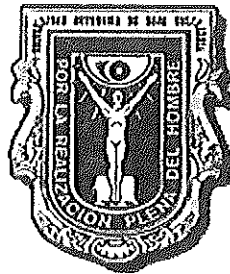


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

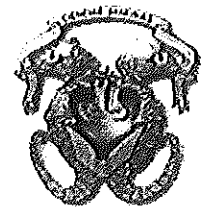
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE NUTRIENTES INORGÁNICOS EN
LA REGIÓN DE LAS GRANDES ISLAS DEL GOLFO DE
CALIFORNIA BAJO CONDICIONES DE INVIERNO**

TESIS

**QUE PARA CUBRIR EL REQUISITO
PARCIAL DE LA LICENCIATURA EN
OCEANOLOGÍA**



PRESENTA

EUNISE VANESSA TORRES DELGADO

Ensenada, B.C.

Agosto del 2004

Resumen

Durante el invierno del 2002, se realizó un crucero oceanográfico con el objetivo de diferenciar las zonas que presentan mayor intensidad del proceso de la mezcla vertical y estudiar su efecto sobre la distribución espacial de los nutrientes inorgánicos en la región de las Grandes Islas del Golfo de California. El gradiente de temperatura (ΔT) se utilizó como una estimación del parámetro de estratificación en una red de muestreo con 38 estaciones. Las zonas que presentaron condiciones de mezcla vertical intensa fueron el Canal de Ballenas, la región de los umbrales San Lorenzo y San Esteban. En estas zonas el efecto de la mezcla vertical se manifiesta aumentando la concentración promedio de los nutrientes en la capa superficial y tornando los perfiles de PO_4 , Si(OH)_4 y NO_3 , verticalmente homogéneos. En contraste, en las estaciones alejadas de la zona de mezcla, el PO_4 , Si(OH)_4 y NO_3 mostraron la forma típica, tipo nutriente, con valores bajos en la superficie y altos en el fondo. Así, las aguas superficiales de la región de las islas se encontraron enriquecidas con nutrientes, con valores máximos en el Canal de Ballenas de hasta $2.5 \mu\text{M}$ de PO_4 , $40.22 \mu\text{M}$ de Si(OH)_4 y $20.77 \mu\text{M}$ de NO_3 en comparación con la zona sur del área de estudio, donde los valores fueron de $1.3 \mu\text{M}$ de PO_4 , $4.4 \mu\text{M}$ de Si(OH)_4 y $5.1 \mu\text{M}$ de NO_3 . Los valores de nutrientes bajos en la superficie, lejos de la zona de mezcla, se debe posiblemente a la remoción por fotosíntesis dado que se encontraron asociados a niveles de sobresaturación de oxígeno de 113 a 130%. Las concentraciones promedio integradas en los primeros 50 m de profundidad fueron mayores en las zonas de mezcla intensa registrándose concentraciones de $\text{PO}_4 > 2.0 \mu\text{M}$ y $> 14 \mu\text{M}$ de nitratos, mientras que en las zonas estratificadas, las concentraciones de PO_4 y NO_3 fueron $< 2.0 \mu\text{M}$ y $< 14 \mu\text{M}$, respectivamente. La distribución vertical de PO_4 , Si(OH)_4 y NO_3 sugiere que los nutrientes emergen en el Canal de Ballenas y en la región de los umbrales. A diferencia de los otros nutrientes, los nitritos y el amonio presentaron un claro máximo superficial en las estaciones alejadas de las zonas de mezcla. El máximo de nitritos se localizó entre los 20 y los 75 m de profundidad y varió de 0.2 a $0.7 \mu\text{M}$, sugiriendo que la nitrificación ocurre de manera intensa en la capa superficial del GC. El máximo superficial de amonio se ubicó en los primeros 50 m y presentó valores hasta de $\sim 4 \mu\text{M}$, posiblemente debido a la respiración de la materia orgánica y al pastoreo en las aguas superficiales del golfo. En las zonas de alta mezcla, los nitritos y el amonio también mostraron una distribución vertical relativamente homogénea, lo cual indica que la mezcla controla la distribución de estos elementos al diluir agua superficial enriquecida con agua profunda con niveles bajos de estos nutrientes. El gradiente de nutrientes y ΔT se correlacionaron positivamente en los primeros 100 m, sugiriendo que en las zonas de mayor mezcla los valores de nutrientes son similares a lo largo de la columna de agua dando lugar a un perfil homogéneo. Los diagramas de mezcla para la región de las islas muestran que la concentración de PO_4 , NO_3 y Si(OH)_4 se correlacionaron positivamente con la salinidad, sugiriendo que la mezcla vertical controla la distribución de estos elementos. En contraste, los nitritos se correlacionaron inversamente con la salinidad, pero también fue afectado por el proceso de nitrificación y fotosíntesis. El amonio no se relacionó con la salinidad indicando que a este nutriente lo afectan otros procesos, muy probablemente la respiración de la materia orgánica y el pastoreo. La razón N:P promedio fue de 13.1, menor a la relación clásica de Redfield de 16:1, sugiriendo que el proceso de desnitrificación y la predominancia de diatomeas en las aguas superficiales son las causas probables de esta disminución. Nuestros datos muestran que el proceso de desnitrificación no ocurrió en la columna de agua de la región de las islas, indicando que el agua desnitrificada se transporta hacia esta región como una consecuencia de la circulación termohalina.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

Florindo Delgado Torres y Maximina Asistente Ortiz:
Por creer en mí y por darme la oportunidad de ver realizado mi
mayor sueño.

A MIS HERMANOS

Ana Guadalupe y Miguel Angel
Porque siempre han sido mi impulso para salir adelante.

A MI MAESTRO

Francisco Delgadillo Hinojosa
Porque ofreces tus conocimientos sin límites y sin condiciones. Eres
capaz de disfrutar y transmitir tu gusto por la ciencia.

LISTA DE TABLAS

Número		Página
Tabla I	Clasificación de las masas de agua del Golfo de California, tomada de Torres-Orozco (1993).	10
Tabla II	Valores del porcentaje de saturación de Oxígeno de algunas estaciones representativas de la región de las islas.	70

LISTA DE FIGURAS

Número		Página
Figura 1	Área de estudio y red de estaciones hidrográficas de la región de las grandes islas del Golfo de California. Estaciones donde se colectaron datos para el análisis de nutrientes (■). Estaciones donde sólo se realizaron lances de CTD (●). Las letras A, B y C indican los transectos muestreados a lo largo de las costas de Baja California, Línea Central y Costa de Sonora, respectivamente.	7
Figura 2	Diagramas T-S. a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora. Las líneas indican la clasificación de Torres-Orozco (1993). Los acrónimos de las masas de agua son: Agua del Golfo de California (AGC), Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt), Agua Intermedia del Pacífico (AIP).	16
Figura 3	Distribución vertical y horizontal de salinidad en los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora. La isohalina marcada de 35 delinea la capa del Agua del Golfo de California (AGC) Los números de la parte superior indican las estaciones de muestreo. Nótese la escala de profundidad en c.	17
Figura 4	Distribución vertical y horizontal de temperatura (°C) en los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora. Los números de la parte superior indican las estaciones de muestreo. Nótese la escala de profundidad en c.	18
Figura 5	Distribución vertical de temperatura en algunas estaciones seleccionadas de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora.	21
Figura 6	Distribución vertical de salinidad en algunas estaciones seleccionadas de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora.	24
Figura 7	Distribución vertical de oxígeno en algunas estaciones seleccionadas de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora.	27
Figura 8	Distribución vertical del porcentaje de saturación de oxígeno en algunas estaciones seleccionadas de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora.	28

Figura 18	Distribución vertical de amonio en algunas estaciones seleccionadas de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora. Nótese la escala en c.	53
Figura 19	Distribución vertical y horizontal de amonio (μM) de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora. Los números de la parte superior indican las estaciones de muestreo. Nótese la escala en c.	54
Figura 20	a) Razón N:P y b) razón Si:P en la región de las Grandes Islas del Golfo de California considerando el conjunto total de datos.	56
Figura 21	Zonas de mezcla y estratificación a lo largo de la Región de las Grandes Islas del GC en base al gradiente de temperatura considerando los primeros 100 m de profundidad.	59
Figura 22	Relación del gradiente vertical de (a) fosfatos y (b) nitratos con respecto al gradiente de temperatura en base a los valores de los primeros 100 m de profundidad y considerando todas las estaciones.	60
Figura 23	Concentración promedio de (a) fosfatos y (b) nitratos integrados en los primeros 50 m considerando todas las estaciones.	63
Figura 24	Diagramas de Mezcla considerando el total de datos de los diferentes transectos seleccionados de la figura 1.	64
Figura 25	Distribución vertical de (a) fosfatos y (b) nitratos de la región de las islas comparados con la distribución del Pacífico Nororiental.	72

1. Introducción.

El estudio de los nutrientes en el agua de mar es fundamental porque constituyen el alimento vital para el desarrollo del fitoplancton, la base de la cadena trófica en el medio ambiente marino. El comportamiento de los nutrientes en el agua de mar se debe a la interacción entre los procesos físicos y biológicos. Factores biológicos como la degradación de organismos, remineralización por bacterias, fotosíntesis y respiración; y factores físicos tales como las mareas, vientos, corrientes y mezcla de agua (Riley y Chester, 1989; Libes, 1991; Chester, 2000) juegan un papel muy importante en regular su concentración. De este modo, la variación en la concentración de los nutrientes tanto en la escala espacial como temporal esta determinada por la intensidad con la que ocurren cada uno de estos procesos.

El Golfo de California (GC) se caracteriza por ser un mar marginal altamente productivo (Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991) ya que puede compararse con algunas de las zonas más productivas del océano, como La Bahía de Bengala, las zonas de surgencia en la costa del Pacífico de Baja California o las del norte de África (Knoppers, 1994). La producción primaria del golfo es dos o tres veces mayor que la del Atlántico y la del Pacífico a latitudes similares (Zeitzchel, 1969). Se piensa que esta productividad se debe en gran medida al aporte continuo de nutrientes producto de la hidrodinámica del mismo (Gaxiola-Castro *et al*, 1995).

El GC se distingue también por poseer condiciones hidrográficas y climáticas particulares. Considerando un ciclo anual, el GC presenta una

ganancia neta de calor desde la atmósfera y una tasa de evaporación de agua de aproximadamente 1 m año^{-1} (Bray, 1988a; Lavín y Organista, 1988; Castro *et al.*, 1994). Estas condiciones favorecen la formación de una capa superficial de agua caliente, salina, y menos densa; lo cual provoca un flujo de agua ligera con salida por la superficie y un flujo de agua más densa con entrada por el fondo (Bray, 1988a). Por esta razón, se dice que el GC funciona como un “estuario termal”. Esta circulación termohalina trae como consecuencia que el golfo exporte sal y calor al océano Pacífico por la superficie y reciba agua fría rica en nutrientes por el fondo (Bray y Robles, 1991). Este flujo de agua del fondo rica en nutrientes una vez dentro del golfo solo se requiere de algún mecanismo que transporte estas aguas a la zona eufótica para que ocurran florecimientos de fitoplancton (Cortés-Lara *et al.*, 1999).

La región de las islas es la parte más estrecha del golfo y durante las mareas vivas, el régimen de marea semidiurno combinado con la presencia de varios umbrales, produce fuertes corrientes de marea con velocidades de hasta 1.5 m s^{-1} (Badán-Dangón *et al.*, 1991). En particular, la mezcla por mareas sobre el umbral entre las islas San Lorenzo y San Esteban produce una vigorosa agitación de la columna de agua hasta profundidades mayores a 500 m (Simpson *et al.*, 1994). Una característica que revela la influencia de agua profunda en la zona del archipiélago es que durante todo el año se detecta la presencia de agua más fría en la superficie comparada con el resto del golfo (Soto-Mardones *et al.*, 1999; Torres-Valdés, 2000). Igualmente, en la zona de las islas se presentan los valores más altos de nutrientes en el Golfo de California

de como afecta este fenómeno a la distribución y concentración de los nutrientes en la región de las grandes islas. Así, este estudio tiene la finalidad de adquirir un mayor entendimiento del efecto de la mezcla vertical, sobre la distribución de los nutrientes en una región que se caracteriza por un intenso forzamiento físico.

