiga más incondicional y con el corazón más puro, gracias por siempre estar ahí a pesar del tiempo y

especialmente Tuky (por ser mi confidente y apoyarme y animarme siempre), por tantos años de amistad, por aguantar mis malos ratos y por siempre estar juntos a pesar de los compromisos y distancia.

A mis nuevas amigas y colegas Diano, Isabelo, Mariana, Frido, Citlallo e Isabella, por compartir los mejores y peores momentos durante nuestra carrera, además de otras cosas como el amigo, por siempre estar apoyándonos mutuamente y siempre impulsarnos a ser mejores estudiantes, no pude encontrar mejores compañeras de clase, amigas y colegas, aunque nuestros caminos se separen siempre estarán en mi corazón, las amo.

A mis amigos y compañeros de laboratorio Mau, Richie, Dr. Armandium y Aarón, por ayudarme con el análisis de los datos y por todos los ratos amenos que me han hecho pasar en el laboratorio y en las salidas de campo.

A todas las personas que de manera directa o indirecta estuvieron involucrados en este trabajo, ya que sin ellos esto no sería posible.

Por último, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el otorgamiento de la beca para la realización de este trabajo (28712) y por el apoyo con recurso financiero y materiales del proyecto “Flujo atmosférico de metales bioactivos y su solubilidad en el Golfo de California: un escenario hacia el cambio climático”, aprobado en la convocatoria de ciencia básica y con número de referencia: CB-2011-01-166897.

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>Portada</b>	<b>I</b>
<b>Resumen</b>	<b>II</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>IV</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>V</b>
<b>Índice</b>	<b>VII</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>X</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>6</b>
<b>3. Hipótesis</b>	<b>7</b>
<b>4. Área de estudio</b>	<b>8</b>
<b>5. Metodología</b>	<b>11</b>
5.1 Diseño experimental	11
5.2 Análisis de variables físicas y biológicas	12
5.2.1 Determinación de grupos fitoplanctónicos	12
5.2.3 Determinación de clorofila a	12

5.3 Determinación de nutrientes	12
5.4 Determinación de $Fe_d$	13
5.4.1 Limpieza de material	13
5.4.2 Análisis de $Fe_d$	13
5.5 Procesamiento de datos	14
<b>6. Resultados</b>	<b>17</b>
6.1 Análisis hidrográfico	17
6.2 Variación temporal y espacial (vertical) de los nutrientes en la región central del Golfo de California durante condiciones de verano.	21
6.3 Variación temporal y espacial (vertical) de la biomasa y comunidad fitoplanctónica en la región central del Golfo de California durante condiciones de verano.	24
<b>7. Discusión</b>	<b>30</b>
7.1 Análisis hidrográfico	30
7.2 Distribución vertical y temporal de nutrientes	32
7.3 Condiciones de oligotrofia en el verano del 2016	37
7.4 Cambios en la comunidad fitoplanctónica	39
7.5 Limitación por $Fe_d$	40
<b>8. Conclusión</b>	<b>42</b>

<b>9. Referencias</b>	<b>44</b>
<b>Anexos</b>	<b>56</b>

## **Lista de figuras**

	<b>Página</b>
<b>Figura 1.</b> Perfiles verticales promedio de $Fe_d$ en el Golfo de California. Región Norteña (■), región central-sureña (○) y perfil del Pacífico Nororiental (●). Fuente: Segovia-Zavala <i>et al.</i> (2009).	<b>4</b>
<b>Figura 2.</b> Localización geográfica de la estación de muestreo (●) en la región central del Golfo de California (Cuenca de Guaymas) durante el crucero EXFINIFe.	<b>9</b>
<b>Figura 3.</b> Diagrama T-S que muestra las masas de agua presentes en los primeros 100 m de profundidad en la región central del GC durante el crucero EXFINIFe: agua superficial ecuatorial (ASE), agua del Golfo de California (AGC) y agua subsuperficial subtropical (ASsSt). Los valores de referencia de temperatura y salinidad de cada una de las masas de agua, son una modificación a TEOS-10 de los valores de estas variables reportados por Torres-Orozco (1993).	<b>19</b>
<b>Figura 4.</b> Distribución vertical y variación temporal de (a) temperatura, (b) salinidad y (c) densidad en la región central del Golfo de California durante el verano de 2016.	<b>20</b>

- Figura 5.** Perfiles verticales de la concentración de (a)  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$ , (b)  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  y (c)  $\text{Fe}_d$ , en la región central del GC durante los días 3 al 5 de septiembre del 2016. **23**
- Figura 6.** Distribución vertical de la clorofila a en la región central del GC durante los días 3 al 5 de septiembre del 2016. **26**
- Figura 7.** Distribución vertical de diatomeas (a) y dinoflagelados (b) durante los tres días de muestreo. **27**
- Figura 8.** Abundancia de los géneros más representativos por día a) día 1, b) día 2 y c) día 3. **28**
- Figura 9.** Correlación entre el parámetro de estratificación y los diferentes nutrientes. A)  $\text{Fe}_d$ , b)  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  y c)  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ . **36**

## Lista de Tablas

- |  | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| <b>Tabla I.</b> Porcentaje de abundancias por día de los grupos fitoplanctónicos encontrados durante los días de muestreo. | <b>29</b>     |
| <b>Tabla II.</b> Abundancias relativas de los géneros encontrados de dinoflagelados durante el muestreo.                   | <b>56</b>     |
| <b>Tabla III.</b> Abundancias relativas de los géneros encontrados de diatomeas durante el muestreo.                       | <b>57</b>     |

## 1. Introducción

El hierro (Fe) en la columna de agua de mar se puede encontrar en dos estados de oxidación [Fe (II) / Fe (III)], y además puede estar en forma libre y/o formando complejos con ligandos inorgánicos y orgánicos (Johnson *et al.*, 1997). En las condiciones de pH y oxígeno disuelto presentes en el agua de mar, el Fe (III) es la forma termodinámicamente más estable, ya que esta especie tiende a hidrolizarse y formar complejos insolubles de óxidos y oxihidróxidos, así como una variedad de complejos con ligandos orgánicos. El Fe (II) también puede estar presente en el agua de mar, aunque transitoriamente, como consecuencia de las reacciones fotoquímicas de óxido-reducción en las aguas superficiales o de las reacciones biológicas redox en entornos reductores (Barbeau, 2006).

El Fe en el agua de mar también se puede encontrar en dos fracciones, la disuelta y la particulada. Hierro disuelto ( $Fe_d$ ) se le denomina a la fracción que pasa por un filtro de 0.2  $\mu m$ , y consiste en la fase verdaderamente disuelta del Fe, además de pequeños coloides menores de ese tamaño (Rich y Morel, 1990), mientras que el hierro particulado ( $Fe_p$ ) lo constituye la fracción que queda atrapada en el filtro y es el resultado de la coalescencia de oxihidróxidos coloidales (Van der Merwe *et al.*, 2011). El  $Fe_d$  es la fracción que está más biodisponible (Van der Merwe *et al.*, 2011) por lo cual se agota rápidamente en las aguas superficiales debido a la captación biológica, mientras que el  $Fe_p$  es la vía principal por la cual el Fe biodisponible se pierde de la fase disuelta (Revels *et al.*, 2015).

El Fe es un elemento bioactivo y se considera un micronutriente limitante para la productividad del fitoplancton en ciertas y extensas regiones de los océanos del mundo (Barbeau, 2006). Se utiliza biológicamente como un cofactor enzimático para una variedad de procesos metabólicos incluyendo la reducción de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), fijación de nitrógeno (N), transporte de electrones en la respiración, síntesis de clorofila, entre otros. Por ello, la relación entre  $\text{Fe}_d$  y los macronutrientes como el  $\text{NO}_3^-$ , sugiere la existencia de un estrecho acoplamiento entre este elemento traza y el ciclo biológico de la materia orgánica en los océanos (Segovia-Zavala *et al.*, 2010).

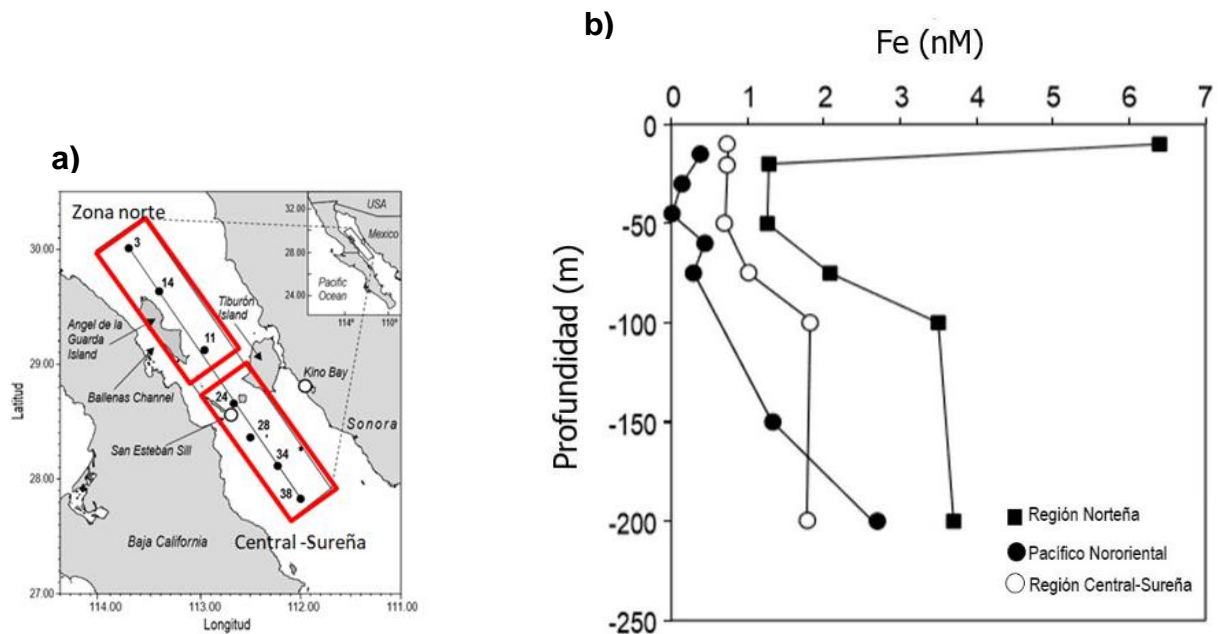
Otro aspecto interesante es que, a pesar de que el Fe es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre, se encuentra en concentraciones muy bajas en el agua de mar ( $<0.2 \text{ nmol kg}^{-1}$ ) por lo que su captación biológica provoca un rápido agotamiento de su concentración en las aguas superficiales (Martin y Gordon, 1988; Barbeau, 2006; Twining y Baines, 2013). Además, la limitación por la escasez de  $\text{Fe}_d$  en las aguas superficiales puede ocasionar efectos negativos en la fisiología de las especies del fitoplancton, tal como ocurre en las diatomeas, las cuales dependen de altas concentraciones de  $\text{Fe}_d$  para competir con organismos mucho más eficientes biológicamente, como el picofitoplancton (Sarmiento y Gruber, 2006). Un ejemplo de lo anterior es el estudio realizado por Hare *et al.* (2005) quienes, con experimentos de adición de Fe en aguas de afloramiento del Perú, encontraron que la comunidad fitoplanctónica mostró una clara sucesión de especies del fitoplancton desde cianobacterias a diatomeas, la cual fue proporcional al aumento en el suministro de Fe en los experimentos.

*Synechococcus* fue el grupo numéricamente dominante en el tratamiento con concentraciones de Fe más bajo, mientras que las diatomeas fueron el grupo dominante en tratamientos con niveles de Fe altos (Hare *et al.*, 2005).

Por otra parte, el Fe al igual que otros elementos traza, ingresan al océano por diversas rutas entre las cuales están las escorrentías de ríos, el transporte atmosférico, las ventilas hidrotermales, los flujos de agua subterránea, la difusión desde los sedimentos y hasta los aportes del espacio exterior, como los micrometeoritos (Libes, 2009). De igual forma, existen sumideros de Fe entre los que se encuentran la adsorción a las partículas (scavenging) y la incorporación en el material biogénico (Libes, 2009). La suma de estos procesos determina la concentración y la estructura de la distribución vertical del Fe en los océanos del mundo. Así, el  $Fe_d$  presenta una distribución vertical del tipo nutriente (Johnson *et al.*, 1997), lo cual indica que el Fe se consume por el fitoplancton en aguas superficiales, mientras que el incremento en aguas subsuperficiales es el resultado de la descomposición de la materia orgánica particulada que se hunde y viaja hacia el fondo del mar. Durante la ocurrencia de este proceso de descomposición de la materia orgánica particulada el  $O_2$  se consume, mientras que el  $CO_2$ , el  $NO_3^-$  y el  $Fe^{2+}$  se regeneran y se reintegran a la fase disuelta en la columna de agua (Martin y Gordon, 1988).

En el caso del Golfo de California (GC), se han reportado dos tipos de distribución vertical del  $Fe_d$  (Figura 1; Segovia-Zavala *et al.*, 2009). Los perfiles de la región sureña, tipo nutriente, con menor concentración en la superficie y un subsecuente incremento con la profundidad. Los perfiles mixtos de la región norte,

los cuales son tipo remoción y nutriente, ya que presentan concentraciones altas en superficie, luego disminuyen con la profundidad, para después incrementarse en el fondo (Segovia-Zavala *et al.*, 2011). La distribución tipo nutriente indica que el  $Fe_d$  se consume por el fitoplancton en las capas superficiales y por debajo de los 100 m se incrementa debido a la remineralización de la materia orgánica (Segovia-Zavala *et al.*, 2011). En contraste, el tipo de perfil con máximo superficial sugiere que la fuente de  $Fe$  disuelto más probable es el transporte atmosférico de polvos ricos en  $Fe$  desde los desiertos continentales y peninsulares que rodean al GC (Segovia-Zavala *et al.*, 2009; 2011).