2. Objetivo

Estudiar el efecto de la mezcla vertical sobre la distribución vertical y horizontal de los nutrientes inorgánicos (fosfatos, silicatos, nitratos, nitritos y amonio) en la región de las grandes Islas bajo condiciones de invierno, con la finalidad de lograr un mayor entendimiento del comportamiento de estos elementos en un ambiente con un intenso forzamiento físico. Además de comparar la distribución espacial de los nutrientes de esta región con la del océano Pacífico adyacente.

3. Hipótesis

Estudios previos han mostrado que el comportamiento de los nutrientes en la región de las grandes islas del Golfo de California esta fuertemente influenciado por procesos físicos. Esta zona funciona como una fuente de nutrientes hacia la superficie del Golfo de California por la mezcla del agua superficial con el agua profunda rica en nutrientes. El aporte de nutrientes aumenta durante el invierno, debido a que se intensifican las fuertes corrientes de marea en esta zona y con ello el proceso de la mezcla vertical. Así, la estructura vertical de los nutrientes es función de la mezcla vertical, por lo cual, la forma del perfil típico, tipo nutriente, cambia mostrando una estructura

homogénea. Las concentraciones de nutrientes mayores se encontraran en las zonas donde prevalezcan las condiciones de mezcla como son el Canal de Ballenas y la zona de los umbrales de San Esteban y San Lorenzo.

4. Área de estudio

4.1 Descripción General

El Golfo de California se encuentra localizado en el noroeste de México entre la árida Península de Baja California y los también áridos estados de Sonora y Sinaloa. Presenta una orientación de noroeste a sureste, mide aproximadamente 1600 Km de largo y tiene un ancho máximo cercano a los 250 Km en la boca y un mínimo de 85 Km a la altura de la Isla Tiburón (Semarnap, 2000).

La mayor división que se realiza del Golfo de California es considerando sus condiciones topográficas, por lo que generalmente se divide en dos partes: De la boca (23° N) a la región de las grandes islas (28° N) con profundidades de 1000 a 2000 m y de la región de las islas a la cabeza del golfo con una plataforma continental de profundidad menor a 200 m. La separación de ambas partes esta limitada por el umbral sur (~450 m de profundidad) de la cuenca Salsipuedes (1600 m de profundidad), restringiendose así la circulación entre ambas partes, por lo que hay una comunicación aparentemente limitada entre el Canal de Ballenas y la parte sur del golfo (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979). Mientras que la región sur se encuentra en comunicación abierta con el océano Pacífico a través de la boca y tiene una hidrografía complicada debido a

la confluencia de distintas masas de agua (Soto-Mardones, 1999). En esta última región del golfo, los umbrales entre las cuencas tienen más de 1500 m profundidad (Álvarez-Borrego, 1983; Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991).

Dentro del GC la región de las grandes islas constituye una de las características topográficas mas sobresalientes del golfo que enmarca un régimen hidrográfico diferente, esta región se extiende desde el norte de la Isla Angel de la Guarda (29°34') hasta la isla San Pedro Mártir (28°23') (Figura 1). Esta formada por cinco cuencas en forma de "V", de norte hacia el sur se encuentra Cuenca Delfin, Cuenca Salsipuedes, Cuenca San Esteban, Cuenca Tiburón y Cuenca San Pedro Mártir (Semarnap, 2000). Por lo que la topografía que presenta esta región y las fuertes corrientes de marea provocan una intensa mezcla vertical originando un régimen hidrográfico único.

4.2 Circulación General

El Golfo de California presenta un clima con un efecto moderado por parte del océano Pacífico debido a que tiene una continua cadena de montañas de 1 a 3 Km de altura en Baja California, por lo que su climatología esta más influenciada por el continente debido a las tierras áridas que lo rodean que por el océano (Álvarez-Borrego, 1983).

El Golfo de California se encuentra separado del Océano Pacífico al igual que el mar Mediterráneo y el mar Rojo se encuentran separados del Océano Atlántico e Indico, respectivamente. Estos tres mares marginales funcionan como cuencas evaporativas debido a que la evaporación excede sobre la

precipitación en la superficie, originando una pérdida neta de calor y de humedad a la atmósfera provocando que su salinidad sea mayor en comparación al agua oceánica adyacente (Ketchum, 1983). Debido a la pérdida

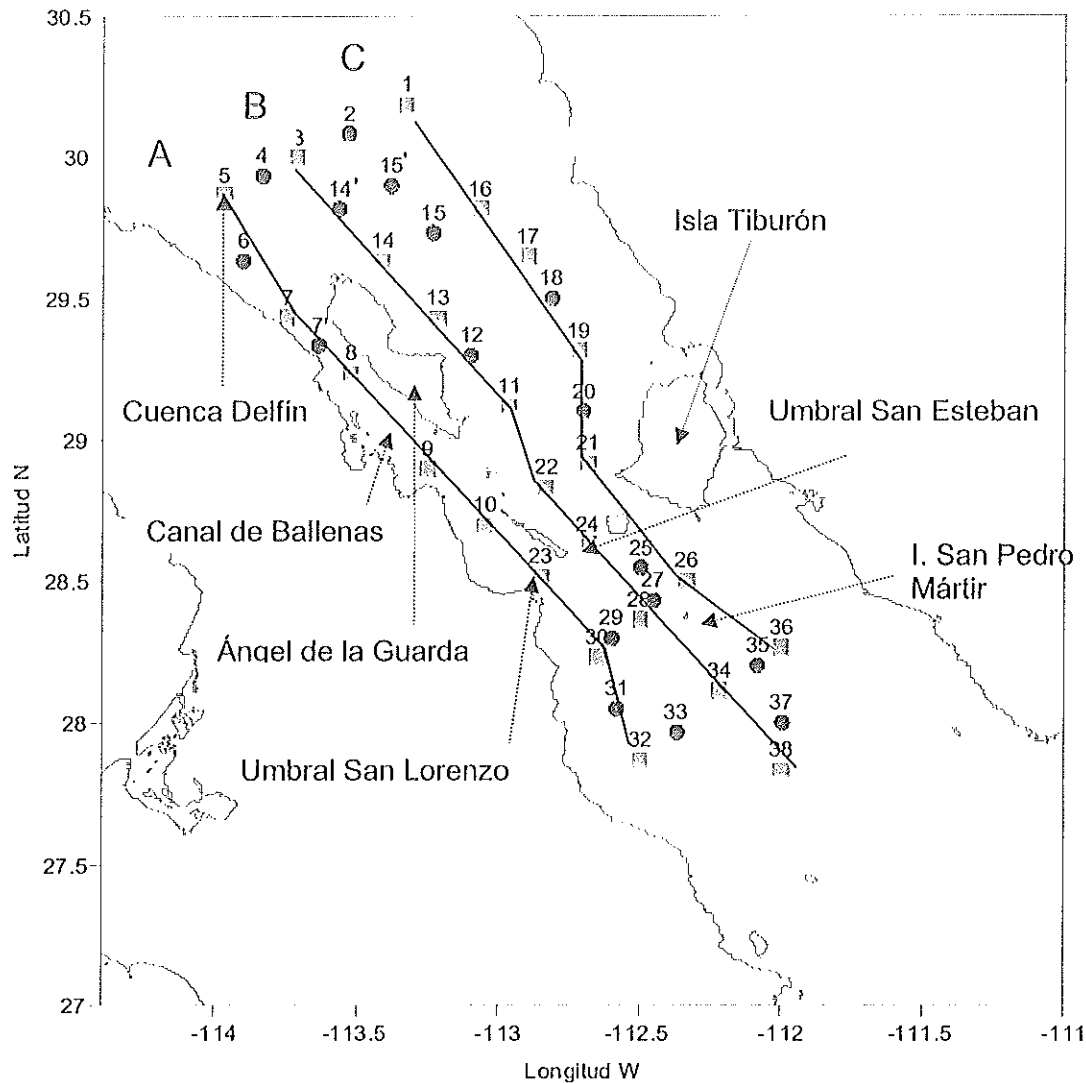


Figura 1. Área de estudio y red de estaciones hidrográficas de la región de las grandes islas del Golfo de California. Estaciones donde se colectaron datos para el análisis de nutrientes (■). Estaciones donde sólo se realizaron lances de CTD (●). Las letras A, B y C indican los transectos muestreados a lo largo de las costas de Baja California, Línea Central y Costa de Sonora, respectivamente.

de calor que se origina en el mar mediterráneo y en el mar rojo se produce agua más densa conforme avanza hacia el interior de la cuenca provocando el hundimiento de esta agua, generando una circulación de entrada de agua por la superficie y de salida por el fondo de la cuenca. Sin embargo, a pesar de que el GC presenta una evaporación de 1 m año^{-1} , también tiene una ganancia neta de calor en un ciclo anual a lo largo de todo el golfo (Bray, 1988a; Castro *et al.*, 1994). Estas condiciones favorecen la formación de una capa superficial de agua caliente, salina, y menos densa; lo cual provoca un flujo de agua ligera con salida por la superficie y un flujo de agua más densa con entrada por el fondo. Esta circulación trae como consecuencia que el golfo exporte sal y calor al Océano Pacífico por la superficie y reciba agua fría rica en nutrientes por el fondo (Bray, 1988a).

Bray (1988a) propuso un modelo de circulación de tres capas de acuerdo a la corriente superficial y a la circulación termohalina. La primera capa se encuentra hasta los 50 m y fluye hacia adentro o hacia afuera del golfo de acuerdo al patrón de los vientos predominantes, la segunda capa se encuentra entre los 50 y 250 m que fluye hacia afuera. Y la tercera capa se encuentra entre los 250 y 500 m que fluye hacia el interior del golfo. En la superficie la circulación corresponde al patrón de los vientos estacionales y se caracteriza por presentar flujos hacia el sur en invierno y hacia el norte en verano. Durante el invierno prevalecen los vientos del noroeste, mientras que durante el verano prevalecen los vientos del sureste, siendo de mayor intensidad los vientos de invierno (Badán-Dangón *et al.*, 1991). De manera particular en la región de las grandes

islas se observa que debido a la mezcla vertical, el agua que entra al interior del golfo rica en nutrientes es llevada a la superficie (Cortés-Lara *et al.*, 1999).

4.3 Masas de Agua

En la boca del Golfo de California se encuentran seis masas de agua (Bray y Robles, 1991; Torres-Orozco, 1993; Alvarado-Aguilar, 1998), tres masas de agua superficiales: Agua fría de baja salinidad de la Corriente de California (ACC), agua cálida y de salinidad intermedia del Pacífico Oriental Tropical (AST o ASE) y agua caliente y salina del Golfo de California (AGC). Por debajo se encuentran las masas de Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt), la masa de Agua Intermedia del Pacífico y la masa de Agua Profunda del Pacífico (APP) (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Alvarado-Aguilar, 1998). En el promedio anual, el 74% del volúmen total del golfo se ocupa por las masas de agua más profundas: el Agua Intermedia del Pacífico contribuye con el 33% y el Agua profunda del Pacífico con el 41%. El volúmen restante lo ocupan tres masas de agua: el Agua Subsuperficial Subtropical (19%), el Agua del Golfo de California (6%) y el Agua Superficial del Pacífico Tropical (1%), mientras que la contribución del ACC es pequeña al volumen total del golfo (Torres-Orozco, 1993; Tabla I).

Tabla I. Clasificación de las masas de agua del Golfo de California, tomada de Torres-Orozco (1993).

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

Las masas de agua profundas del Pacífico (AIP y APP) no muestran variaciones estacionales apreciables en términos volumétricos (Torres-Orozco, 1993), pero si se observa con las masas de agua restantes. La masa de Agua Superficial Ecuatorial invade solamente la región de la boca del Golfo de California en invierno, mientras que en verano invade prácticamente toda la parte del golfo hasta el sur de las Islas Angel de la Guarda y Tiburón (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Torres-Orozco, 1993).

En la región de las grandes islas la porción del ASsSt aumenta, lo cual sugiere que el ASsSt sobrepasa el umbral Salsipuedes-Tiburón y puede mezclarse con AGC. Esta agua mezclada sobre el umbral puede transportarse hacia a Región Norte del Golfo (RNG), contribuyendo a la renovación del agua

de las cuencas de la RNG o alternativamente, ser transportada hacia el sur ayudando a la alta productividad biológica del GC a través del acarreo de nutrientes inorgánicos a la capa superficial y su dispersión en el golfo por advección horizontal (Torres-Orozco, 1993).

5. Metodología

Las muestras de agua de mar fueron colectadas en un crucero oceanográfico realizado en la región de las grandes islas del Golfo de California del 17 al 22 de marzo del 2002 a bordo del B/O Francisco de Ulloa. Esta época fue seleccionada como representativa de las condiciones de invierno, dado que bajo estas condiciones se han encontrado los valores más altos de nutrientes en esta zona (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Torres-Valdés, 2000). El diseño de muestreo se planteo con la finalidad de: a) distinguir en que zonas dentro de la región de las islas se presenta con mayor intensidad el proceso de mezcla y cual es su efecto sobre la concentración de nutrientes; b) visualizar el comportamiento de estos elementos en el Canal de Ballenas y sobre los umbrales (San Estebán y San Lorenzo), ya que estas características topográficas limitan el intercambio de agua entre la región norte y la parte sur del golfo y c) detectar las masas de agua presentes en esta zona. La red hidrográfica con un total de 38 estaciones se organizó en tres líneas o transectos, el primero paralelo a la costa de Baja California, el segundo a lo largo del eje central y el tercero paralelo a las costas de Sonora y Sinaloa

tratando de cubrir los diferentes regímenes hidrográficos presentes en la zona (Figura 1).

En cada una de las estaciones se realizaron lances de CTD y se colectaron muestras de agua para el análisis de nutrientes de una manera alternada (Figura 1). Se utilizó un CTD marca SeaBird con sensores para temperatura, salinidad y oxígeno, montado en una roseta con espacio para 6 botellas de muestreo. Las muestras se colectaron utilizando botellas Niskin de 5 L de capacidad a las profundidades de 0, 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 750, 850, 900 y 1000 m, según lo permitiera la profundidad de la zona. Se colectaron muestras de agua en botellas de borosilicato para el análisis de salinidad y botellas DBO de 300 ml de capacidad para el análisis de oxígeno. La determinación del oxígeno disuelto se llevo a cabo inmediatamente a bordo utilizando el método microWinkler. Las muestras para la determinación de los nutrientes fueron almacenadas en botellas de polietileno de 250 ml, se congelaron y se mantuvieron a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta el momento de su análisis en el laboratorio. La salinidad se determinó a partir de la medición de la conductividad usando un salinómetro 3400B de la Marca Guildline.

5.1 Trabajo de laboratorio

Para la realización del análisis de los nutrientes inorgánicos, el material utilizado se sometió a un proceso de limpieza estricto, se lavó con jabón libre de fosfatos (hextrano) y se enjuagó varias veces con agua destilada y agua desionizada. En el caso del análisis del amonio, fue necesario un control

riguroso para su determinación debido a la facilidad con que las muestras pueden contaminarse. Para la obtención de agua libre de amonio de buena calidad, se utilizó una resina de intercambio catiónico (Dowex AGW X8). Esta agua libre de amonio se usó para el enjuague final del material de trabajo y para la preparación de los reactivos requeridos en la medición.

Al inicio del trabajo de análisis, las muestras se descongelaron y se filtraron a través de filtros de fibra de vidrio GF/C Whatman de 2.4 cm con un poro nominal de 0.7 μm . Las muestras para el análisis del amonio no se filtraron debido a que los filtros presentan dentro de su composición cantidades pequeñas de esta sustancia que al contacto con la muestra puede alterar su composición natural. Para tener un mayor control en la medición del amonio, el análisis se realizó en un cuarto aislado de cualquier material o reactivo que pudiera contener amonio y además con una atmósfera positiva para evitar la contaminación vía atmosférica. Finalmente, la cuantificación se realizó siguiendo el método colorimétrico descrito por Parsons, Maita y Lalli (1984) utilizando un espectrofotómetro UV/Visible marca CARY 50 Varian.

5.2 Procesamiento de datos

Los perfiles de salinidad y oxígeno del CTD se corrigieron utilizando los datos de salinidad medida por conductividad y del oxígeno medido por el método microWinkler. La curva de calibración consistió en realizar un análisis de regresión entre las variables medidas en el laboratorio y las lecturas del CTD. Posteriormente, usando la pendiente de las curvas de regresión respectivas se corrigieron los perfiles de salinidad y oxígeno del CTD.

Se realizó un análisis hidrográfico utilizando diagramas T-S para caracterizar los diferentes regímenes hidrográficos e identificar el origen de las masas de agua presentes en el área de estudio. También se efectuó un análisis gráfico de los gradientes verticales y horizontales de los nutrientes para identificar las zonas de aporte, así como la variabilidad espacial que presentan estos elementos en la zona de las islas del Golfo de California. Además, como medida del efecto de los procesos biológicos sobre la distribución de los nutrientes se estudió la razón N:P.

Con la finalidad de identificar el efecto que tienen los procesos físicos sobre la distribución de los nutrientes se realizó un análisis utilizando diagramas de mezcla (nutriente vs salinidad) para distinguir si los nutrientes tienen un comportamiento conservativo o no conservativo. Así como la obtención del gradiente de temperatura (dT/dz) como una estimación del parámetro de estratificación, medida que permitió cuantificar la intensidad de la mezcla de la columna de agua. La relación entre el gradiente de temperatura y la concentración promedio integrada de los nutrientes (μM) facilitó entender el efecto que ocasiona la mezcla sobre la disponibilidad de los nutrientes en la región del archipiélago.

6. Resultados

6.1 Análisis Hidrográfico

La figura 2 a, b, y c muestra los diagramas T-S de los tres transectos recorridos en la región de las islas del Golfo de California durante el invierno del 2002. En este periodo se identificaron solo tres masas de agua de las cinco regularmente registradas de acuerdo a la clasificación de Torres-Orozco (1993).

En la costa de Baja California se registró la presencia del Agua del Golfo de California (AGC, $S \geq 35$ y $T > 12^{\circ}\text{C}$) a ~ 250 m de profundidad desde el extremo norte hasta el Canal de Ballenas. Posteriormente, el espesor de esta masa de agua disminuyó desde la zona del umbral hasta el extremo sur, donde solo ocupó los primeros 100 m de profundidad (Figuras 3a y 4a). Debajo de esta masa de agua se encontró el Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt, $34.5 < S < 35.0$ y $9 \leq T^{\circ}\text{C} < 18$). Esta masa de agua se observó del extremo sur a la zona del umbral presentando como límite superior los 100 m y límite inferior ~ 500 m de profundidad, mientras que en el Canal de Ballenas y en las estaciones del extremo norte el límite superior de esta masa de agua fue a partir de ~ 250 m ocupando la mayor parte del volumen de la cuenca del Canal de Ballenas. El Agua Intermedia del Pacífico (AIP, $34.5 \leq S \leq 34.8$ y $4 \leq T^{\circ}\text{C} < 9$) solo se alcanzó a detectar en la estación más sureña de este transecto a 500 m de profundidad.

En el transecto central del Golfo de California se observó la presencia del AGC a lo largo de todo el transecto (Figuras 3b y 4b). El límite inferior de esta masa de agua se detectó a 250 m en las estaciones del norte, mientras que hacia la zona

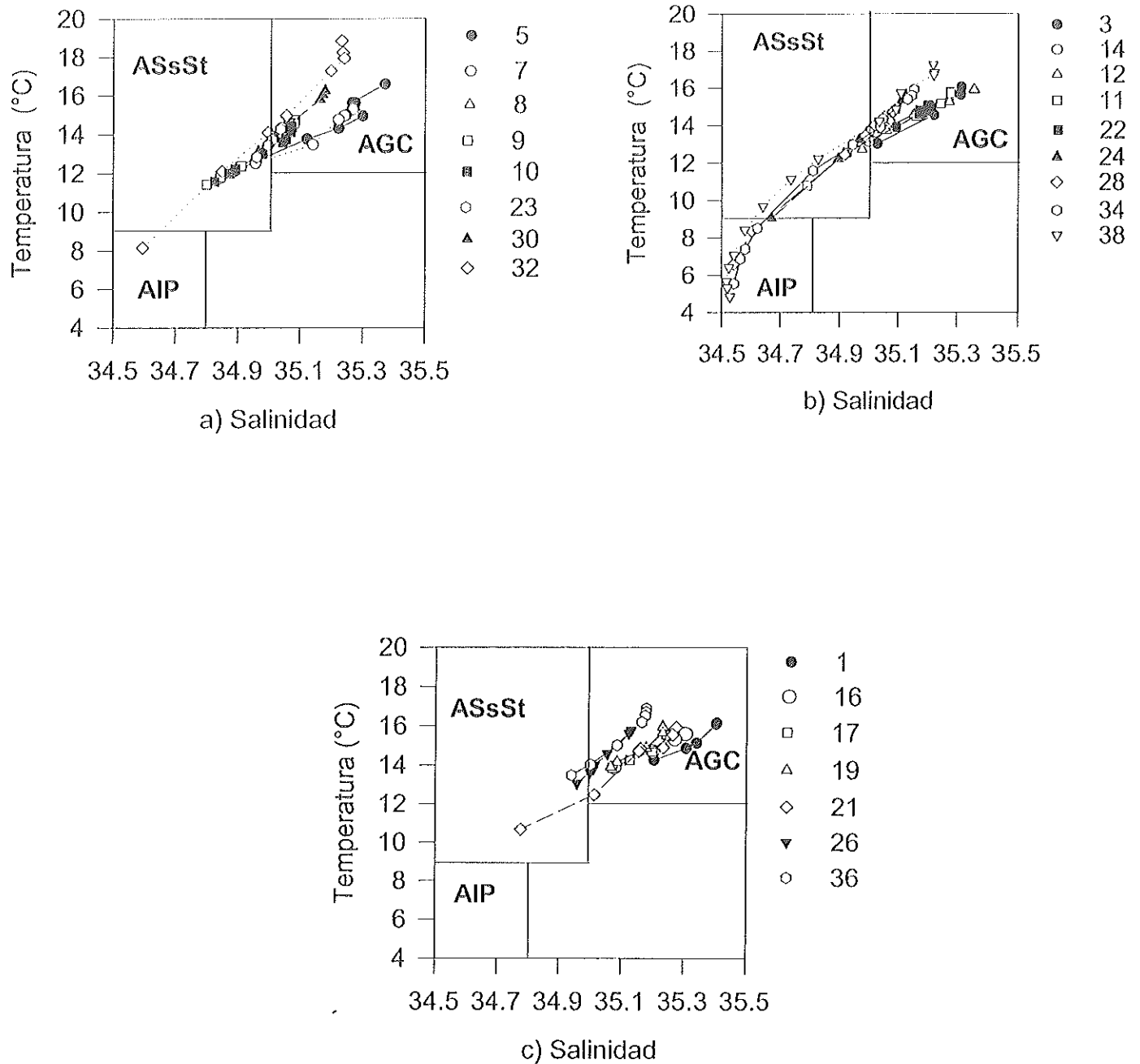


Figura 2. Diagramas T-S. a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora. Las líneas indican la clasificación de Torres-Orozco (1993). Los acrónimos de las masas de agua son: Agua del Golfo de California (AGC), Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt), Agua Intermedia del Pacífico (AIP).