**Figura 1.** Perfiles verticales promedio de  $Fe_d$  en el Golfo de California reportados por Segovia-Zavala *et al.* (2009) comparados con las del Pacífico nororiental de Landing y Bruland (1987). Región Norteña (■), región central-sureña (○) y perfil del Pacífico Nororiental (●).

El GC se considera uno de los mares marginales más productivos del mundo debido a los procesos físicos de mezcla que continuamente fertilizan con nutrientes la zona eufótica (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). Incluso se ha calculado que el GC tiene una capacidad de producción de carbono orgánico superior a los  $300 \text{ g C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$  (Álvarez-Borrego, 2012). Mercado-Santana *et al* (2017) encontró que la biomasa del fitoplancton como la productividad primaria muestran valores más bajos en la boca ( $49.05$  a  $55.54 \text{ mg C m}^{-3} \text{ día}^{-1}$ ) que aumentan gradualmente hacia el norte ( $245.77$  a  $363.90 \text{ mg C m}^{-3} \text{ día}^{-1}$ ). Durante el verano, bajo condiciones de temperatura muy cálidas, los vientos disminuyen en la región central del GC promoviendo la estratificación de la columna de agua (White *et al.*, 2007), lo cual resulta en una disminución en el transporte vertical de nutrientes y una reducción de la productividad primaria (Nevárez-Martínez *et al.*, 2001). Bajo estas condiciones, el fitoplancton agota rápidamente los nutrientes de las aguas superficiales (White *et al.*, 2007) pudiendo generar condiciones de oligotrofia en toda esta región. Por ello, en este trabajo se estudió la variabilidad de corto periodo de la concentración de  $\text{Fe}_d$  dentro de la región central del GC bajo condiciones de verano y se analizó su relación con los productores primarios para conocer si en un mar altamente productivo como el GC pueden encontrarse condiciones de limitación por la escasez de Fe durante la época de verano.

## 2. Objetivo

Determinar la distribución vertical del  $Fe_d$  en una estación de la región central del Golfo de California bajo condiciones de verano y su relación con la biomasa y estructura de la comunidad fitoplanctónica para relacionar si en este mar marginal altamente productivo pueden presentarse condiciones de limitación por escasez de hierro.

### 2.1 Objetivos particulares

- Determinar la concentración y la distribución vertical de los elementos nutriente  $Fe_d$ ,  $H_4SiO_4$  y  $NO_3+NO_2$  en un crucero de tres días realizado en verano en la región central del GC.
- Determinar la concentración y la distribución vertical de la biomasa fitoplanctónica utilizando como proxy la clorofila a.
- Identificar y estudiar los cambios espaciales y temporales de los grupos fitoplanctónicos más representativo registrado durante este crucero de verano.
- Establecer si los niveles de  $Fe_d$  son los suficientemente bajos para ocasionar una limitación de la producción primaria del fitoplancton registrado durante el periodo de muestreo en la región central del GC.

### **3. Hipótesis**

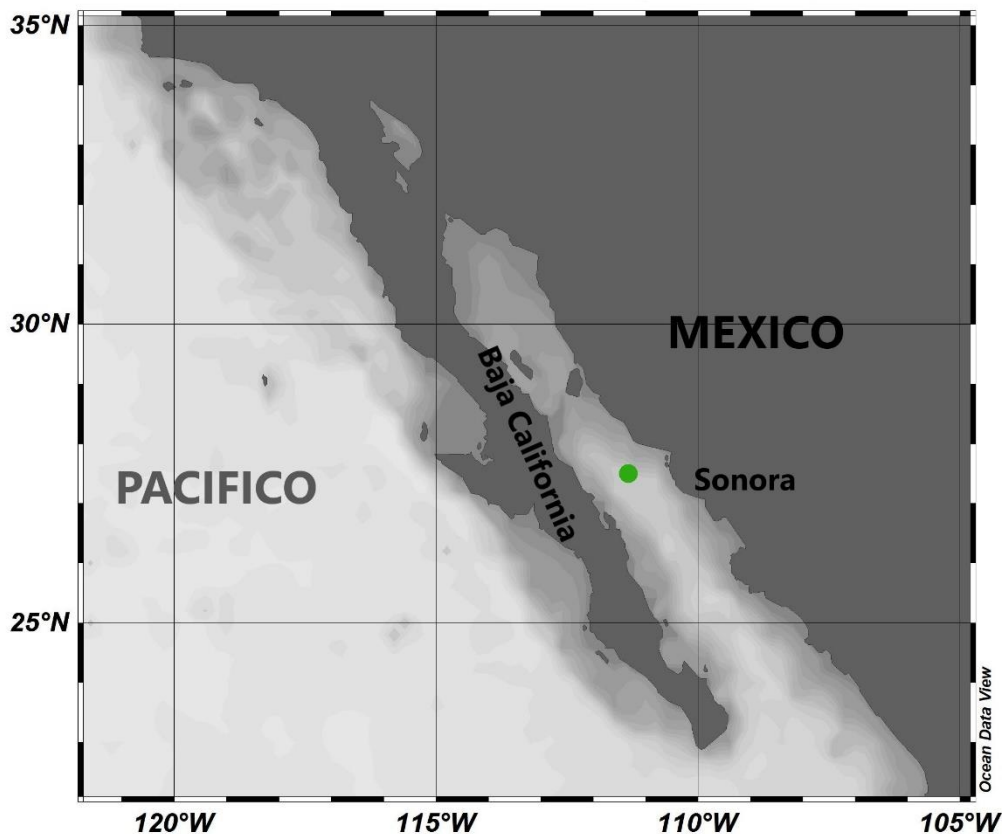
Durante el verano, la combinación de altas temperaturas y vientos débiles genera una columna de agua estratificada que tiene como consecuencia un limitado bombeo de  $Fe_d$  y nutrientes hacia la capa superficial en la región central del GC. Bajo estas circunstancias, se esperaría que se desarrollaran condiciones de oligotrofia, las cuales estarían representadas con una biomasa fitoplanctónica reducida (bajas concentraciones de clorofila a) y una comunidad fitoplanctónica dominada por células pequeñas. Por lo tanto, suponemos que el  $Fe_d$  podría estar limitando la región central del GC bajo estas condiciones y además presentará una distribución vertical tipo nutriente muy marcada, con bajas concentraciones en la superficie debida al consumo del fitoplancton.

#### 4. Área de estudio

El GC es un mar semi-cerrado de aproximadamente 1130 km de longitud y de 80 a 200 km de ancho (Lavin y Marinone, 2003). Colinda al oeste con la península de Baja California, al este con los estados de Sonora y Sinaloa, y en su extremo sur se comunica con el Océano Pacífico (figura 2). Presenta un clima que es más continental que oceánico, lo que contribuye a que la temperatura en escalas diurnas y/o estacionales presenten altos intervalos de variación (Roden, 1964). Se encuentra rodeado por desiertos lo que promueve que el transporte atmosférico de polvo para el GC sea potencialmente importante por el aporte de hierro a la columna de agua (Segovia-Zavala *et al.*, 2009). Los vientos son extremadamente variables (Roden, 1964; Bray, 1988), durante el invierno son fuertes y provienen del noroeste mientras que, en verano, son débiles y vienen desde el sureste. En condiciones de vientos débiles (verano) es cuando se tienen los mayores flujos litogénicos de partículas a la región central del GC, el cual se piensa que puede estar ligado con las precipitaciones fluviales de verano, coincidiendo con una columna de agua bien estratificada, mientras que de otoño tardío a primavera los flujos biogénicos son altos combinados con una columna de agua bien mezclada (Thunell, 1998).

En el interior del GC se encuentran diferentes masas de agua, el Agua del Golfo de California (AGC) ocupa la mayor parte de la capa superficial del golfo y se distingue por su alta salinidad y temperaturas, además coexiste con la masa de Agua Superficial Ecuatorial (ASE) (Robles y Marinone, 1987). A mayor profundidad y por debajo de estas masas de agua superficiales, se encuentran las

masas de Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt), Agua Intermedia del Pacífico (AIP) y Agua Profunda del Pacífico (APP) (Torres- Orozco, 1993). Así, el GC ha sido dividido en tres regiones hidrográficas: (1) la región norte, en la cual el AGC es la que masa predominante; (2) la región central de las islas, en donde la mezcla por mareas y las restricciones topográficas determinan la características y estructura vertical de la columna de agua y (3) región central y sur, en donde predominan las aguas del Pacífico (Bray, 1988).



**Figura 2.** Localización geográfica de la estación de muestreo (●) en la región central del GC (Cuenca de Guaymas) durante el crucero EXFINIFe.

Aunque presenta una gran heterogeneidad espacial y temporal, la productividad primaria del GC es muy alta (Mercado-Santana *et al.*, 2017), lo cual se debe a los diferentes procesos físicos que controlan los niveles y la distribución de los nutrientes. En la región de las islas las altas tasas de producción primaria se generan por el aumento en la disponibilidad de nutrientes inorgánicos asociado al proceso de bombeo por mareas (Santamaría del Ángel y Álvarez-Borrego, 1994). En cuanto a la porción central del GC, la advección del AGC desde la región de las grandes islas es un mecanismo importante por el cual los nutrientes pueden elevar sus concentraciones en la región central del GC (Torres-Valdez, 2000).

## 5. Metodología

### 5.1 Diseño experimental

Se llevó a cabo el crucero oceanográfico EXFINIFe a bordo del B/O Alpha Helix, con el objetivo de analizar la distribución vertical de  $Fe_d$  en la región central del Golfo de California. El muestreo se realizó bajo condiciones de verano, del 3 al 5 de septiembre del 2016, en una estación localizada sobre la Cuenca de Guaymas ( $27.5^\circ$  N y  $111.33^\circ$  O). En esta estación se realizaron lances de CTD SeaBird (modelo SBE 9-11 plus) con los cuales se obtuvo la profundidad, temperatura y salinidad mientras que la densidad se calculó utilizando la ecuación de estado TEOS-10. De todas estas variables se construyó una serie temporal de los primeros 100 m de la columna de agua. Además, cada día de los tres días que duro el crucero, se recolectaron muestras de agua de mar para el análisis de nutrientes ( $H_4SiO_4$ ,  $NO_3+NO_2$ ),  $Fe_d$ , clorofila a y grupos fitoplanctónicos, en la superficie (5 m), en el máximo de clorofila (50, 45 y 40), así como por debajo de la termoclina (35, 35 y 25 m). En el caso de las muestras de agua para el análisis de  $Fe_d$ , estas se recolectaron con botellas Niskin-X montadas en una roseta recubierta con pintura epóxica y, además, utilizando las técnicas de ultralimpieza. Posteriormente, el agua se filtró en el interior de un cuarto limpio, utilizando filtros de capsula Calix de polipropileno con diámetro de 74 mm y tamaño de poro de  $0.22 \mu m$ . El filtrado se recolectó en una botella de polietileno de 1L, acidificando a un  $pH \leq 2$  con HCl ultrex concentrado para su posterior análisis.

## 5.2 Determinación de variables biológicas

### 5.2.1 Determinación de grupos fitoplanctónicos

Para realizar el conteo de células fitoplanctónicas e identificación por género de los grupos más abundantes, se recolectaron 500 mL de agua de mar en botellas oscuras directamente de la botella Niskin-X y se fijaron con Lugol ácido. En el laboratorio, las abundancias del fitoplancton (células por litro) presente en las muestras se determinó por grupo (diatomeas, dinoflagelados y silicoflagelados), utilizando la guía técnica propuesta por Hasle (1978) y Utermöhl (1958). Para ello se concentró 100 mL de agua de mar con una cámara de sedimentación por 48 horas y se utilizó un microscopio invertido Zeiss Axio Vert A1. La clasificación taxonómica se realizó hasta nivel género.

### 5.2.2 Determinación de Clorofila a

Para el análisis de clorofila a se filtraron aproximadamente 1.5 L de agua a través de filtros de fibra de vidrio Whatman GF/F. La extracción de los pigmentos se realizó colocando los filtros en 10 mL de acetona al 90% por 24 horas en la oscuridad. La medición de la señal se realizó utilizando un espectrofotómetro UV-Visible Cary 50 y las concentraciones se determinaron de acuerdo con las ecuaciones de Jeffrey y Humphrey (1975) añadiendo una corrección por turbidez.

## 5.3 Determinación de nutrientes

Las muestras de nitrógeno inorgánico ( $\text{NO}_3+\text{NO}_2$ ) y ácido ortosilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) se analizaron utilizando técnicas colorimétricas (Gordon *et al.*, 1993) con un

Autoanalizador de flujo segmentado Skalar SANPlus. El límite de detección calculado fue de 0.02  $\mu\text{M}$  para el  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  y 0.04  $\mu\text{M}$  para el  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ .

#### 5.4 Determinación de $\text{Fe}_d$ .

##### 5.4.1 Limpieza de material

Todo el material de plástico utilizado para la recolecta y análisis de  $\text{Fe}_d$  fue cuidadosamente limpiado para evitar cualquier tipo de contaminación. Primero se lavó con jabón Micro-90<sup>®</sup> al 3%, el cual se prepara empleando agua destilada. Se enjuagó cuatro veces con agua destilada para eliminar el exceso de jabón, se introdujo a un contenedor con jabón Micro-90<sup>®</sup> al 3% y se mantuvo ahí por una semana. Al término de ese período, se enjuagó cuatro veces con agua destilada y tres veces con agua desionizada ( $18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ ). Posteriormente, el material se colocó en un contenedor con HCl grado reactivo al 10%, donde permaneció otra semana. Al final de ese tiempo, el material se enjuagó tres veces con abundante agua desionizada. El paso final del proceso de limpieza incluyó que el material se secase en una campana de flujo laminar dentro de un cuarto ultralimpio.