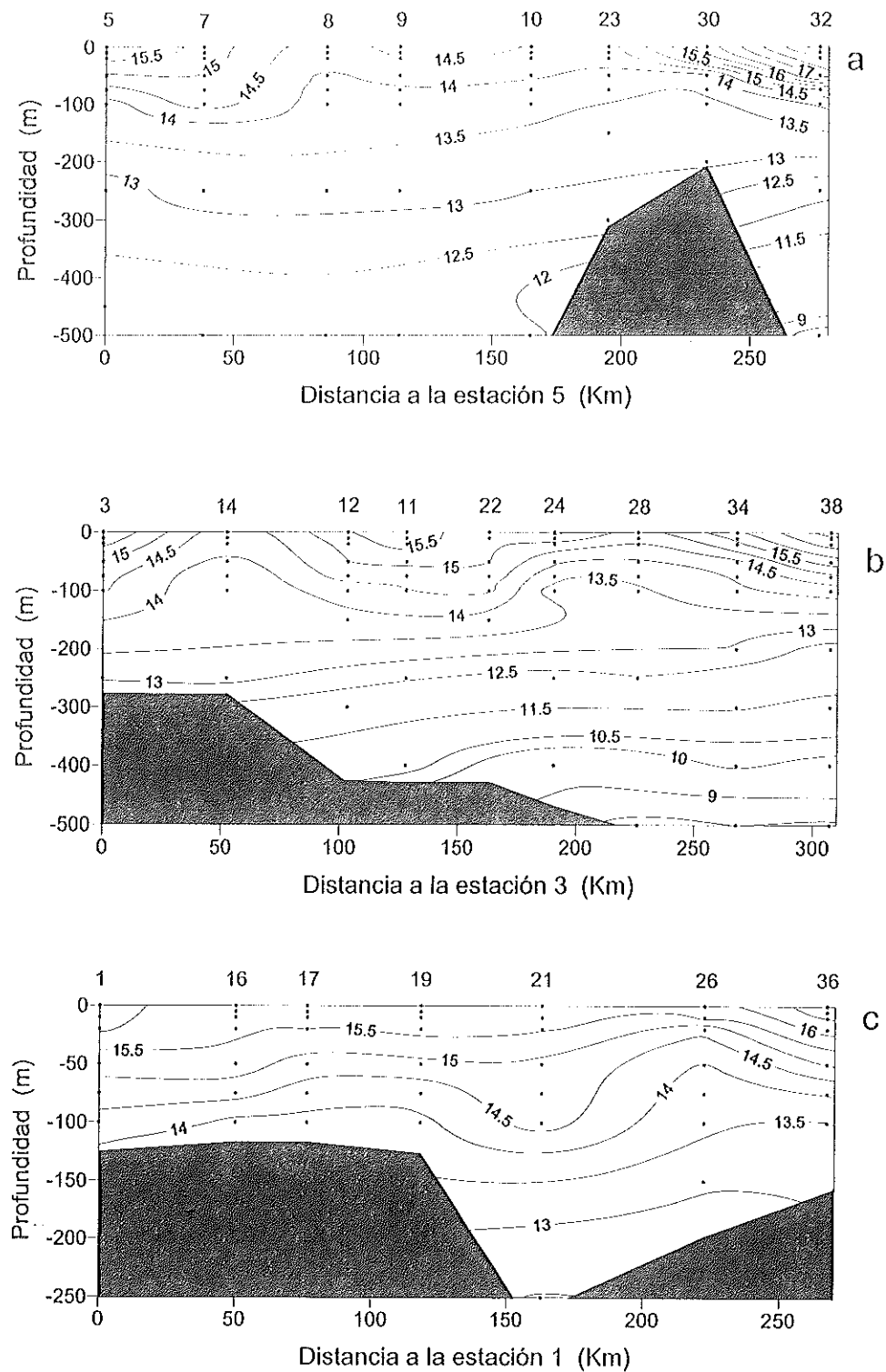


Figura 4. Distribución vertical y horizontal de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora. Los números de la parte superior indican las estaciones de muestreo. Nótese la escala de profundidad en c.

del umbral el grosor de esta masa de agua disminuyó a ~100 m en las estaciones del sur. Sin embargo, en la zona del umbral esta masa de agua se encontró a partir de los 75 m, lo cual sugiere un desplazamiento del ASsSt hacia la superficie, ya que en las estaciones del extremo sur se encontró debajo de los 100 m teniendo como límite inferior los ~500 m de profundidad. Finalmente se observó que el AIP ocupó la capa profunda de las estaciones del extremo sur a partir de los 500 m y hacia la profundidad. Por lo que el mayor volumen de este transecto es ocupado por el ASsSt y el AIP.

En el transecto paralelo a las costas de Sonora se observó solo la presencia de dos masas de agua (Figuras 3c y 4c), el AGC que ocupa, por ser una zona muy somera, toda la parte norte del transecto y hasta los primeros 250 m sobre el Canal Tiburón. En las estaciones del sur esta masa de agua se detectó al igual que en la parte norte en los primeros 100 m de profundidad. La otra masa de agua detectada en este transecto fue el ASsSt, esta masa de agua se presentó a partir de los 100 m en las estaciones del sur y debajo de los 250 m en el Canal Tiburón.

La temperatura superficial de la estación norteña del transecto paralelo a la costa de Baja California (BC) presentó un valor de 16.58 °C disminuyendo hacia la zona del umbral en donde se registró una temperatura de 14.34 °C y aumentó nuevamente hacia el sur del umbral, donde se encontró el valor máximo de todo el muestreo de 18.84 °C (Figura 5a). En la estación del norte la temperatura disminuyó a 12.61 °C a los 250 m mientras que en la estación del sur disminuyó a 12.1 °C a la misma profundidad, sugiriendo que los valores

superficiales son más altos en el extremo sur que en el norte, pero que presentan un comportamiento similar hacia el fondo. En el Canal de Ballenas la temperatura disminuyó a 13.16 a 250 m y en el umbral San Lorenzo a 13.03. Por lo tanto, se puede observar que el Canal de Ballenas y la zona del umbral presentaron temperaturas bajas en la superficie y altas hacia el fondo en comparación a los perfiles de los extremos de la zona de estudio. Las isotermas muestran que en ambos extremos hay una mayor diferencia entre la temperatura superficial y la del fondo, mientras que en el Canal de Ballenas y la zona del umbral muestra una menor diferencia entre la superficie y el fondo, indicando mezcla del Canal de Ballenas hasta la zona del umbral y estratificado en ambos extremos. A través de la isoterma de 14.5 °C se observó la presencia de un domo de agua fría hacia la superficie del canal y la zona del umbral (Figura 4a). Esta misma isoterma se encontró a 75 m de profundidad en las estaciones de norte y sur. Lo anterior sugiere que hay un flujo de agua del fondo hacia la superficie en el Canal de Ballenas y en la zona del umbral. Debajo de los 200 m de profundidad, el Canal de Ballenas estuvo mezclado en comparación al extremo sur donde la columna de agua se encontró estratificada y se observó una diferencia de hasta 4.24 °C a 500 m de profundidad entre el Canal de Ballenas y la estación sur.

La temperatura superficial en el transecto central del golfo presentó variaciones muy pequeñas, con valores de aproximadamente 16.0 °C en el norte, 15.5 °C en la zona del umbral y nuevamente presentó un incremento de 17.25 °C (Figura 5b) hacia la estación del sur. Los valores superficiales de

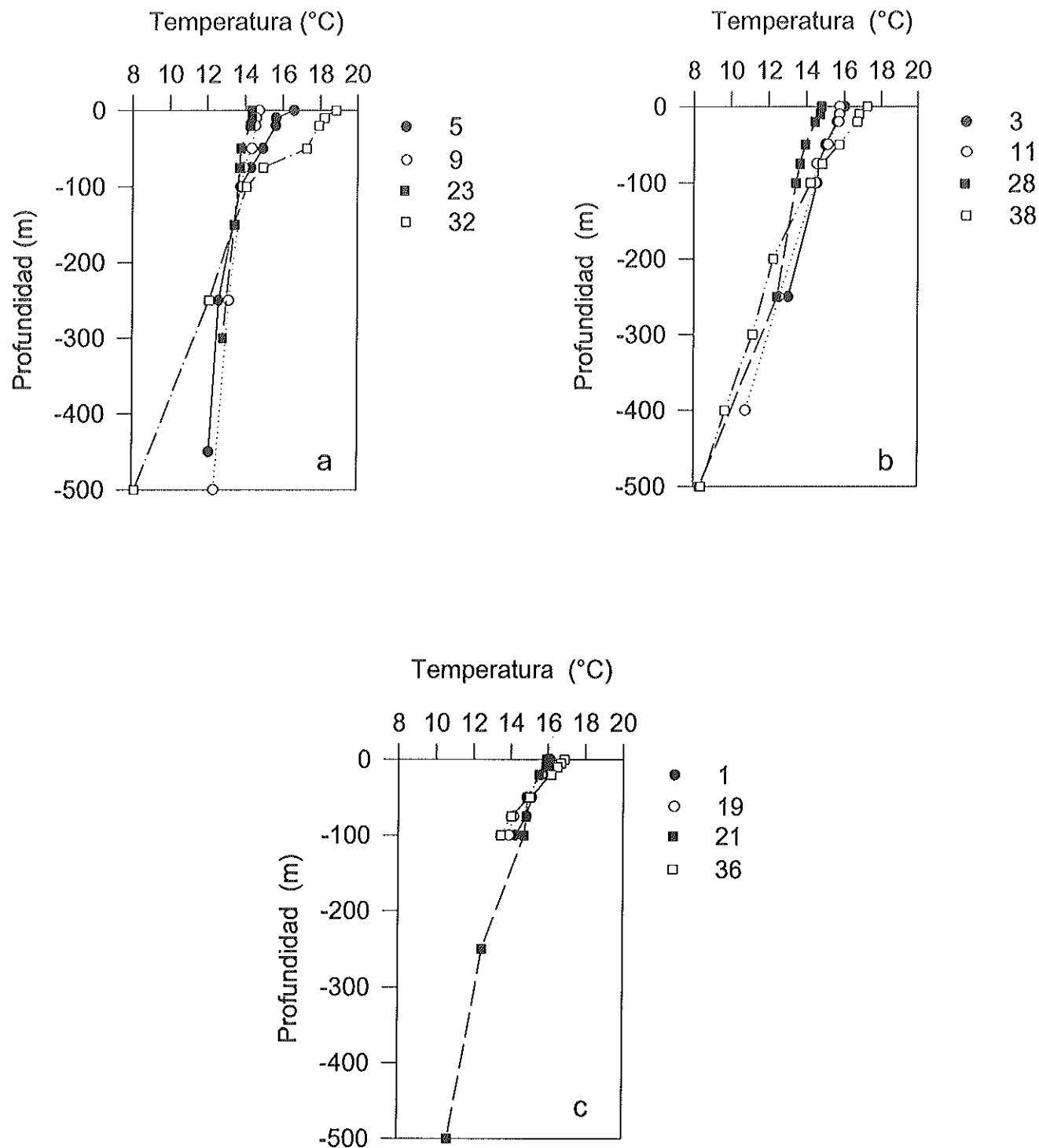


Figura 5. Distribución vertical de temperatura en algunas estaciones seleccionadas de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora.

ambos extremos fueron menores a los observados en los extremos de la costa de Baja California, pero mayores a los encontrados en el Canal de Ballenas. De manera general, en este transecto los perfiles mostraron un comportamiento similar entre ellos con valores altos en la superficie y bajos hacia el fondo. El perfil registrado en la zona del umbral aunque también presenta este comportamiento, sus valores son bajos en la superficie y altos en el fondo en comparación al resto de los perfiles, dándole una mayor homogeneidad al perfil. Al norte de la Isla Ángel de la Guarda y en la zona del umbral se observaron estructuras en la columna de agua en forma de domo, estas se identificaron a través de la isoterma de 14.5°C (Figura 4b). En la zona norte y sur del transecto esta isoterma se encontró a ~ 150 m de profundidad, lo cual sugiere que al norte de la isla Ángel de la Guarda y en la zona del umbral hay un flujo de agua fría hacia la superficie.

El transecto paralelo a la costa de Sonora se caracteriza por ser una zona somera a excepción del Canal Tiburón debido a que se encuentra sobre la plataforma continental de la costa de Sonora. La temperatura superficial registrada en el norte fue de 16.13°C (E1), disminuyó hacia el Canal Tiburón (E21) con un valor de 15.92°C y posteriormente presentó un ligero incremento hacia la estación del sur (E36) en donde se registró el agua superficial más cálida del transecto (16.87°C ; Figura 5c). Los perfiles presentaron un comportamiento similar a excepción del registrado en el Canal Tiburón. De manera general, presentaron valores altos en la superficie y bajos hacia el fondo, mientras que en el Canal Tiburón se encontraron valores bajos en la

superficie y altos hacia el fondo en comparación al resto de los perfiles. Hacia ambos extremos del Canal Tiburón se observaron columnas de agua estratificadas (Figura 4c), con agua más caliente debajo de los 50 m hacia la porción norte que en la porción sur.

La salinidad superficial mostró una conducta similar a la de la temperatura, disminuyendo de 35.37 en el norte a 35.03 en la zona del umbral y posteriormente aumentó hacia el extremo sur donde se registraron valores de 35.23 (Figura 6a). En la estación del sur a 500 m de profundidad se encontró el valor más bajo de salinidad (34.59), mientras que en el Canal de Ballenas a la misma profundidad se observó agua mas salada (34.90). En el Canal de Ballenas también se registraron rangos uniformes de salinidad a lo largo de la columna de agua con valores de 35.08 en la superficie y 34.91 a 500 m. En el extremo norte hasta la entrada al Canal de Ballenas se registró la presencia de un frente de salinidad. A través de la isohalina de 35.1 se observó un domo de agua con menor salinidad hacia la superficie en el Canal de Ballenas. Esta isohalina se detectó debajo de los 100 m en las estaciones del norte, mientras que en el Canal de Ballenas se observó sobre la superficie (Figura 3a).

La salinidad superficial en el transecto central del GC, a excepción de la E14, disminuyó de la estación más norteña, donde se encontró un valor de 35.31, hasta la zona del umbral, registrando un valor de 35.08 y nuevamente aumentó hacia la parte sur a 35.21 (Figura 6b). Debajo de los 300 m se detectó una fuerte estratificación de la columna de agua. La isohalina de 35.1 (Figura 3b) mostró un flujo de agua menos salada hacia la superficie en la E14 y en zona de

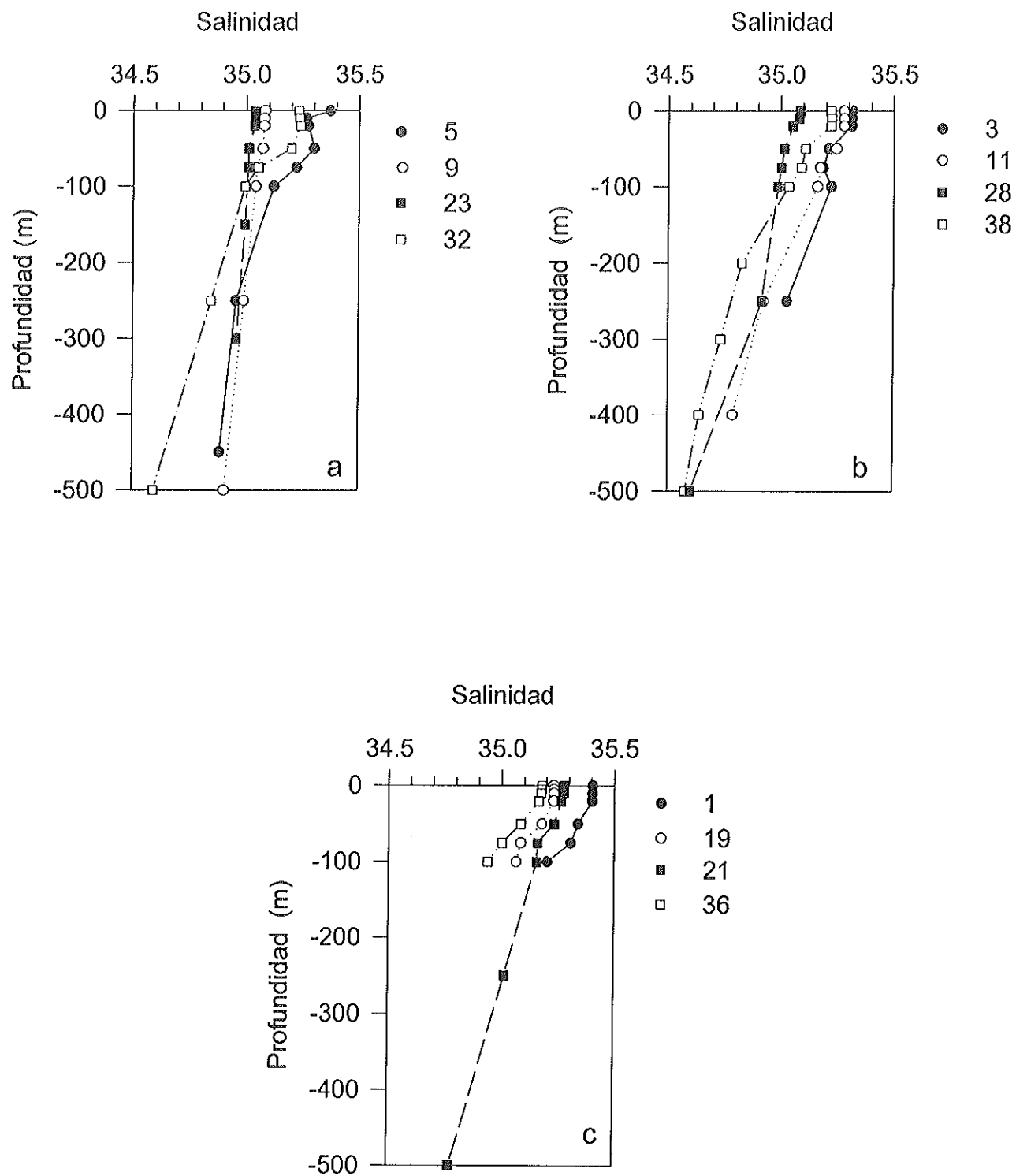


Figura 6. Distribución vertical de salinidad en algunas estaciones seleccionadas de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora.

umbral. Esta isohalina se detectó sobre la superficie en estas zonas, mientras que en las estaciones del norte del umbral se encontró a ~100 m de profundidad. También se observó que el agua es más salada hacia el norte del umbral que en la parte sur del umbral.

La salinidad superficial fue de 35.40 en el extremo norte del transecto paralelo a las costas de Sonora y decrece hacia la E26, donde se encontró un valor de 35.13. En el extremo sur la salinidad aumentó nuevamente, observándose un valor de 35.17. Este valor fue menor que el del extremo norte (Figura 6c). Este transecto presentó los valores más altos de salinidad superficial de todo el muestreo. En el extremo norte de este transecto también se detectó la presencia de un frente de salinidad. La isohalina de 35.2 (Figura 3c) mostró un flujo de agua salada hacia la superficie, esta se encontró a 100 m en el extremo norte del transecto y en la superficie de la E26.

La figura 7 y 8 muestran los rasgos más sobresalientes de la distribución vertical del oxígeno y del porcentaje de saturación, respectivamente a lo largo de los tres transectos. El comportamiento del oxígeno fue típico con concentraciones elevadas en la superficie que disminuyen hacia el fondo. En el transecto paralelo a la costa de BC, el valor de oxígeno superficial disminuyó de 271 μM en la estación del norte a 202.3 μM en la zona del umbral y aumentó hacia la estación sur, donde el valor de oxígeno fue de 266 μM . La figura 7a en la estación del Canal de Ballenas (E9) presentó un perfil homogéneo con respecto a las otras estaciones, lo cual refleja el efecto que tiene la mezcla vertical sobre la concentración de oxígeno. Las isolíneas de oxígeno del Canal

de Ballenas y de la zona del umbral (Figura 9a) sugieren un transporte de agua del fondo con concentraciones bajas de oxígeno hacia la superficie. En el extremo sur se observó nuevamente la estratificación con altos valores de oxígeno en las capas superficiales y subsuperficiales, y con menor contenido de oxígeno hacia el fondo; en donde las concentraciones alcanzaron valores entre $78.3 \mu\text{M}$ en el Canal de Ballenas y $17.9 \mu\text{M}$ en la estación del sur a 500 m de profundidad.

En el transecto central del GC, el valor del oxígeno superficial disminuyó desde un valor de $263.2 \mu\text{M}$ en la E3 hasta una concentración de $203.8 \mu\text{M}$ en las estaciones de la zona del umbral y, posteriormente, aumentó hacia la estación del sur donde se registró un valor de $245.7 \mu\text{M}$. Esta última estación se encontró más estratificada en comparación al resto de las estaciones presentando altos valores en la superficie y muy bajos hacia el fondo (Figura 7b). Las isolíneas muestran que, a excepción de la E14 y en la zona del umbral, en el resto del transecto el oxígeno se encontró estratificado (Figura 9b). En la E14 y en la zona del umbral, los perfiles de oxígeno presentaron agua con menor concentración de oxígeno en la superficie y mayor contenido de oxígeno en el fondo en comparación a las otras estaciones, indicando que en estas zonas se observó un flujo de agua hacia la superficie.

El valor superficial de oxígeno sobre las costas de Sonora tiene variaciones muy pequeñas, del extremo norte hacia el Canal Tiburón el valor superficial se encuentra $\sim 270 \mu\text{M}$, mientras que en la E36 el valor fue de $315.3 \mu\text{M}$ (Figura 7c). En el Canal Tiburón se observó la isolínea de $200 \mu\text{M}$ a 100 m de profundidad,

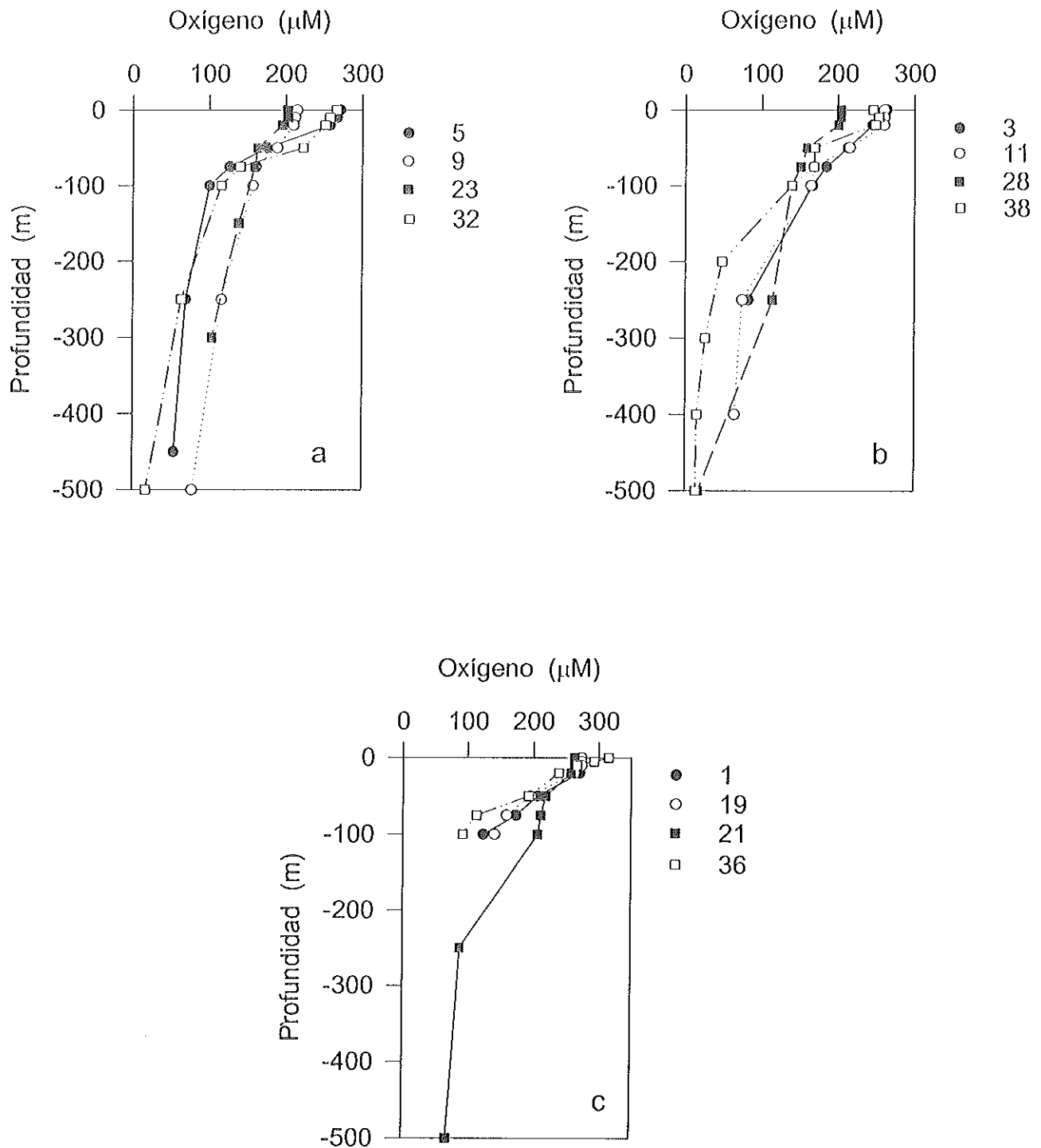


Figura 7. Distribución vertical de oxígeno en algunas estaciones seleccionadas de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora.