##### 5.4.2 Análisis de $\text{Fe}_d$

El análisis químico del  $\text{Fe}_d$  se llevó a cabo empleando una modificación a la metodología de extracción orgánica descrita por Bruland *et al.* (1979). Se utilizaron los quelantes orgánicos APDC y DDDC, embudos de teflón y todo el procedimiento se llevó a cabo bajo condiciones de atmosfera positiva en una campana de flujo laminar clase-100. Brevemente, se colocaron aproximadamente 250 g de la muestra de agua de mar, previamente filtrada, en un embudo de

separación; se utilizó HNO<sub>3</sub> ultrex concentrado se llevó a un pH de aproximadamente 4 - 4.5 y acetato de amonio grado ultrex como amortiguador para mantener fijo el valor de pH. Se agregó 1 mL de una solución de APDC/DDDC al 1% para quelar al Fe, para después realizar una doble extracción del complejo orgánico en cloroformo grado HPLC ultralimpio. Finalmente, se realizó la retro-extracción adicionando 100 µL de HNO<sub>3</sub> Ultrex y 3 mL de agua desionizada al cloroformo recuperado anteriormente (Félix-Bermúdez, 2018). Los extractos se analizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica con horno de grafito (Agilent Spectra AA 880Z) con corrección de fondo zeeman. La cuantificación se realizó empleando el método de adición de estándares para eliminar las interferencias de la matriz. La exactitud y precisión se evaluó haciendo uso de estándares de referencia: NASS-7 con un porcentaje de recuperación de  $104.16 \pm 4.11\%$  (n=5) y blancos de procedimiento que tuvieron como promedio  $0.34 \pm 0.14$  nM (n = 4).

#### 5.5 Procesamiento de datos:

Se realizó un análisis hidrográfico haciendo uso de los diagramas T-S para identificar las masas de agua que se encontraron presentes en la época y zona de estudio. Para este propósito, se tomó como referencia los valores de salinidad y temperatura reportados por Torres-Orozco (1993) realizando una corrección con las ecuaciones de estado TEOS-10 suponiendo un incremento en la salinidad absoluta de 0.16 y permaneciendo constante la temperatura conservativa. Además, para darnos una idea de la intensidad y la evolución de la mezcla de la columna de agua, se calculó el  $\Delta T$  haciendo una diferencia entre los valores de

temperatura en superficie con respecto a los de 100 m y el parámetro de estratificación usando las ecuaciones de Simpson y Hunter (1977):

$$\Phi = \frac{1}{h} \int_0^h (\rho - \bar{\rho}) g z dz$$

$$\text{Dónde: } \bar{\rho} = \frac{1}{h} \int_0^h \rho dz$$

Dónde  $\phi$  es la cantidad de energía requerida para mezclar la columna de agua ( $\text{J m}^{-3}$ ),  $h$  es la profundidad de la columna de agua (m),  $g$  es la aceleración debido a la gravedad ( $\text{m s}^{-2}$ ),  $z$  es la profundidad de cada punto (m),  $\rho$  es la densidad a cada profundidad de recolecta ( $\text{kg m}^{-3}$ ) y  $\bar{\rho}$  es la densidad promedio de la columna de agua ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

Para analizar los datos de la comunidad fitoplanctónica se calculó las abundancias relativas porcentuales de los grupos fitoplanctónicos, así como de los géneros por día. Se elaboraron perfiles verticales de los grupos más representativos y gráficos de barras de los géneros más abundantes de cada uno de los grupos.

Se elaboraron perfiles verticales de  $\text{Fe}_d$  en los diferentes días de muestreo para conocer como es la distribución vertical de este elemento en la región central del GC y cuáles son los cambios que se presentaron en un periodo de días. Además, para saber la relación que existe entre el  $\text{Fe}_d$  y algunos de los parámetros químicos del agua de mar, también se construyeron perfiles verticales de nutrientes, salinidad absoluta (Sa), densidad y temperatura conservativa (Tc).

Para estudiar la relación existente entre el  $Fe_d$  con la biomasa y estructura de la comunidad fitoplanctónica, se analizaron los perfiles verticales de clorofila a y de los grupos más abundantes del fitoplancton presentes durante las fechas de estudio (diatomeas y dinoflagelados), el resto de los grupos fitoplanctónicos representaban menos del 2% de la abundancia relativa.

## 6. Resultados

### 6.1 Análisis hidrográfico

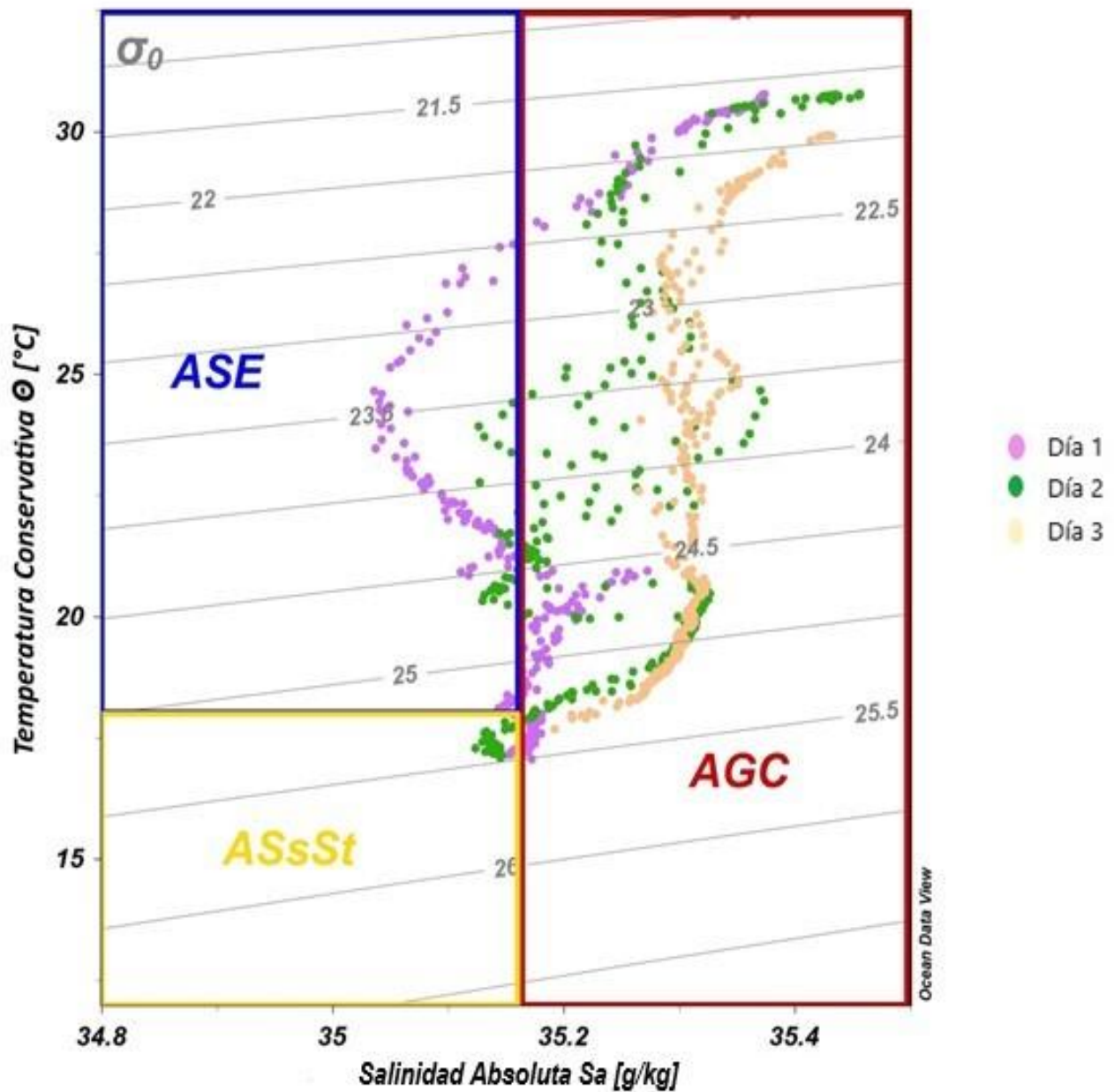
Con la intención de caracterizar el origen de las masas de agua que estuvieron presentes en nuestra área de estudio durante los días de muestreo, se construyó un diagrama T-S utilizando como base los intervalos de salinidad y temperatura descritos por Torres-Orozco (1993) y realizando una corrección con TEOS-10 (ver sección 5.5). En particular, el AGC se identificó considerando  $Sa \geq 35.16$  y  $Tc > 12^\circ\text{C}$ , el ASE por  $Sa < 35.16$  y  $Tc \geq 18.0$ , mientras que el ASsSt se caracterizó por  $Sa > 34.66$  y  $< 35.16$  con  $Tc < 18^\circ\text{C}$ , pero  $\geq 9^\circ\text{C}$ . Así, el diagrama TS de la figura 3 muestra que durante el crucero Exfinife se registró la presencia del ASE, el AGC y el ASsSt en los primeros 100 metros de la columna de agua. El ASE y ASsSt se detectaron en los dos primeros días, mientras que el AGC se presentó durante todo el muestreo y ocupó la mayor parte del volumen de la capa superficial muestreada.

En general, durante todo el crucero se presentaron condiciones de agua muy cálida y salinidades altas. En particular la  $Tc$  presentó valores muy altos en superficie ( $> 29.9^\circ\text{C}$ ) los cuales fueron disminuyendo con la profundidad hasta llegar a un valor cercano a  $17.5^\circ\text{C}$  a los 100 m (figura 4a). En los primeros 20 m de la columna de agua fue donde se presentó la mayor variabilidad, con un intervalo de  $Tc$  que van de  $27.3$  a  $30.8^\circ\text{C}$ . La isoterma de los  $30^\circ\text{C}$  solo se presentó en los primeros dos días y la de  $27.5^\circ\text{C}$  se hace más somera con el paso de los días, lo mismo ocurre con la termoclina la cual en el primer día se encontró a los 35 m de profundidad y se fue haciendo más somera alcanzando los 25 m en el tercer día.

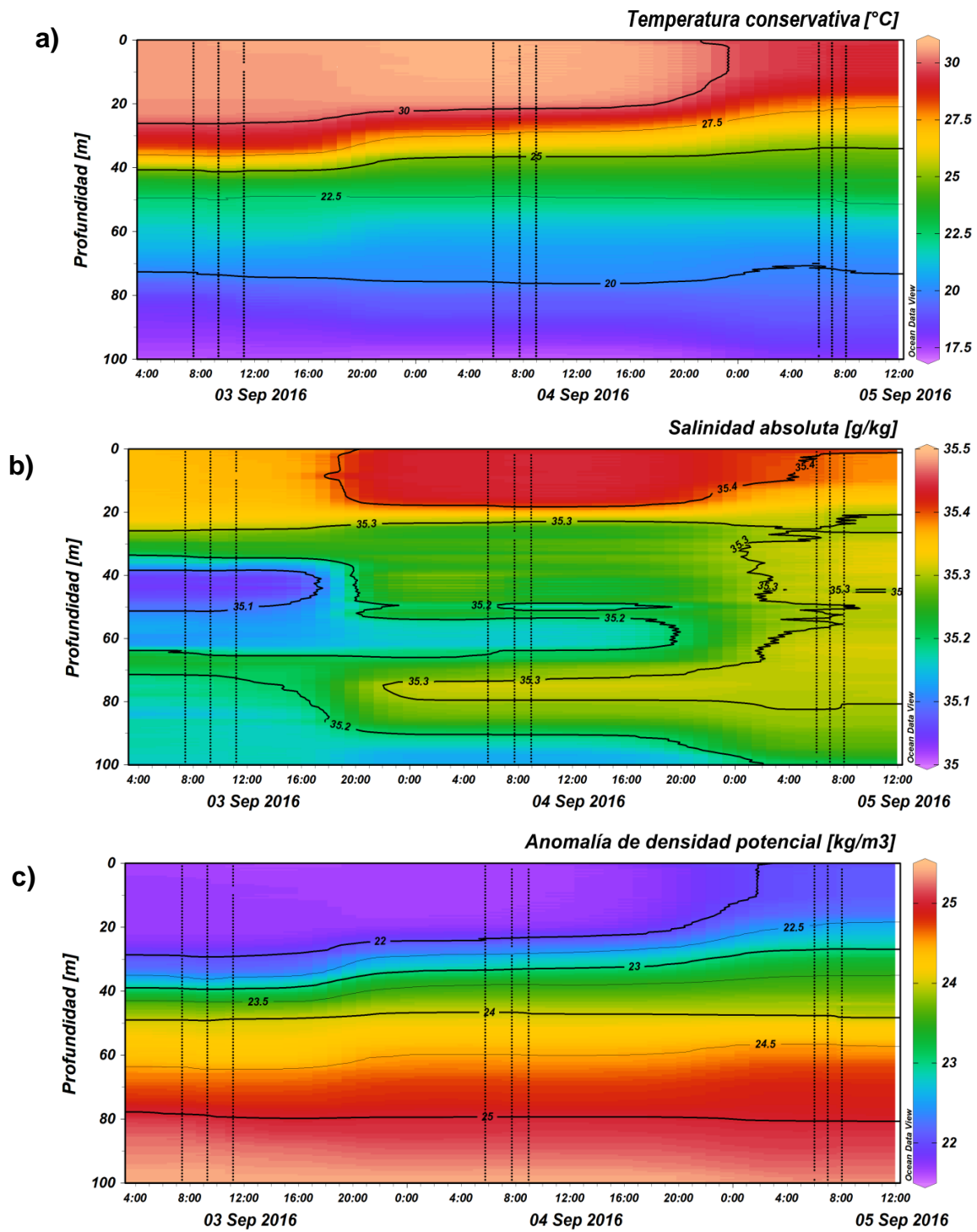
Las Sa medidas durante los tres días de muestreo presentaron un intervalo de 35.03 a 35.45 g/kg, con los valores más altos en superficie y una disminución gradual con la profundidad. En cuanto a la variación temporal de esta variable, en el primer día se detectó entre los 40 y 60 m de profundidad una lengüeta con Sa más baja de todo el muestreo (35.1 g/kg), mientras que en el día 2 se presentaron las mayores salinidades en superficie (35.4 g/kg). El tercer día la alta Sa se extendió un poco más en la vertical y se registró una Sa un poco más homogénea en la columna de agua (figura 4b).