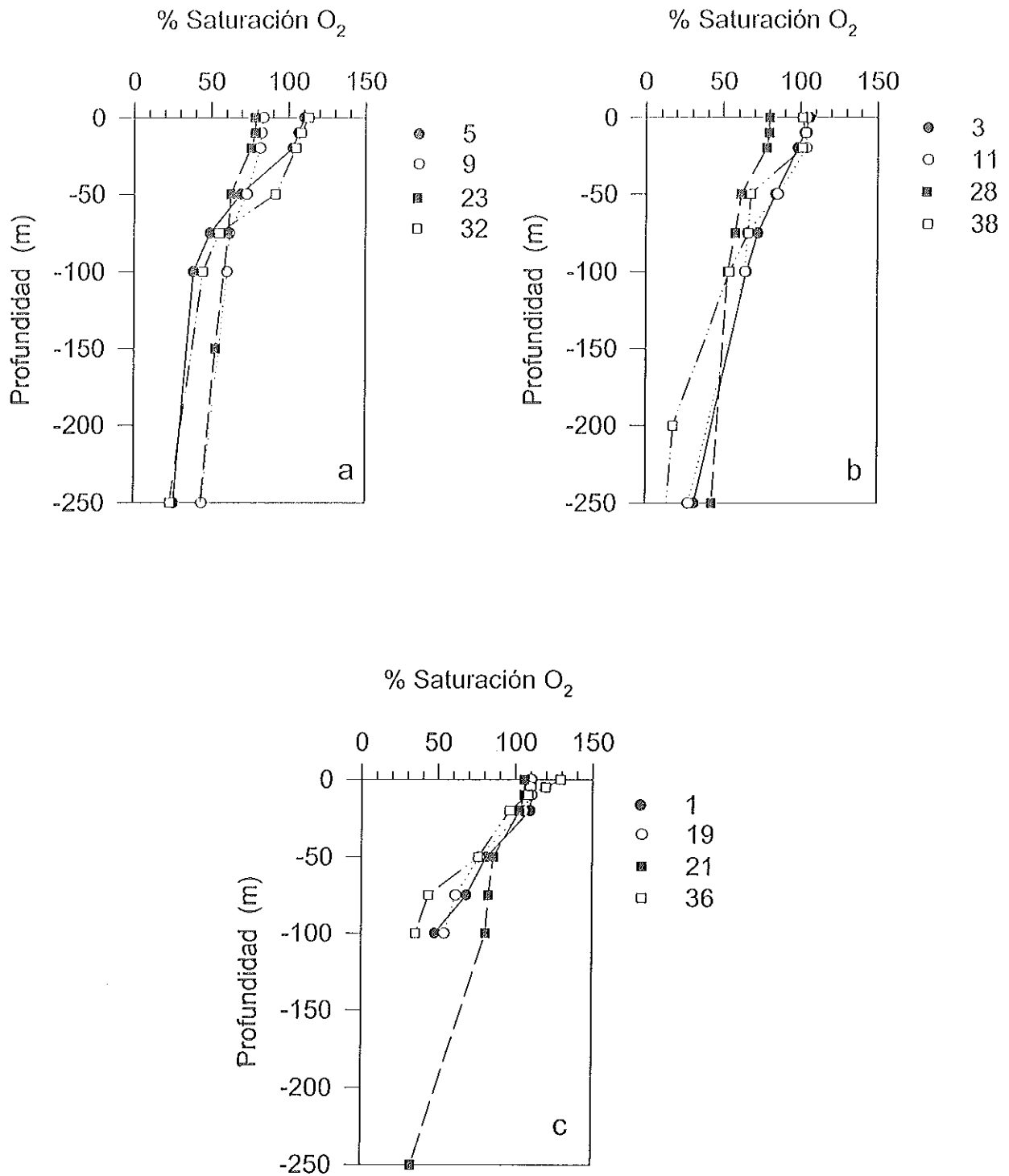


Figura 8. Distribución vertical del porcentaje de saturación de oxígeno en algunas estaciones seleccionadas de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora.

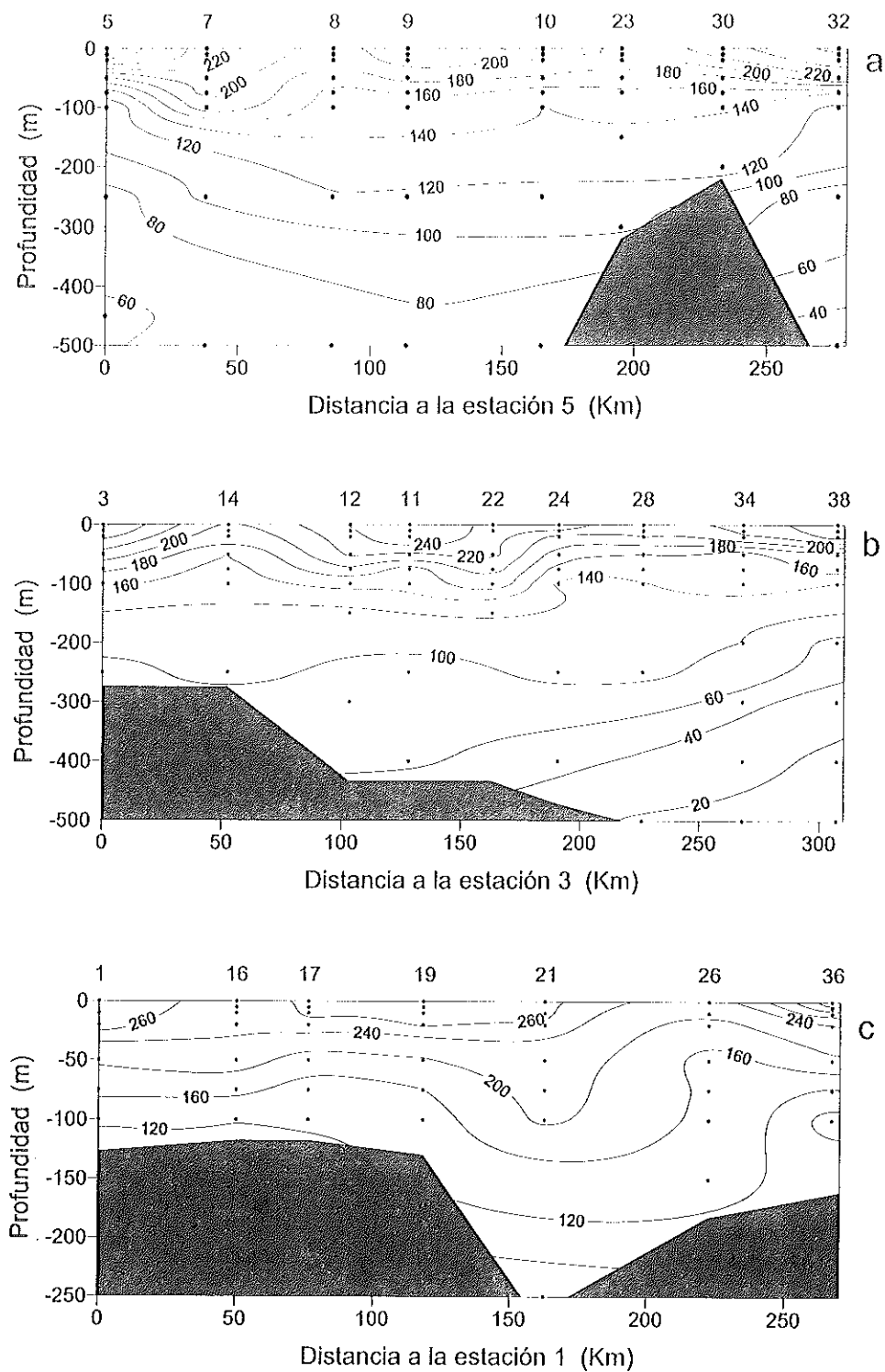


Figura 9. Distribución vertical y horizontal de oxígeno (μM) en los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora. Los números de la parte superior indican las estaciones de muestreo. Nótese la escala de profundidad en c.

sin embargo, en las estaciones del norte se encontró a 50 m (Figura 9c). En la E26 se presentó un flujo de agua del fondo hacia la superficie. En esta estación se encontró agua con menor contenido de oxígeno a lo largo de la columna de agua en comparación al resto de las estaciones a la misma profundidad, por ejemplo, a 20 m en E26 la concentración del oxígeno es de $160 \mu\text{M}$ mientras que en la estación del norte a la misma profundidad el valor de oxígeno es de $260 \mu\text{M}$.

6.2 Distribución vertical de los Nutrientes

Distribución vertical del PO_4

El fosfato presentó perfiles con un comportamiento típico, tipo nutriente, con valores menores en la superficie y mayores en las aguas profundas (figura 10). Este comportamiento fue marcado en las estaciones del norte y sur del área de estudio, mientras que los perfiles situados en el Canal de Ballenas y en la zona del umbral, cambiaron la forma típica a perfiles homogéneos. A nivel superficial, la concentración de fosfato a lo largo de la costa de Baja California (figura 10a) aumentó de $1.8 \mu\text{M}$ en el extremo norte (E5) a $2.59 \mu\text{M}$ en el Canal de Ballenas (E8) y posteriormente disminuyó hasta $1.3 \mu\text{M}$ hacia el sur (E32).

La mayor variabilidad de fosfatos entre los perfiles de las diferentes estaciones se detectó en los primeros 100 m. Debajo de esta profundidad la concentración de fosfato aumentó hacia el fondo con una variación mínima entre perfiles. De manera general, los perfiles que se muestrearon en el Canal de Ballenas y en la zona del umbral fueron homogéneos a lo largo de la columna de

agua. La diferencia de concentración de fosfato entre 0 y 300 m de profundidad en el Canal de Ballenas fue de $0.39 \mu\text{M}$ y de $0.8 \mu\text{M}$ en la zona del umbral, respectivamente; mientras que en la E38, ubicada al sur del las islas, la diferencia fue de $1.2 \mu\text{M}$ a las mismas profundidades.

La distribución vertical de fosfato en el transecto central del golfo mostró que la concentración superficial aumentó de $1.78 \mu\text{M}$ en el extremo norte a $2.41 \mu\text{M}$ hacia la zona del umbral y disminuyó nuevamente a $1.39 \mu\text{M}$ hacia el sur (figura 10b). En los primeros 100 m se detectaron las concentraciones máximas en la zona del umbral y las mínimas en las estaciones del sur. A excepción del perfil muestreado en la zona del umbral todos los perfiles obtenidos en este transecto mostraron la forma típica, es decir, valores bajos en la superficie y altos hacia el fondo. El único perfil que presentó una estructura homogénea fue el muestreado en la región del umbral (E28), lo cual sugiere una fuerte influencia de los procesos físicos sobre los fosfatos en esta zona.