En cuanto a la anomalía de densidad, esta variable presentó una distribución tanto temporal como espacial, similar a la de la Tc con un intervalo de valores que fue de 21.7 a 25.43 kg/m<sup>3</sup>. En particular, la isopicna de 22 kg/m<sup>3</sup> solo se presentó en los primeros dos días mientras que la de 22.5 kg/m<sup>3</sup> se hizo más somera hacia el final del tercer día del crucero (figura 4c).

En los primeros dos días se presentó una columna de agua bien estratificada ( $\Delta T = 13.26$  y  $13.43^\circ\text{C}$ , para el día 1 y 2 respectivamente) con una termoclina y picnoclina localizadas entre los 28 y 22 m. Para el tercer día de muestreo y asociado a la llegada del Huracán Newton, la columna de agua tendió a mezclarse verticalmente y, tanto la termoclina como la picnoclina, ascendieron aproximadamente hasta los 12 m de profundidad y las salinidades comienzan a ser más homogéneas en la vertical.



**Figura 3.** Diagrama T-S que muestra las masas de agua presentes en los primeros 100 m de profundidad en la región central del GC durante el crucero EXFINIFE: agua superficial ecuatorial (ASE), agua del Golfo de California (AGC) y agua subsuperficial subtropical (ASsSt). Los valores de referencia de temperatura y salinidad de cada una de las masas de agua, son una modificación a TEOS-10 de los valores de estas variables reportados por Torres-Orozco (1993).



**Figura 4.** Distribución vertical y variación temporal de (a) temperatura conservativa, (b) salinidad absoluta y (c) anomalía de densidad en la región central del GC durante el verano de 2016.

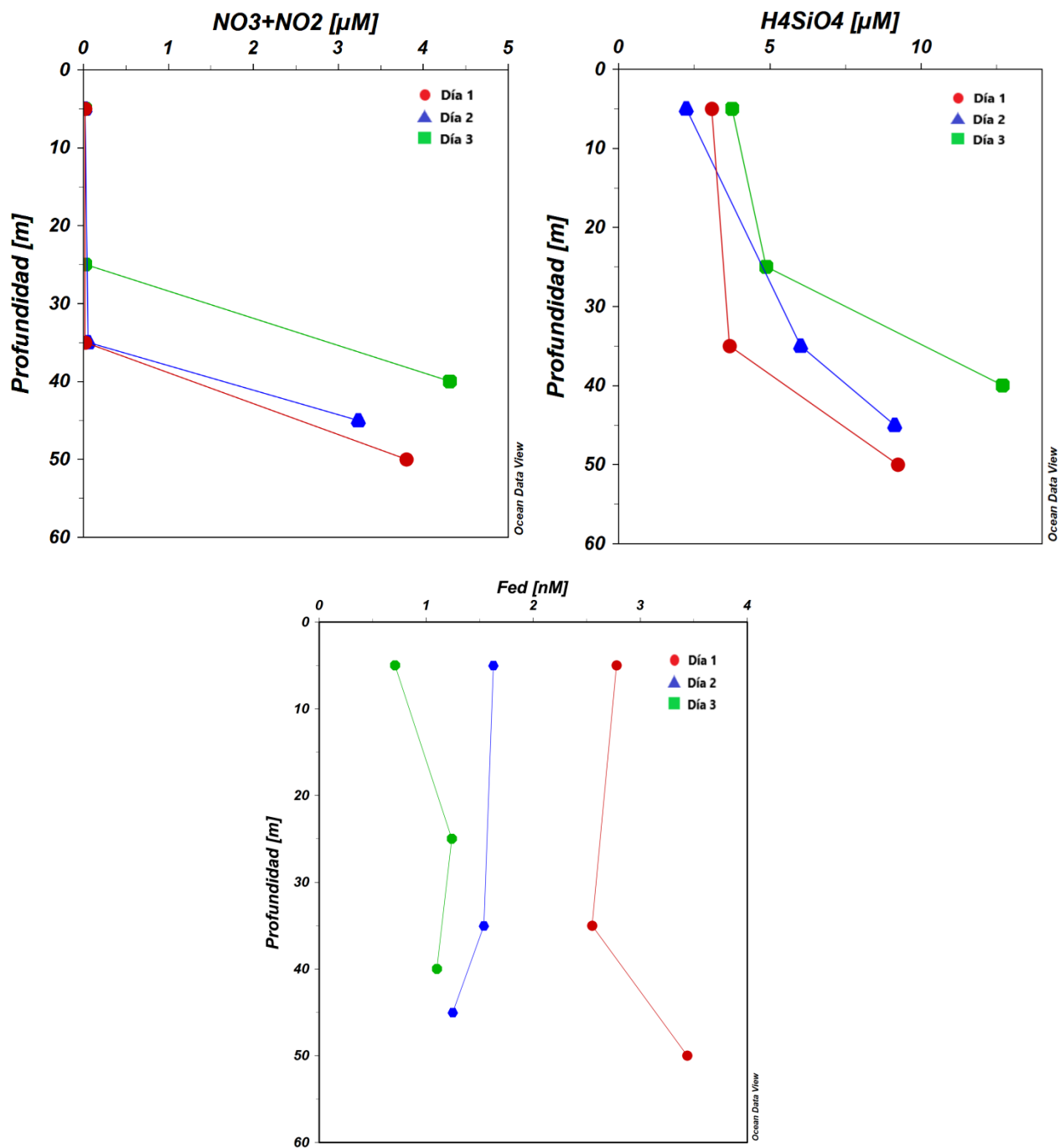
## **6.2 Variación temporal y distribución vertical de los nutrientes en la región central del Golfo de California durante condiciones de verano.**

Durante el crucero se tomaron muestras de agua para el análisis de los nutrientes  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ,  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  y  $\text{Fe}_d$ . Durante los 3 días que duró la campaña, el  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  y  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  presentaron una distribución vertical del tipo nutriente con mínimos en la superficie y un subsecuente incremento con la profundidad (figura 5a, b). En la capa superior de la columna de agua (5 m) y por debajo de la termoclina las concentraciones de  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  estuvieron por debajo del límite de detección ( $0.02 \mu\text{M}$ ), mientras que el  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  presentó concentraciones de  $2.24$  a  $3.75 \mu\text{M}$  a 5 metros de profundidad y de  $3.67$  a  $6.03 \mu\text{M}$  por debajo de la termoclina durante los tres días de la campaña. En contraste, las concentraciones de  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  ( $3.24$  a  $4.31 \mu\text{M}$ ) y  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  ( $9.14$  a  $12.70 \mu\text{M}$ ) en el máximo de clorofila fueron más elevadas con valores mayores en el día 3 en comparación al día 2 en ambos nutrientes.

En cuanto al  $\text{Fe}_d$ , este mostró un comportamiento ligeramente diferente al de los nutrientes (figura 5c), presentando concentraciones variables en tiempo y espacio, las cuales fueron de  $0.71$  a  $3.44 \text{ nM}$ . La distribución vertical  $\text{Fe}_d$  mostró un perfil homogéneo en los primeros dos días; sin embargo, bajo las condiciones de mezcla más fuertes que se presentaron en el día 3, el perfil vertical de hierro disuelto cambió a tipo nutriente. En los primeros 5 m de profundidad, las concentraciones de  $\text{Fe}_d$  variaron de  $0.71$  a  $2.78 \text{ nM}$ , por debajo de la termoclina oscilaron de  $1.24$  a  $2.55 \text{ nM}$  y en el máximo de clorofila de  $1.10$  a  $3.44 \text{ nM}$ . En general, las concentraciones de  $\text{Fe}_d$  variaron temporalmente, registrándose los

valores mayores el primer día de muestreo y los menores hacia el final del crucero en el tercer día.

En general los nutrientes presentaron concentraciones más altas en el día 3 en condiciones de mayor mezcla, con excepción del  $Fe_d$  el cual las mayores concentraciones se mostraron en el día 1.



**Figura 5.** Perfiles verticales de la concentración de (a)  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$ , (b)  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  y (c)  $\text{Fe}_d$  en la región central del GC durante el crucero Exfinife que se llevó a cabo del 3 al 5 de septiembre del 2016.

### **6.3 Variación temporal y distribución vertical de la biomasa y de la comunidad fitoplanctónica en la región central del GC durante condiciones de verano.**

La biomasa fitoplanctónica medida como clorofila a, presentó bajas concentraciones con valores que estuvieron en un intervalo de 0.32 a 0.93 mg·m<sup>-3</sup> (figura 6). También se detectó la presencia de un máximo de clorofila a, el cual se hizo más somero con el paso de los días. El primer día se registró a los 50 m de profundidad, el segundo día se presentó a los 45 m, y por último a los 40 m en el tercer día.

En cuanto a la comunidad fitoplanctónica, durante el crucero se detectó la presencia de cinco grupos característicos del fitoplancton del Golfo de California: silicoflagelados, prymnesiophyceae, cianobacterias, dinoflagelados y diatomeas. Sin embargo, dado que los silicoflagelados, prymnesiophyceae y cianobacterias representaron menos del 2% de la abundancia total, en este trabajo se dará especial énfasis a los grupos de diatomeas y dinoflagelados, los cuales representaron en promedio 49.03 y 49.58%, respectivamente. Los dinoflagelados fueron más abundantes en los días 1 y 3, mientras que las diatomeas fueron las más abundantes en el día 2 (Tabla I).

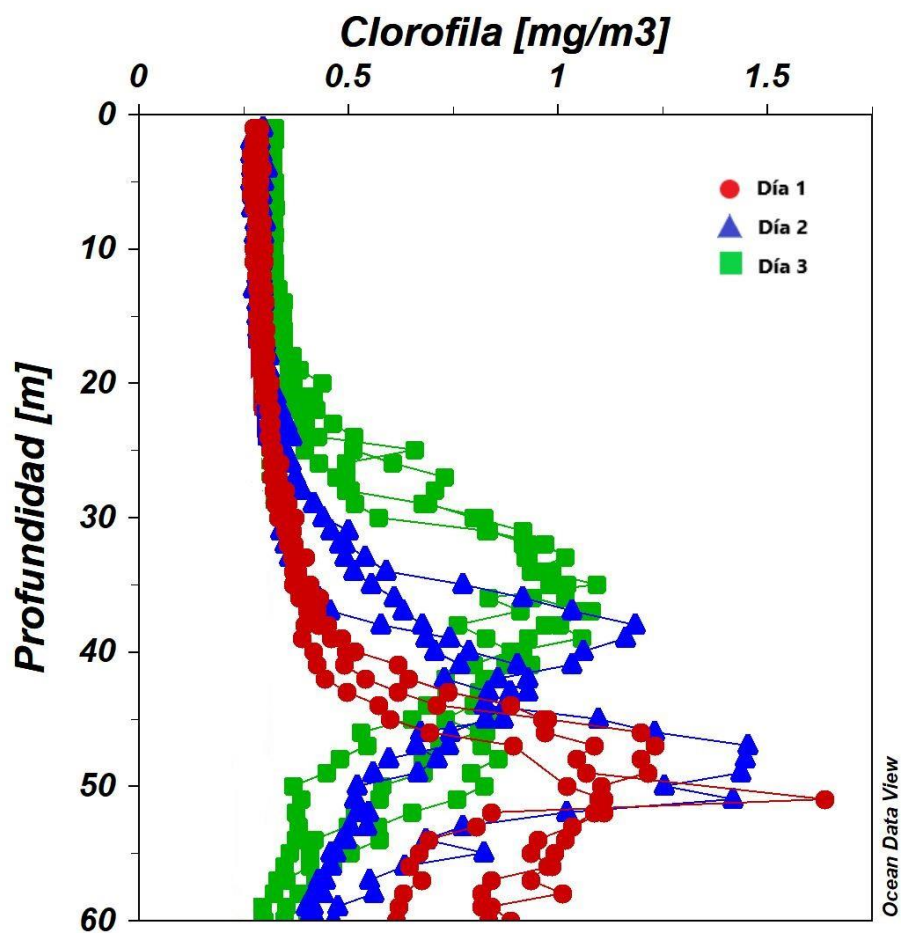
En la figura 7a se muestra la distribución vertical de las diatomeas a lo largo de los tres días del crucero. A 5 m de profundidad, las abundancias de este grupo fueron mayores en el día 1 (1,458 cel·L<sup>-1</sup>) seguidas del día 3 (1408 cel·L<sup>-1</sup>) y

menores en el día 2 (833 cel·L<sup>-1</sup>); sin embargo, por debajo de la termoclina se observó que las mayores abundancias se encontraron en el día 2 (32,224 cel·L<sup>-1</sup>) y las menores en el día 1 (2,756 cel·L<sup>-1</sup>). Por último, las mayores abundancias en el máximo de clorofila se registraron el día 2 (18,865 cel·L<sup>-1</sup>) y las menores ocurrieron el día 3 (8,255 cel·L<sup>-1</sup>).

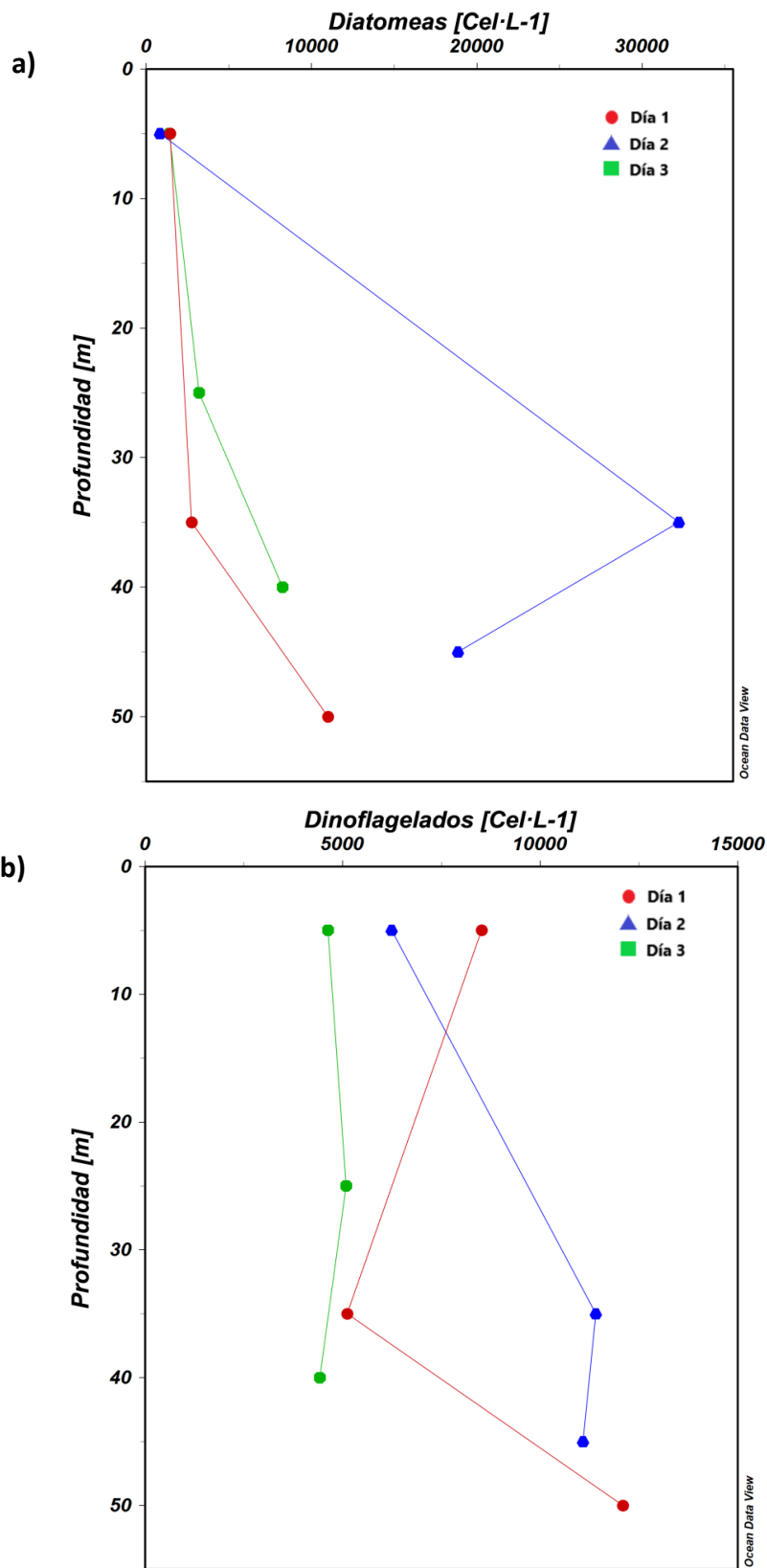
La distribución vertical de los dinoflagelados se muestra en la figura 7b. En las profundidades de 5 m y máximo de clorofila presentaron mayores abundancias en el día 1 las cuales disminuyen hacia el día 3 (4,629 a 8,519 cel·L<sup>-1</sup> para 5 m y de 4421 a 12095 cel·L<sup>-1</sup> en el máximo de clorofila). Sin embargo, por debajo de la termoclina las menores abundancias se presentaron en el día 1 (5,110 cel·L<sup>-1</sup>) y las mayores en el día 2 (11,411 cel·L<sup>-1</sup>).

Los dinoflagelados fueron el grupo dominante en cuanto a porcentaje de abundancia. A nivel género (Figura 8), estuvieron representados por el género *Gymnodinium* a lo largo de los tres días de muestreo, con porcentajes de abundancia de 79.74, 76.49 y 64.53% en los días 1, 2 y 3 respectivamente. Por su lado, las diatomeas fueron más diversas, siendo representadas por tres géneros en cada uno de los días. En el primer día los géneros representativos fueron *Chaetoceros* (27.41%), *Thalassionema* (26.39%) y *Nitzschia* (18.84%), en el segundo día fueron *Coscinodiscus* (22.29%), *Chaetoceros* (44.78%) y *Thalassionema* (48.40%), por último, en el tercer día solo se presentó un género dominante que fue *Thalassionema* (22.67%), siendo *Thalassionema* y *Gymnodinium* los géneros más persistentes durante el muestreo y siendo *Gymnodinium* el más abundante durante el paso de los días en todas las

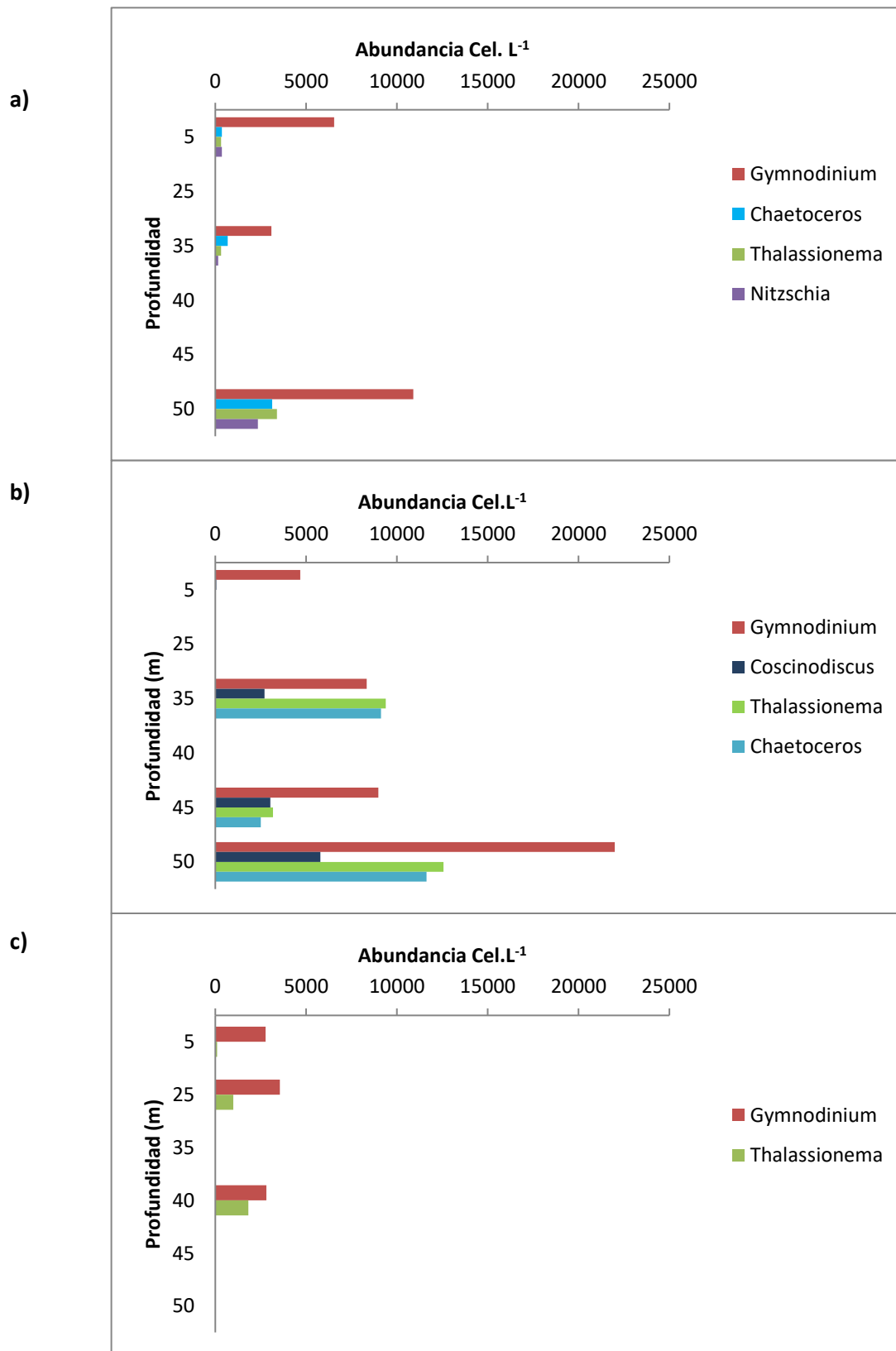
profundidades con excepción del día 2 en el máximo de clorofila donde la dominante fue *Thalassionema* (figuras 8 a,b,c).



**Figura 6.** Distribución vertical de la clorofila a en la región central del GC durante el crucero Exfinife realizado del 3 al 5 de septiembre de 2016.



**Figura 7.** Distribución vertical de diatomeas (a) y dinoflagelados (b) en la región central del Golfo de California durante el crucero Exfinife realizado del 3 al 5 de septiembre de 2016.



**Figura 8.** Abundancia de los géneros más representativos por día a) día 1, b) día 2 y c) día 3.

**Tabla I.** Porcentaje de abundancias por día de los grupos fitoplanctónicos encontrados durante los días de muestreo.

<b>Día</b>	<b>03-sep-16</b>	<b>04-sep-16</b>	<b>05-sep-16</b>
<b>Diatomeas (%)</b>	36.68	63.50	46.93
<b>Dinoflagelados (%)</b>	62.05	35.16	51.55
<b>Silicoflagelados (%)</b>	0.50	0.70	0.57
<b>Prymnesiophyceae (%)</b>	0.75	0.64	0.00
<b>Cianobacterias (%)</b>	0.01	0.00	0.95

## 7. Discusión

### 7.1 Análisis hidrográfico

De acuerdo con el análisis hidrográfico realizado, durante el verano del 2016 en la región central del GC se detectó la presencia de tres de las cinco masas de agua reportadas por Torres-Orozco (1993): AGC, ASE y ASsSt (figura 3). La presencia de estas masas de agua y su coexistencia han sido previamente reportadas por otros autores (eg. Torres-Orozco, 1993; Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín, 2007; Portela *et al.*, 2016). En el caso del AGC, es una masa de agua que se forma en regiones costeras someras del Alto golfo por procesos de evaporación y enfriamiento, y tiene la capacidad de desplazarse hasta la cuenca Wagner y sus alrededores (Bray, 1988b), se ha registrado su presencia en verano, invierno y primavera (Torres-Delgado *et al.*, 2013) presentándose en mayor proporción en verano y en menor proporción en primavera (Torres-Orozco, 1993). En cuanto al ASE, esta se encuentra confinada a la región sur del Golfo observándose hasta la Cuenca del Carmen con su mayor proporción frente a las costas de Sinaloa (Torres-Orozco, 1993), además esta masa de agua tiende a incursionar más hacia el norte en épocas de verano y otoño (Torres-Orozco, 1993; Portela *et al.*, 2016).

El AGC se presentó a las profundidades de 0 a 100 m (figura 3), sin embargo, el ASE estuvo restringida a un intervalo de profundidades que va 40 a 60 m. Autores previos han reportado profundidades de ocurrencia de estas masas de agua similares o iguales a las de este trabajo. Por ejemplo, Álvarez-Borrego y

Schwartzlose (1979) indicaron que el AGC ocupa los primeros 100 m de la columna de agua en la región de las grandes islas, mientras que Torres Valdés (2000) menciona que durante verano el AGC se mueve hacia el sur y, al mismo tiempo, ocurre la intrusión del ASE entre 0 y 100 m. El ASE presenta una baja concentración de nutrientes, en comparación con otras masas de agua (Okuda *et al.*, 1983) por lo que podría provocar condiciones de oligotrofia en el interior del GC.

La columna de agua se mantuvo estratificada en el primer y parte del segundo día; sin embargo, en el tercer día se presentó una columna de agua más mezclada. Para darnos una idea de la evolución de las condiciones de mezcla durante los tres días que duró el crucero, se calculó el parámetro de estratificación ( $\Phi$ ) de acuerdo con Simpson y Hunter, 1977 considerando la columna de agua superficial (de 0 a 100 m). El  $\Phi$  tuvo un valor de  $389.3 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$  para el primer día de muestreo y de  $303.4 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$  para el último día. Estos valores son superiores a los reportados para el Canal de Ballenas en condiciones de verano ( $\Phi = 150\text{-}223 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$ ; Torres-Delgado *et al.*, 2013) y muy similares a los estimados para la boca del golfo en la misma época del año ( $\Phi: 390 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$ ; Delgadillo-Hinojosa, 2000). La disminución en el valor de  $\Phi$  del día 1 al 3, estuvo estrechamente relacionada con la incursión al GC del huracán Newton, un fenómeno meteorológico clasificado como de categoría 1 que ingresó a la región central del golfo el día 5 de septiembre del 2016. Estudios previos han señalado que los huracanes del Pacífico Oriental tienen la capacidad de incrementar la capa de mezcla de 10 a 80 m (Zamudio *et al.*, 2002) y; además de causar cambios en la hidrografía de la

columna de agua, también pueden tener efectos ecológicamente importantes (Álvarez-Borrego, 1983).