En el transecto muestreado a lo largo de las costas de Sonora se observó que el comportamiento de los fosfatos en la superficie fue diferente al que se presentó en los otros dos transectos. Las concentraciones superficiales máximas se registraron en la E19 y E26, con valores de 1.89 y $1.88 \mu\text{M}$, respectivamente (figura 10c). El resto de las estaciones presentaron una concentración superficial de alrededor de $1.5 \mu\text{M}$. En la Canal Tiburón los valores registrados entre los 50-100 m fueron menores comparados con el resto de los perfiles a la misma profundidad. En este perfil se encontró un valor de $2.88 \mu\text{M}$ a 500 m, sin

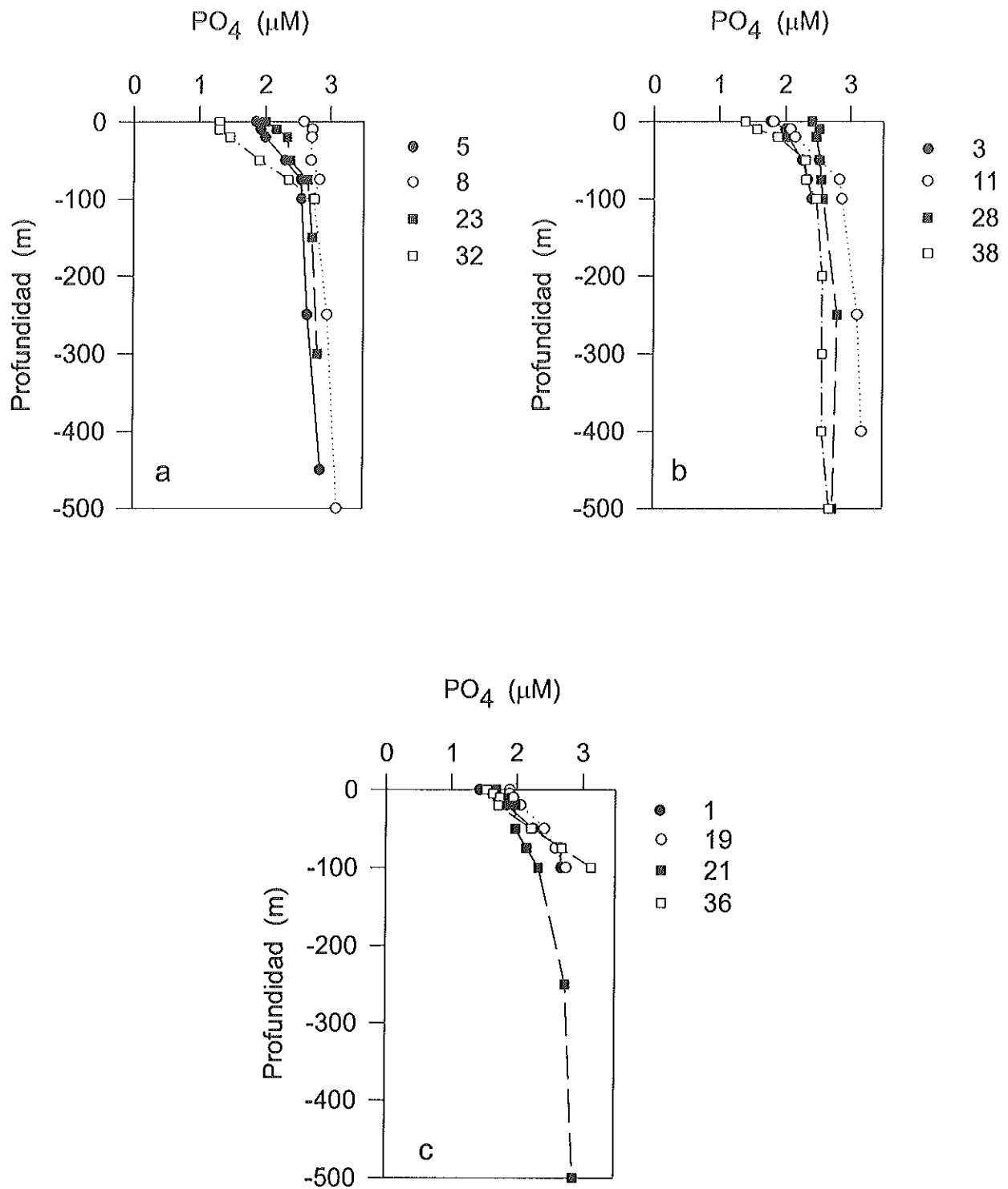


Figura 10. Distribución vertical de fosfatos en algunas estaciones seleccionadas de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora.

embargo, el valor máximo registrado a lo largo del transecto fue de $3.13 \mu\text{M}$ a 100 m en la estación del sur.

Distribución horizontal de PO_4

En el transecto paralelo a Baja California se observó una columna de agua estratificada en los primeros 100 m tanto en la región norte como en la región sur del área de estudio (Figura 11a). En la parte norte, los 50 m superficiales presentaron concentraciones de fosfato mayores que en la parte sur. Sin embargo, debajo de esta profundidad las concentraciones fueron menores en la parte norte y mayores en el sur. En el extremo norte de este transecto, la isolínea de $2.6 \mu\text{M}$ se encontró por debajo de los 100 m, mientras que en el Canal de Ballenas apareció prácticamente en la superficie, indicando la presencia de agua con mayor cantidad de fosfato en la superficie de esta provincia hidrográfica (Figura 11a). Un evento similar se observó en la zona del umbral, ya que la isolínea de $2.2 \mu\text{M}$ se encontró a 75 m en el extremo sur, mientras que en la zona del umbral se presentó cerca de la superficie. Debajo de los 100 m, desde la parte norte hacia la zona del umbral se observó pequeñas variaciones en la concentración de fosfato a lo largo del transecto.

La distribución vertical de fosfato en el transecto central (E3 – E38) del área de estudio presentó una mayor estratificación en el extremo sur que en el norte. Como se mencionó anteriormente, en la zona norte se presentaron valores mayores de fosfatos en los primeros 100 m comparados con los encontrados en el sur a la misma profundidad (Figura 11b). Sin embargo, de

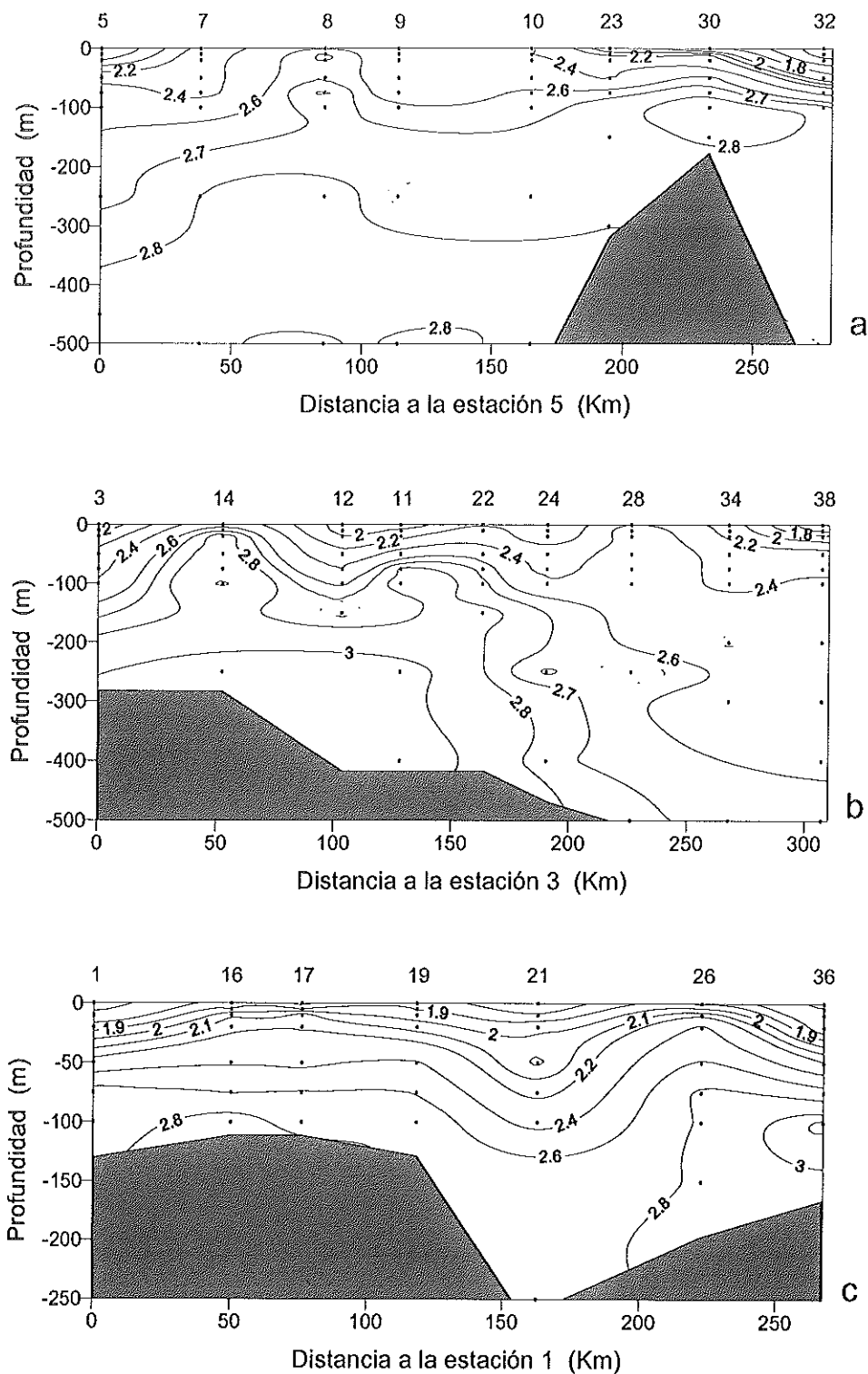


Figura 11. Distribución vertical y horizontal de fosfatos (μM) en los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora. Los números de la parte superior indican las estaciones de muestreo. Nótese la escala de profundidad en c.

manera general se presentó una fuerte estratificación a lo largo de todo el transecto a excepción de la E14 y de la zona del umbral, donde se observó un desplazamiento de agua con mayor cantidad de nutrientes del fondo hacia la superficie, por lo que la isolínea de $2.6 \mu\text{M}$ se encontró en la superficie de la E14, mientras que en el norte las concentraciones fueron menores a 100 m de profundidad. En la región del umbral un comportamiento muy similar se observó con la isolínea de $2.4 \mu\text{M}$ ya que mientras esta se encontró sobre la superficie en la zona del umbral, en el sur se observó a 100 m. Debajo de esta profundidad la estratificación fue menor y los valores hacia el norte del umbral fueron mayores que los de la zona sur del umbral, ya que valores cercanos a $3 \mu\text{M}$ se encontraron a 200 m de profundidad en la zona norte, mientras que en la zona sur del umbral, estas concentraciones se encontraron a partir de los 600 m.

En la costa de Sonora se observó una fuerte estratificación a lo largo de todo el transecto con excepción de la Canal Tiburón ya que después de los 100 m el valor de los fosfatos fue de $2.8 \mu\text{M}$ hasta los 500 m. Los valores a lo largo de la columna de agua fueron mayores en las estaciones del sur que en las del norte, también se presentó un suministro de agua con altos valores de fosfatos en la E26. Lo anterior se observó a través de la isolínea de $2.2 \mu\text{M}$ (Figura 11c), la cual se encontró a los 20 m mientras que en la zona sur fue observada a 50 m.

Distribución vertical del Si(OH)_4

Al igual que el fosfato, la distribución vertical del silicato presentó una distribución típica, tipo nutriente. En el transecto a lo largo de la costa de Baja California (figura 12a) el valor superficial aumentó de $14.74 \mu\text{M}$ en el norte a $40.22 \mu\text{M}$ en el Canal de Ballenas y posteriormente disminuyó a $4.42 \mu\text{M}$ en el extremo sur, por lo tanto, el valor superficial máximo se encontró en el Canal de Ballenas y el mínimo en la parte sur con una diferencia entre ambos valores de $35.8 \mu\text{M}$. Los perfiles presentan una mayor variación en los primeros 100 m, en esta capa los valores máximos fueron encontrados en el Canal de Ballenas y en la zona del umbral, los cuales son muy similares ($45.46 \mu\text{M}$), mientras que los valores mínimos fueron registrados en el sur. Debajo de los 100 m la variabilidad en la concentración de silicatos es menor en comparación a los primeros 100 m. El perfil más homogéneo de este transecto se detectó en el Canal de Ballenas y en la zona del umbral, pero no fueron tan marcados como los observados en los fosfatos.