## **7.2 Distribución vertical y variación temporal de nutrientes**

La principal forma inorgánica del N es el  $\text{NO}_3^-$ , el  $\text{NO}_2^-$  y el  $\text{NH}_3 + \text{NH}_4$  (Millero, 1996), sin embargo, para fines de este trabajo solo se tomó como nitrógeno inorgánico la suma de  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ . El nitrógeno inorgánico presentó una distribución vertical del tipo nutriente con un intervalo de concentración de debajo del límite de detección ( $<0.2 \mu\text{M}$ ) hasta  $4.31 \mu\text{M}$ . En particular, las concentraciones por debajo del límite de detección se localizaron en la capa superior de la columna de agua (5 m y por debajo de la termoclina), lo cual ya ha sido anteriormente reportado en la cuenca de Guaymas (Torres-Valdés, 2000; White *et al.*, 2007). En contraste, las concentraciones en el máximo de clorofila fueron más elevadas ( $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 = 3.24$  a  $4.31 \mu\text{M}$ ) con valores mayores en el día 3 y menores en el día 2. Las bajas concentraciones de este nutriente pueden ser debidas a que durante esta estación del año se tiene la presencia de la masa de agua oligotrófica ASE (Figura 3). Esta masa de agua se encontró en nuestra área de estudio los días 1 y 2 y se caracterizó por presentar las concentraciones más bajas de  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ .

En cuanto al ácido ortosilícico, también presentó un perfil del tipo nutriente, con concentraciones que variaron de  $3.08$  a  $12.70 \mu\text{M}$ . Los valores menores se registraron a 5 m de profundidad ( $2.24$  a  $3.75 \mu\text{M}$ ) y los mayores en el máximo de clorofila ( $9.14$  a  $12.70 \mu\text{M}$ ). Otros autores han reportado concentraciones de este nutriente para el golfo central y sur, las cuales están dentro del intervalo que aquí

reportamos. Por ejemplo, Lara-Lara y Valdez- Holguín (1988) reportaron valores promedio de 11.35  $\mu\text{M}$  de silicatos para la región central bajo condiciones de primavera. Así, las concentraciones de ácido ortosilícico medidas durante el crucero exfinife no son distintas de las registradas previamente por otros investigadores en el GC.

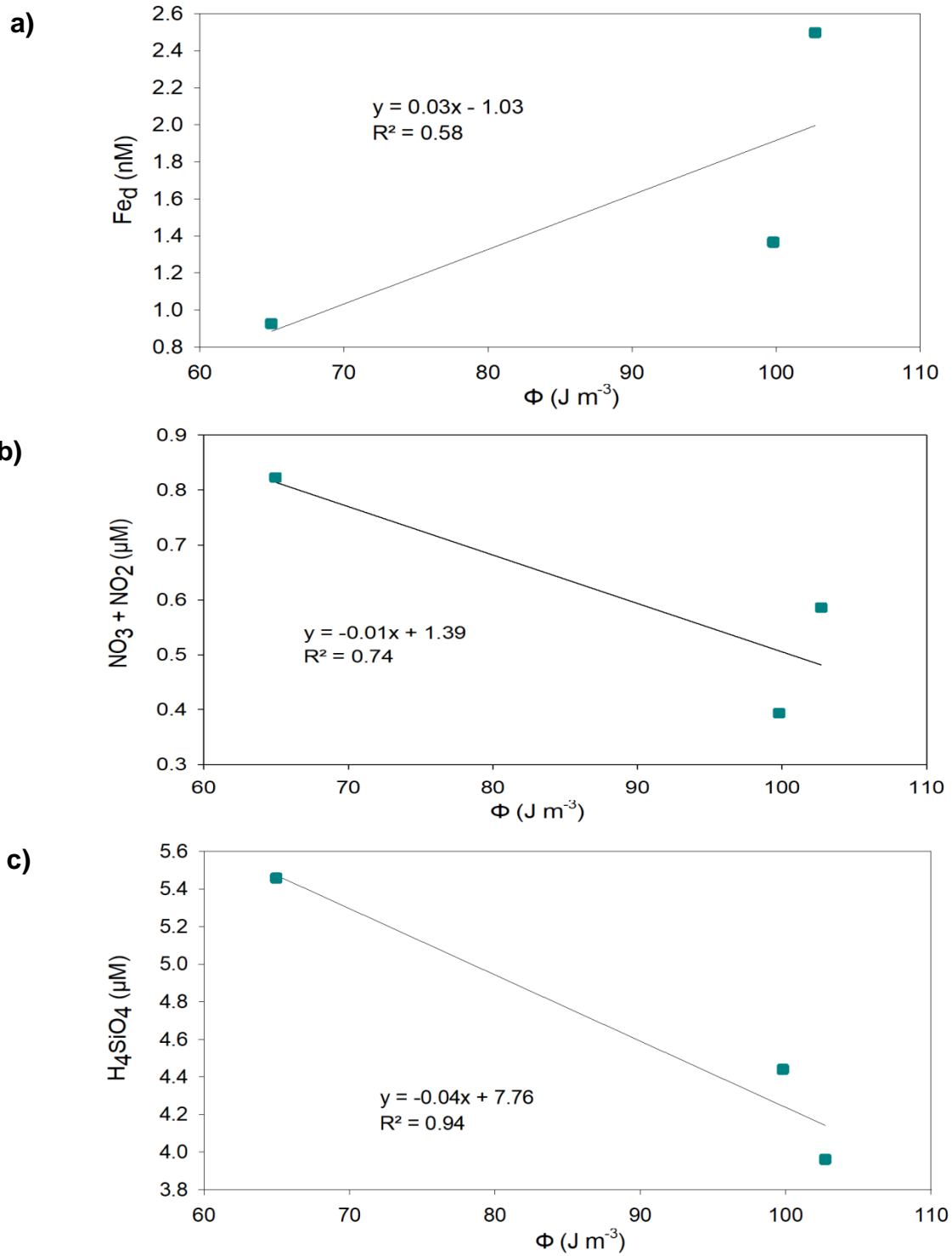
Tanto el  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  como el  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  presentaron una variación temporal en la cual fueron menores en el día 1 y se incrementaron para el día 3. Esta variación coincide con la evolución de la mezcla vertical de la columna de agua en la cual en el día 1 el  $\Phi$  fue de  $389.3 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$ , y para el día 3 fue de  $303.4 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$ . Para saber si la intensidad de la mezcla vertical fue el principal forzante que controló la forma del perfil y la concentración de los nutrientes, se correlacionó el  $\Phi$  con la concentración de los nutrientes integrados a 50, 45 y 40 m de profundidad. El  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  presentó una correlación de 0.93, el  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  fue de 0.74, mientras que de  $\text{Fe}_d$  fue solo de 0.58 (figuras 9 a, b, c). Esto sugiere que la mezcla es uno de los factores más importantes por el cual los nutrientes ( $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  y  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) son disponibles en los primeros metros de la columna de agua. Apoyando a esta idea Delgadillo-Hinojosa *et al.* (1997) encontró una relación positiva entre el parámetro de estratificación del agua y el gradiente de nitratos sugiriendo que la mezcla vertical controla el gradiente vertical de nutrientes. Por su parte, Torres-Delgado (2004) reportó que los nitratos en la región de las islas presentaron valores altos en las zonas de mezcla y valores bajos en las zonas estratificadas y que la mezcla de la columna de agua es un factor importante en la concentración superficial de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ , mientras que Torres-Delgado *et al.* (2013), mencionan que la mezcla

vertical de la columna de agua ejerce un efecto directo sobre la forma del perfil y las concentraciones de los nutrientes en la capa superficial del canal de Ballenas.

Además de la mezcla vertical, un mecanismo por el cual los nutrientes pueden elevar sus concentraciones en la región central del GC es el proceso de advección del AGC, la cual es notable hasta la parte central en verano y ha sido encontrada ocupando los primeros 100 m de la columna de agua en este estudio (figura 3), de esta manera los nutrientes que emergen de la región de las islas son transportados hacia la parte central donde son aprovechados para el proceso de fotosíntesis en las capas superficiales el cual domina en la parte central del GC durante condiciones de verano (Torres-Valdez, 2000). La distribución vertical y la variación temporal del  $Fe_d$  mostraron un comportamiento diferente al de los dos nutrientes anteriores. Las concentraciones de  $Fe_d$  variaron en un intervalo 0.71 a 3.44 nM, con los niveles más altos el día 1 (2.55 a 3.44 nM) y los menores el día 3 (0.71 a 1.10 nM). Estas concentraciones son similares a las reportadas para los primeros 200 m de la región central-sur del GC, las cuales fueron registradas bajo condiciones de primavera (0.07 a 2.73 nM; Segovia Zavala *et al.*, 2009; 2010). De acuerdo con estos autores, su estación 38 (la más cercana a nuestro punto de muestreo) presentó concentraciones de  $Fe_d$  que iban de 1.32 a 1.93 nM de los 10 a los 50 m de la columna de agua. Sin embargo, en una zona de alta mezcla como es el caso del canal de Ballenas, las concentraciones de este micronutriente en verano tardío son más elevadas (2.84 a 3.58 nM) que las aquí reportadas (Segovia-Zavala *et al.*, 2011). Esto podría sugerir que la mezcla influye en la disponibilidad de este nutriente, sin embargo, en este estudio se muestra que en el

día 3 (cuando se tenían la columna de agua mayormente mezclada) fue cuando se presentó la menor concentración de este elemento, lo cual podría ser debido a que al tener las mayores concentraciones de  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  tiende a consumirse más el  $\text{Fe}_d$  para poder asimilar el nitrógeno inorgánico. Till *et al.* (2018) mencionan que después de un tratamiento de enriquecimiento con Fe de agua del sistema de la corriente de California (cerca de Oregon) la concentración de  $\text{NO}_3$  disminuyó y la de clorofila aumentó. Además, el perfil vertical que presentó el  $\text{Fe}_d$  en el día 3 muestra el consumo de este elemento ayudando a sustentar la idea, ya que fue del tipo nutriente con mínimos superficiales y un subsecuente incremento en con la profundidad lo que nos habla de un consumo biológico de este elemento (Segovia-Zavala *et al.*, 2011).

En el caso del día 1 y 2, se presenta un perfil más homogéneo en la vertical, donde a los 5 m se observa un enriquecimiento de  $\text{Fe}_d$  en comparación con las concentraciones a la misma profundidad del perfil del día 3. Una explicación para “el exceso” de  $\text{Fe}_d$  en los días 1 y 3 es la deposición atmosférica de polvo al GC, la cual ha sido sugerida por varios autores (Segovia-Zavala *et al.*, 2009; Muñoz-Barbosa *et al.*, 2017) como una de las rutas de aporte de Fe potencialmente importante. Se ha reportado que en el GC los vientos juegan un papel importante en la concentración superficial de algunos metales traza (entre los cuales destaca el Fe), ya que se encuentra rodeado de una zona desértica (Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 2006; Segovia-Zavala *et al.*, 2009; Muñoz-Barbosa *et al.*, 2017), que al disolverse en el agua superficial puede contribuir a incrementar la fracción disuelta.



**Figura 9.** Correlación entre el parámetro de estratificación y los diferentes nutrientes: a)  $\text{Fe}_d$ , b)  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$  y c)  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ .

El GC presenta vientos variables, los cuales desde finales de otoño hasta principios de primavera son fuertes y provenientes del noroeste (Badán-Dangón *et al.*, 1991), mientras que en verano y principios del otoño son débiles y provenientes del sur (Roden, 1964). En general, los promedios mensuales de las velocidades del viento en el GC oscilan entre 1.5 y 6.1 m s<sup>-1</sup>, encontrándose los valores más elevados (6.1 m s<sup>-1</sup>) en invierno y primavera (Roden, 1964). Sin embargo durante verano es cuando se tiene el mayor flujo de polvo mineral al GC (Thunell 1998; Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 2006; Muñoz-Barbosa *et al.*, 2017; Pérez-Mendieta, 2018), con flujo total de partículas mayores a 65 mg m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 2006) y específicamente en la región central del GC se reporta un promedio anual de flujo de polvo de 23.65 ± 3.73 mg m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (Pérez-Mendieta, 2018).

### **7.3 Condiciones de oligotrofia en el verano del 2016**

El GC se considera uno de los mares marginales más productivos del mundo debido al aporte continuo de nutrientes (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991), sin embargo, en este trabajo se muestra que la región central del GC bajo condiciones de verano del 2016, se encontró en condiciones de oligotrofia. Esto estuvo representado por concentraciones de clorofila bajas que van de 0.24 a 1.64 mg.m<sup>-3</sup> de 0 a 100 m, las cuales han sido previamente reportadas por otros autores. Por ejemplo, Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2004) reportaron concentraciones de 0.24 a 0.55 mg.m<sup>-3</sup> en la parte centro-sur del GC; White *et al.* (2007) encontró una concentración media de clorofila de 0.38 mg.m<sup>-3</sup> y Segovia-Zavala *et al.*

(2010) reporta concentraciones en un intervalo de 0.03 a 1.19 mg.m<sup>-3</sup>) los cuales son consideradas concentraciones oligotróficas (Escalante *et al.*, 2013).

Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994) encontraron una diferencia muy marcada en la concentración superficial de pigmentos dentro del GC, con concentraciones >10 mg m<sup>-3</sup> en invierno y <0.1 mg m<sup>-3</sup> en verano, lo cual sugiere que no se presentan las condiciones físicas favorables para el desarrollo de la biomasa fitoplanctónica durante el verano en el Golfo de California. Una causa probable es que durante esta época las temperaturas son muy cálidas (como se muestra en la figura 4a), prevalecen vientos débiles (Roden, 1964) lo que promueve la estratificación de la columna de agua (White *et al.*, 2007), y la disminución en el transporte vertical de nutrientes aunado con una reducción de la productividad primaria (Nevárez-Martínez *et al.*, 2001). Bajo estas condiciones, el fitoplancton agota rápidamente los nutrientes de las aguas superficiales (White *et al.*, 2007) generando condiciones de oligotrofia en toda esta región.

La evolución temporal de la concentración de clorofila a en nuestra estación de muestreo se muestra en la figura 6. Los niveles mayores se presentaron bajo condiciones de estratificación en el día 1 y los menores cuando la columna de agua empezó a mezclarse para el día 3. Observaciones similares han sido previamente reportadas por otros autores, quienes mencionan que la variación temporal de la productividad primaria en estaciones del centro-sur del GC (Gaxiola-Castro *et al.*, 1995) y Bahía de los Ángeles (Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 1997) estuvieron asociadas a condiciones de estratificación de la columna de agua. En esos estudios los valores de producción primaria más bajos se

registraron durante condiciones de estratificación y sugieren que la mezcla vertical de la columna de agua es un importante factor que controla la fotosíntesis del fitoplancton en la región central del Golfo de California.

#### **7.4 Cambios en la comunidad fitoplanctónica**

En general, las diatomeas junto con los dinoflagelados (aunque en menor proporción) son los principales grupos del fitoplancton presentes en el GC (Allen, 1938), y pueden llegar a constituir el 70-100% de la población fitoplanctónica de la zona (Gaxiola-Castro *et al.*, 1995). Nuestros resultados son consistentes con los reportes de estos autores, ya que se encontró que las diatomeas y los dinoflagelados fueron los grupos fitoplanctónicos más abundantes con porcentajes de abundancia 49.03 y 49.58%, respectivamente.

En nuestro estudio los dinoflagelados fueron más abundantes que las diatomeas (Figura 7). Sin embargo, en el caso de los dinoflagelados se detectó solamente un género representativo (*Gymnodinium*), mientras que las diatomeas presentaron una mayor diversidad con un número más grande de géneros presentes en la zona durante el crucero (*Chaetoceros*, *Thalassionema*, *Nitzschia*, *Coscinodiscus*; Tabla II). *Thalassionema* y *Gymnodinium* fueron los géneros más persistentes en todo el estudio, lo cual es consistente con lo reportado por Hernández- Becerril (1985) en la parte central y norte del GC en junio de 1982, Millán-Núñez (1992) en la parte norte del GC en febrero-marzo y Ayala-Rodríguez (2004) en la región sur del GC durante octubre-noviembre; además es importante mencionar que el género *Gymnodinium*, en especial la especie *Gymnodinium catenatum* es productora de toxinas paralizantes y se ha reportado florecimientos

de esta especie en años recientes en la zona de Puertecitos, San Felipe Baja California (Murillo-Martínez, 2011).

Algunos autores como Hutchins y Bruland (1998) y Hare *et al.* (2005), en experimentos con adición de Fe observaron que hay un cambio en la comunidad fitoplanctónica de especies de células pequeñas a grandes. Sin embargo, en nuestro estudio no se realizaron experimentos para conocer los cambios de tamaños de las células fitoplanctónicas, además debido a la corta duración del experimento, no fue posible identificar la relación que existe entre las concentraciones de  $Fe_d$  y la estructura de la comunidad fitoplanctónica. Sin embargo, las concentraciones de  $Fe_d$  estaban por encima de la constante media de saturación para diatomeas oceánicas (0.35 nM) (Bill *et al.*, 2013) y para una especie de dinoflagelado (*Gymnodinium sanguineum*) de 0.38 nM reportada por Doucette y Harrison (1990).

### **7.5 Limitación por $Fe_d$**

En el inicio de este estudio se planteó la idea de que, debido a la estratificación de la columna de agua generada por la combinación de altas temperaturas y vientos débiles, el bombeo de nutrientes y  $Fe_d$  hacia la capa superficial en la región central del GC estaría limitado durante condiciones de verano y, por tanto, se desarrollaría condiciones de oligotrofia con una comunidad fitoplanctónica representada por células pequeñas.

Al evaluar los resultados obtenidos de este trabajo se encontró que la región central del GC si presentó condiciones de oligotrofia, las cuales estuvieron representadas por concentraciones de clorofila a bajas (0.24 a 1.64  $mg.m^{-3}$ ) y

nitrógeno inorgánico bajas ( $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  de  $<0.2$  a  $4.31 \mu\text{M}$ ). Sin embargo, no se observó evidencia de limitación por  $\text{Fe}_d$ , ya que las concentraciones de este micronutriente se mantuvieron por arriba de  $0.35 \text{ nM}$  y  $0.38 \text{ nM}$ , valores de las constantes medias de saturación para diatomeas oceánicas (Bill *et al.*, 2013) y para una especie de dinoflagelado *Gymnodinium sanguineum* (Doucette y Harrison., 1990). Por otro lado, la concentración de  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  estuvo por debajo de las concentraciones óptimas del requerimiento de estos grupos ( $1.6 \mu\text{M}$ ; Bill *et al.*, 2013), lo cual nos sugiere que el fitoplancton que habitaba los primeros metros de la región central del GC en verano no se encontraba limitado por  $\text{Fe}_d$ , sino por N inorgánico disuelto.

Para validar lo anterior, se calculó las razones Fe:N y Si:N para identificar cuál de estos elementos podría ejercer un control sobre el crecimiento del fitoplancton. En el caso de diatomeas oceánicas se han reportado valores para la razón Si:N de  $0.08 \pm 0.03 \text{ mol mol}^{-1}$  (Sarhou *et al.*, 2005) y Fe: $\text{NO}_3$  de  $0.02 \text{ nmol } \mu\text{mol}^{-1}$  (King y Barbeau, 2011; Biller y Bruland, 2013). Estimaciones por debajo de estos valores de referencia nos pueden indicar si el N, el Si o el Fe están limitando el sistema. En el caso de la región central del GC, el cálculo de las razones Fe:N y Si:N arrojó como resultado valores de  $48.2 \text{ nmol } \mu\text{mol}^{-1}$  y  $101.5 \mu\text{mol } \mu\text{mol}^{-1}$ , respectivamente. Dado que ambas razones son muy grandes y están por arriba de los valores de referencia, estos resultados confirman que el N fue el elemento que limitaba la producción primaria de la región central del GC bajo las condiciones de verano de 2016.

## 8. Conclusiones

Durante el verano del 2016, la capa superficial de la región central del GC estuvo dominada por la presencia de las masas de agua AGC, ASE y ASsSt, con una mayor proporción el AGC.

Se presentó una columna de agua bien estratificada en los primeros dos días debido a las altas temperaturas superficiales, sin embargo, el tercer día se caracterizó por presentar las condiciones de mayor mezcla durante el muestreo debido a la llegada del huracán Newton.

Tanto el  $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  como el  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  presentaron una distribución vertical del tipo nutriente con un intervalo de concentraciones que van desde  $<0.2$  a  $4.31 \mu\text{M}$  y de  $3.08$  a  $12.70 \mu\text{M}$ , ambos mostraron concentraciones menores en el día 1 y mayores en el día 3.

La mezcla de la columna de agua es uno de los factores más importantes por el cual los nutrientes ( $\text{NO}_3+\text{NO}_2$  y  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) son disponibles en los primeros metros de la columna de agua en la región central del GC, en condiciones de verano.

Las concentraciones de  $\text{Fe}_d$  variaron de  $0.71$  a  $3.44 \text{ nM}$ , con valores mayores en el día 1 y menores en el día 3. El perfil vertical de  $\text{Fe}_d$  fue muy homogéneo los días 1 y 2 y del tipo nutriente en el día 3, sugiriendo que hubo un consumo de este elemento por parte del fitoplancton.

En el verano del 2016 en la región central del GC se encontró un ambiente oligotrófico el cual estuvo caracterizado por la presencia de agua cálida ( $>29.9^\circ\text{C}$ ), una columna de agua estratificada, escasez de nitrógeno inorgánico ( $<0.2$  a  $4.31 \mu\text{M}$ ) y concentraciones de clorofila bajas ( $0.32$  a  $0.93 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )

La comunidad fitoplanctónica estuvo representada por diatomeas y dinoflagelados, con una ligera predominancia del grupo de los dinoflagelados. Debido a que la serie de tiempo fue muy corta (3 días), no se observaron cambios temporales significativos de la comunidad fitoplanctónica de esta región del GC.

Los géneros más representativos del fitoplancton fueron: *Gymnodinium* del grupo de dinoflagelados, y *Chaetoceros*, *Thalassionema*, *Nitzschia*, *Coscinodiscus* de las diatomeas. Los géneros más persistentes durante el crucero fueron *Thalassionema* y *Gymnodinium*.

Las bajas concentraciones de N inorgánico medidas, las concentraciones óptimas requeridas para el crecimiento del fitoplancton y las razones Fe:N y N:Si indicaron que la región central del GC bajo condiciones de verano, no se encontró limitada por Fe<sub>d</sub> sino por N inorgánico.

## 9. Referencias

- Allen, W. 1938. The Templeton Crocker Expedition to the Gulf of California in 1935; the phytoplankton. Contributions from the Scripps institution of oceanography, 34: 328-335.
- Álvarez-Borrego, S y R. Lara-Lara. (1991). The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. En: J.P. Dauphin and B. Simoneit (eds.), The Gulf of California and Peninsular Province of the Californias. *American Association of Petroleum Geologists, Memoir*, 47: 555-67.
- Álvarez-Borrego, S y R. Schwartzlose. (1979). Masas de agua del Golfo de California. Water masses of the Gulf of California. *Ciencias marinas*, 6: 43-61
- Álvarez-Borrego, S. (1983). Gulf of California. P. 427-449. En: Ketchum, B (ed). *Estuaries an enclosed seas*. Elsevier, Amsterdam, 500p.
- Álvarez-Borrego, S. (2007). Flujos de carbono en los Golfos de California y México. En: Hernández de la Torre, B y G. Gaxiola-Castro (Eds.), *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México* (1st ed., pp. 337-353). *Instituto Nacional de Ecología*.
- Álvarez-Borrego, S. (2012). Phytoplankton biomass and production in the Gulf of California: a review. *Botanica Marina*, 55 (2): 119–128

- Ayala-Rodríguez, G. 2004. Asociaciones fitoplanctónicas y condiciones oceanográficas de la región sur del Golfo de California (Octubre del 2002) (Tesis de licenciatura). Sinaloa, México: Instituto tecnológico de los Mochis.
- Badan-Dangon, A., Dorman, C., Merrifield, M y C. Winant. 1991. The lower atmosphere over the Gulf of California, *Journal of Geophysical Research*, 96: 16877-16896
- Barbeau, K. (2006). Photochemistry of organic iron (III) complexing ligands in oceanic systems. *Photochemistry and Photobiology*, 82: 1505-1516.
- Biller, D. y K. Bruland. (2013). The central California Current transition zone: A broad region exhibiting evidence for iron limitation. *Progress in Oceanography*, 120: 370-382.
- Biller, D., Coale, T., Till, R., Smith, G y K. Bruland. (2013). Coastal iron and nitrate distributions during the springs and summer upwelling season in the central California Current upwelling regime. *Continental Shelf Research*, 66: 58-72.
- Bray, N. (1988). Termohaline circulation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 93: 4993-520.
- Bruland, K., Franks, R., Knauer, G y J. Martin. (1979). Sampling and analytical methods for the determination of copper, cadmium, zinc and

nickel at the nanogram per liter level in seawater. *Analytica Chimica Acta*, 105: 233-245

Delgadillo-Hinojosa, F. 2000. Biogeoquímica del cadmio y manganeso en el Golfo de California (Tesis doctoral). Ensenada, México: UABC.

Delgadillo-Hinojosa, F., Gaxiola-Castro, G., Segovia-Zavala, J., Muñoz-Barbosa, A y M. Orozco-Borbón. (1997). The effect of vertical mixing on primary production in a bay of the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 45: 135-148.

Delgadillo-Hinojosa, F., Segovia-Zavala, J., Huerta-Díaz, M y H. Atilano-Silva. (2006). Influence of geochemical and physical processes on the vertical distribution of manganese in Gulf of California waters. *Deep-Sea Research I*, 53:1301-1319

Delgadillo-Hinojosa, F., Segovia-Zavala, J., Huerta-Díaz, M y H. Atilano-Silva. (2006). Influence of geochemical and physical processes on the vertical distribution of manganese in Gulf of California waters. *Deep-Sea Research I*. 53: 1301-1319.

Doucette, G y P. Harrison. 1990. Some effects of iron and nitrogen stress on the red tide dinoflagellate *Gymnodinium sanguineum*. *Marine Ecology Progress Series*, 62: 293:306.

Escalante, F., Valdez-Holguín, J., Álvarez-Borrego, S y J. Lara-Lara. (2013). Variación temporal y espacial de temperatura superficial del

mar, clorofila a y productividad primaria en el golfo de California.  
*Ciencias Marinas*, 39: 203-215

Espinoza-Carreón, T y J. Valdez-Holguín. (2007). Variabilidad interanual de la clorofila en el Golfo de California. *Ecología aplicada*, 6: 83-92

Félix-Bermúdez, A. (2018). Balance de masas de hierro disuelto y su interacción biológica en la Bahía de Todos Santos: un sistema con características retentivas influenciado por la Corriente de California y surgencias costeras. (Tesis doctoral). Ensenada, México: UABC

Gaxiola-Castro, G., García-Córdova, J., Valdéz-Holguín, J y M. Botello-Ruvalcaba. 1995. Spatial distribution of chlorophyll a and primary productivity in relation to winter physical structure in the Gulf of California. *Continental Shelf Reserch*, 15: 1043–1059.

Gordon, L., Jennings, J., Ross, A y M. Krest. (1993). A suggested protocol for continuous flow automated analysis of seawater nutrients (phosphate, nitrate, nitrite and silicic acid) in the WOCE Hydrographic Program and the Joint Global Ocean Fluxes Study. WOCE Hydrographic Program Office, Methods Manual WHPO 91-1 (55 pp.).

Hare, C., DiTullio, G., Trick, C., Wilhelm, S., Bruland, K., Rue, E y D. Hutchins. (2005). Phytoplankton community structure changes following simulated upwelled iron inputs in the Peru upwelling region. *Aquatic Microbial Ecology*, 38: 269-282.

Hernández-Becerril, D. 1985. Estructura del fitoplancton del Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 11: 23-38.

Hidalgo-González, R y S. Álvarez-Borrego. (2004). Total en new production in the Gulf of California estimated from ocean color data from the satellite sensor SeaWiFS. *Deep-Sea Reserch II*, 51: 739-752.

Hutchins, D y K. Bruland. (1998). Iron-limited diatom growth ans Si:N uptake ratios in a coastal upwelling regimen. *Nature*, 393: 561-564.

Hutchins, D., DiTullio, G., Zhang, Y y K. Bruland. (1998). An iron limitation mosaic in the California upwelling regime. *Limnology and Oceanography*, 43: 1037-1054

Jeffrey, S y G. Humphrey. (1975). New spectrophotometric equations for determining Chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemistry and Physiology*: 191-194.

Johnson, K.S., Gordon, R.M., y K. Coale. (1997). What controls dissolved iron concentrations in the world ocean?. *Marine Chemistry*. 57: 137–161.

King, A y k. Barbeau. (2007). Evidence for phytoplankton iron limitation in the southern California Current System. *Marine Ecology Progress Series*, 342: 91-103

- King, A y K. Barbeau. (2011). Dissolved iron and macronutrient distribution in the southern California Current System. *Journal of geophysical Reserch*, 116: 1-18.
- Lara-Lara, J y J. Valdez-Holguín. (1988). Biomasa y productividad primaria del Golfo de California por fracción de tamaños durante primavera de 1984. Zice fraction biomass and primary productivity in Gulf of California during spring 1984. *Ciencias marinas*, 14: 1-14
- Lara-Lara, J., Millán-Núñez, R., Lara-Osorio, J y C. Bazán-Guzmán. (1993). Productividad y biomasa del fitoplancton por clases de tamaño, en la parte central del Golfo de California durante primavera, 1985. Phytoplankton productivity and biomass by size classes, in the central Gulf of California during spring 1985. *Ciencias marinas* 19: 137-154
- Lavín, M., y S. Marinone. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. En: Velasco-Fuentes, O., Sheinbaum, J y J. Ochoa de la Torre (Eds.) Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics. *Springer Netherlands*, 173-204
- Libes, S. (2009). Introduction to Marine Biogeochemistry (2 ed). Academic Press, Elsvier. USA. 909. ISBN: 978-0-12-088530-5.
- Martin, J y R. Gordon. (1988). Northeast Pacific iron distributions in relation to phytoplankton productivity. *Deep-Sea Res.* 35: 177-196

- Mercado-Santana, J., Santamaria-del-angel, E., Gonzalez-Silvera, A., Sanchez-Velasco, L., Gracia-Escobar, M., Millan-Nuñez, R y C. Torres-Navarrete. (2017). Productivity in the Gulf of California large marine ecosystem. *Enviromental Development* 22: 18-29
- Millan Nuñez, (1992). Distribución espacial del fitoplancton en la parte norte del Golfo de California. Spatial distribution of the phytoplankton in the northern Gulf of California. *Ciencias marinas*, 18: 101-117.
- Millero, F. 1996. Chemical Oceanography. Second edition. CRC Press, Inc: 469.
- Muñoz-Barbosa, A., Segovia-Zavala, J., Huerta-Diaz, M., Delgadillo-Hinojosa, F., Torres-Delgado, E., Lares, M., Marinone, S y E. Gutiérrez-Galindo. 2017. Atmospheric iron fluxes in the northern region of the Gulf of California: Implications for primary production and potential Fe limitation. *Deep Sea Reserch Part I*, 129: 69-79.
- Muñoz-Barbosa, A., Segovia-Zavala, J., Huerta-Diaz, M., Delgadillo-Hinojosa, F., Torres-Delgado, E., Lares, M., Marinone, S y E. Gutiérrez-Galindo. 2017. Atmospheric iron fluxes in the northern region og the Gulf of California: Implications for primary production and potential Fe limitation. *Deep Sea Reserch part I*, 129: 69-79.
- Murillo-Martínez, R. 2011. Caracterización de fitoplancton tóxico y acumulación diferencial de toxinas de tipo paralizante en la almeja *Panopea globosa* (Dall 1898) en la franja costera de San Felipe-

Puertecitos, B.C (Tesis de licenciatura). Ensenada, México: UABC.

Nevárez-Martínez, M., Lluch-Belda, D., Cisneros-Mata, N., Santos-Molina, P., Martínez-Zavala, M y S. Lluch-Cota. (2001). Distribution and abundance of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California and their relation with the environment. *Progress in Oceanography*, 49: 565-580.

Okuda, T., Valencia, M y R. Trejos de Suescum. (1983). Nutrientes en las aguas superficiales y subsuperficiales en el área frente al ecuador. *Acta oceanográfica del Pacífico, INOCAR*, 2: 31-51.

Pérez-Mendieta, R. 2018. Variación espacio-temporal del aporte atmosférico de manganeso hacia la capa superficial del Golfo de California (Tesis licenciatura). Ensenada, México: UABC

Portela, E., Beier, E., Barton, E., Castro, R., Godínez, V., Palacios-Hernández, E., Fiedler, P., Sánchez-Velasco, L y A. Trasviña. (2016). Water masses and circulation in the Tropical Pacific off Central Mexico and surrounding areas. *Journal of Physical Oceanography*, 46: 3069-3081

Revels, B., Ohnemus, D., Lam, P., Conway, T y S. John. (2015). The isotopic signature and distribution of particulate iron in the North Atlantic Ocean. *Deep-Sea Reserch*, 116: 321-331.

- Rich, H y F. Morel. (1990). Availability of well-defined iron colloids to the marine diatom *Thalassiosira weissflogii*. *Limnology and Oceanography*, 35: 652-662.
- Robles, J y S. Marinone. (1987). Seasonal and interannual thermohaline variability in the Guaymas Basin of the Gulf of California. *Continental Shelf Reserch*, 7: 715:733
- Roden, G. (1964). Oceanographic aspects of the Gulf of California. En: Van Andel, T., H. Shor (Eds), Marine Geology of the Gulf of California: A symposium. *The American Association of Petroleum Geologists*, Memoir 3, 30-58.
- Round, F. (1967). The phytoplankton of the Gulf of California. Pat I. Its composition, distribution and contribution to the sediments. *J. exp. mar. Biol. Ecol*, 1: 76-97
- Santamaría-del Ángel. E y S. Álvarez-Borrego (1994). Gulf of California biogeography regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal Geophysical Research*, 99: 7411–742
- Sarmiento, J y N. Gruber. (2006). *Ocean Biogeochemical Dynamics*. New Jersey, USA: Princeton University Press. 160-167.
- Sarthou, G., Timmermans, K., Blain, S y P. Tréguer. (2005). Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: review. *Journal of Sea Reserch*, 53: 25-42.

- Segovia-Zavala, J., Delgadillo-Hinojosa, F., Lares-Reyes, M., Huerta-Díaz, M., Muñoz-Barbosa, A y E. Torres-Delgado. (2009). Atmospheric input and concentration of dissolved iron in the surface layer of the Gulf of California. Aporte atmosférico y concentración de hierro disuelto en la capa superficial del Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 35: 75-90.
- Segovia-Zavala, J., Delgadillo-Hinojosa, F., Lares-Reyes, M., Huerta-Díaz, M., Muñoz-Barbosa, A., Santamaría del Ángel, E., Torres-Delgado, E y S. Sañudo-Wihelmy. (2011). Distribución vertical de hierro, cobre y cadmio disueltos en el canal de Ballenas, Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 37:457-469
- Segovia-Zavala, J., Lares, M., Delgadillo-Hinojosa, F., Tovar-Sánchez, A y S. Sañudo-Wihelmy. (2010). Dissolved iron distributions in the central region of the Gulf of California, Mexico. *Deep-Sea Research I*, 57: 53-64
- Thunell, R. (1998). Seasonal and annual variability in particle fluxes in the Gulf of California: A response to climate forcing. *Deep-Sea Research I*, 45: 2059-2083.
- Till, C., Solomon, J., Cohen, N., Lampe, R., Marchetti, A., Coale, T y K. Bruland. (2018). The iron limitation mosaic in the California Current System: Factor governing Fe availability in the shelf/near-shelf region. *Limnology and oceanography*:1-15

- Torres- Orozco, E. (1993). Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California (tesis maestría). Ensenada, Mexico: CICESE.
- Torres-Delgado, E., Delgadillo-Hinojosa, F., Camacho-Ibar, V., Huerta-Diaz, M., Segovia-Zavala, J., Hernández-Ayón, M y S. Galindo-Bect. (2013). Wintertime enrichment of inorganic nutrients in the Ballenas Channel, Gulf of California. Enriquecimiento invernal de nutrientes inorgánicos en el canal de Ballenas, golfo de California. *Ciencias Marinas*, 39: 165-182
- Torres-Delgado, V. (2004). Distribución espacial de nutrientes inorgánicos en la región de las grandes islas del Golfo de California bajo condiciones de invierno (Tesis de licenciatura). UABC: Ensenada, B.C
- Torres-Valdés, S. (2000). Distribución espacial y variabilidad temporal de nutrientes en el Golfo de California (tesis maestría). Ensenada, México: UABC
- Twining, B. S., and S. B. Baines (2013), The Trace Metal Composition of Marine Phytoplankton. *Annual Review of Marine Science*, 5: 191-215.
- Van Der Merwe, P., Lannuzel, D., Bowie, A y K. Meiners. (2011). High temporal resolution observations of spring fast ice melt and seawater in East Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, 116: 1-18.

White, J., Prahl, F., Letelier, R y B. Popp. (2007). Summer Surface Waters in the Gulf of California: Prime habitat for biological N<sub>2</sub> fixation. *Global Biogeochemical cycles*, 21: 1-11.

Zamudio, L., Hurlburt, J. Metzger y O. Smedstad. 2002. On the evolution of coastally trapped waves generated by hurricane Juliette along the Mexican West Coast. *Geophysical research letters*, 29: 2141.

## 10. Anexos

**Tabla II.** Abundancias relativas de los géneros encontrados de dinoflagelados durante el muestreo.

Días	Géneros	Cel/L	%abundancia
Día 1	Scrippsiella	4654	8.10
	Gyrodinium	3442	5.99
	Oxytoxum	1980	3.44
	Ceratium	1460	2.54
	Peridinium	208	0.36
	Prorocentrum	520	0.90
	Gymnodinium	43980	76.50
	Gonyaulax	416	0.72
	Proto-peridinium	104	0.18
	Brachidinium	312	0.54
	Dinophysis	104	0.18
	Ornithocercus	104	0.18
	Podolampas	104	0.18
	Peridinium	104	0.18
Día 2	Scrippsiella	4654	8.10
	Gyrodinium	3442	5.99
	Oxytoxum	1980	3.44
	Ceratium	1460	2.54
	Peridinium	208	0.36
	Prorocentrum	520	0.90
	Gymnodinium	43980	76.50
	Gonyaulax	416	0.72
	Proto-peridinium	104	0.18
	Brachidinium	312	0.54
	Dinophysis	104	0.18
	Ornithocercus	104	0.18
	Podolampas	104	0.18
	Peridinium	104	0.18
Día 3	Scrippsiella	991	7.01
	Gyrodinium	2170	15.34
	Oxytoxum	417	2.95
	Ceratium	781	5.52
	Peridinium	52	0.37

	Prorocentrum	397	2.81
	Gymnodinium	9128	64.54
	Podolampas	104	0.74
	Amphidinium	52	0.37
	Amphizolenia	52	0.37

**Tabla III.** Abundancias relativas de los géneros encontrados de diatomeas durante el muestreo.

Días	Género	Cel/L	%Abundancia
Día 1	Rhizosolenia	520	3.42
	Nitzschia	2867	18.85
	Coscinodiscus	937	6.16
	Hemiaulus	312	2.05
	Leptocylindrus	730	4.80
	Thalassionema	4015	26.39
	Guinardia	104	0.68
	Hemidiscus	156	1.03
	Pseudo-nitzschia	156	1.03
	Chaetoceros	4170	27.41
	Melosira	104	0.68
	Navicula	204	1.34
	Planktoniella	104	0.68
	Actinoptychus	104	0.68
	Bacteriastrum	417	2.74
	Triceratium	52	0.34
	Lauderia	156	1.03
	Thalassiosira	104	0.68
Día 2	Rhizosolenia	7506	14.46
	Nitzschia	4588	8.84
	Coscinodiscus	11574	22.29
	Hemiaulus	2588	4.98

	Leptocilyndrus	1982	3.82
	Thalassionema	25134	48.41
	Cerataulina	1564	3.01
	Guinardia	5736	11.05
	Hemidiscus	834	1.61
	Pseudo-nitzschia	2400	4.62
	Chaetoceros	23254	44.79
	Skeletonema	2816	5.42
	Melosira	4798	9.24
	Navicula	1564	3.01
	Planktoniella	208	0.40
	Actinoptychus	1252	2.41
	Bacteriastrium	312	0.60
	Itshmia	104	0.20
	Ditylum	208	0.40
	Stephanopyxis	1252	2.41
	Lithodesmium	312	0.60
	Asteromphalus	522	1.01
	Bidulphia	104	0.20
	Eucampia	626	1.21
	Triceratium	104	0.20
	Lauderia	2398	4.62
	Thalassiosira	104	0.20
Día 3	Rhizosolenia	1627	12.63
	Nitzschia	1304	10.13
	Coscinodiscus	1699	13.19
	Leptocilyndrus	553	4.29
	Thalassionema	2920	22.68
	Guinardia	136	1.06
	Hemidiscus	292	2.27
	Pseudo-nitzschia	417	3.24
	Chaetoceros	1459	11.33
	Navicula	521	4.05
	Actinoptychus	1272	9.88
	Stephanopyxis	417	3.24
	Lithodesmium	52	0.40
	Asteromphalus	104	0.81
	Triceratium	52	0.40
	Corethron	52	0.40