La distribución vertical de silicato mostró en el transecto central del golfo (figura 12b) que el valor superficial aumentó de $16.39 \mu\text{M}$ en la parte norte a $30.98 \mu\text{M}$ en la zona del umbral y después disminuyó a $10.66 \mu\text{M}$ en la parte sur, por lo que el valor máximo superficial se encontró en la región del umbral y el mínimo en el extremo sur con una diferencia entre ellos de $20.32 \mu\text{M}$. A lo largo de todo el perfil se observó una alta variabilidad, pero las concentraciones más altas fueron registradas debajo de los 500 m donde los valores fueron mayores a

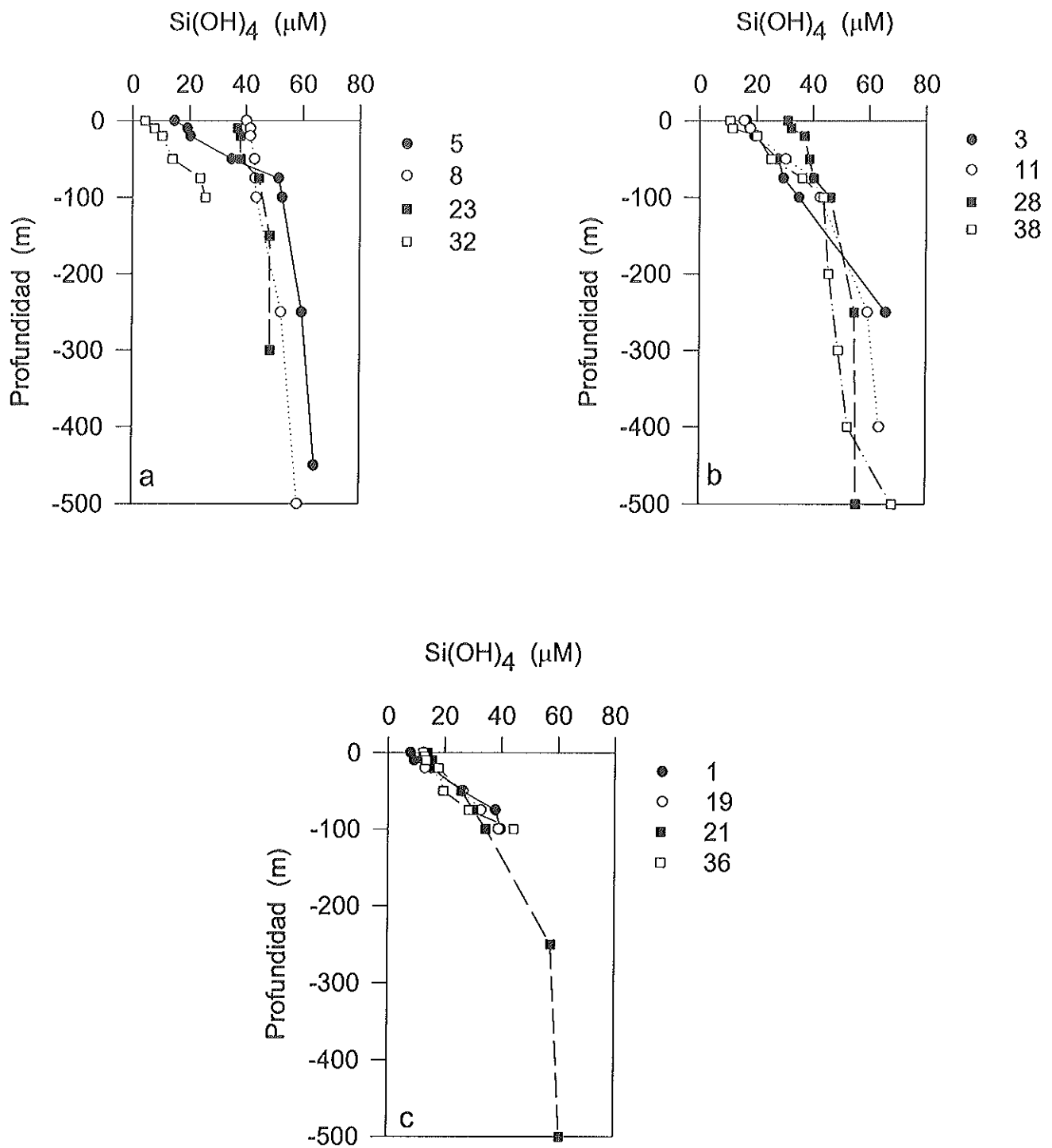


Figura 12. Distribución vertical de silicatos en algunas estaciones seleccionadas de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora.

60 μM . Y la concentración máxima medida fue de 101.58 μM a 1000 m en la parte sur.

En el transecto muestreado a lo largo de la costa de Sonora (figura 12c) se observó que el valor superficial aumentó de 7.7 μM en el extremo norte a 30.91 μM en la E17, el cual fue el valor superficial máximo encontrado a lo largo del transecto, posteriormente el valor superficial se mantiene alrededor de 12 μM hasta el Canal Tiburón, pero nuevamente el valor superficial aumentó en la E26 a 19.9 μM y finalmente en el extremo sur la concentración encontrada fue similar a la que se presentó en el Canal Tiburón. A 100 m de profundidad se registró el valor máximo en la parte sur mientras que el mínimo fue encontrado en el Canal Tiburón, pero a 500 m de profundidad en este canal se detectó el valor máximo de todo el transecto, siendo este de 60.83 μM .

Distribución horizontal de $\text{Si}(\text{OH})_4$

En ambos extremos del transecto paralelo a Baja California se observó una mayor variabilidad en la concentración de silicatos, mientras que a lo largo del Canal de Ballenas y hasta la zona del umbral se detectó claramente valores similares a lo largo de la columna de agua (figura 13a). Los dos extremos del transecto están estratificados, sin embargo, la parte norte mostró valores más altos de silicatos con respecto a los de la parte sur. En la parte norte se encontró a 50 m una concentración de 30 μM y a 100 m un valor de 50 μM , mientras que a las mismas profundidades en la parte sur la concentración que se encontró fue de 15 y 25 μM respectivamente. En el Canal de Ballenas se observó la

presencia de agua con alto contenido de silicato en la superficie, la concentración encontrada fue de $\sim 40 \mu\text{M}$ mientras que en el extremo norte esta concentración fue detectada a 75 m. Un comportamiento similar se observó en la zona del umbral ya que en la superficie la concentración fue de $35 \mu\text{M}$ mientras que en la zona sur la isolinéa de $35 \mu\text{M}$ no se detectó debido a que la profundidad máxima muestreada fue a los 100 m. A esta profundidad se registró un valor de silicatos de $\sim 25 \mu\text{M}$. Debajo de los 100 m desde la zona norte hasta la región del umbral se observó una columna de agua altamente mezclada con una variación de alrededor de $10 \mu\text{M}$ desde los 100 m hasta los 1000 m de profundidad.

En la parte central del golfo se observó un transecto estratificado en los primeros 100 m, pero en la E14 y en la zona del umbral esta estratificación fue menos intensa (figura 13b). En los primeros 50 m del extremo norte los valores de silicatos fueron mayores a los que se encontraron en la parte sur, sin embargo, después de los 50 m y hasta los 100 m los valores más altos se presentaron en el extremo sur. En la E14 y en la zona del umbral se observó un flujo de agua con alta concentración de silicatos hacia la superficie siendo estos de 40 y $30 \mu\text{M}$ respectivamente. Debajo de los 100 m la estratificación es menos marcada y los valores van de $40 \mu\text{M}$ a 100 m hasta $60 \mu\text{M}$ a 800 m en la zona del umbral. El extremo sur es una zona profunda por lo que a 1000 m el valor de silicato registrado fue de $\sim 102 \mu\text{M}$.

En la costa de Sonora se observó, en ambos extremos se encontró una columna de agua estratificada (figura 13c), pero en el extremo sur se

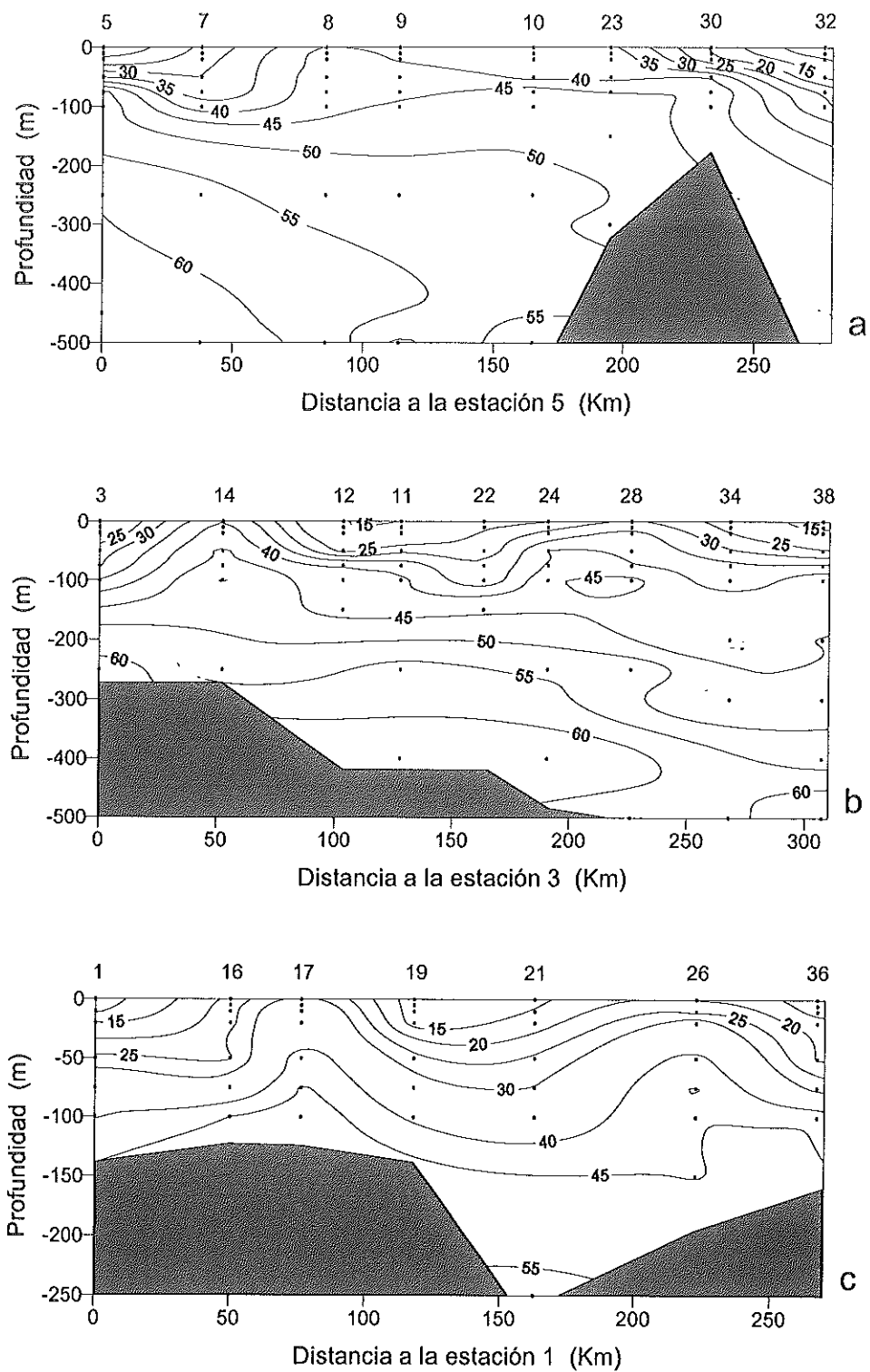


Figura 13. Distribución vertical y horizontal de silicatos (μM) en los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora. Los números de la parte superior indican las estaciones de muestreo. Nótese la escala de profundidad en c.

encontraron los valores más altos de los dos extremos. En la E17 y del Canal Tiburón hasta la E26 se observó un flujo de agua con alto contenido de silicato hacia la superficie llegando a encontrar $30 \mu\text{M}$ en la superficie en la E17, mientras que en el norte este valor se encontró a 60 m. En la E26 el valor superficial encontrado fue de $20 \mu\text{M}$, mientras que este valor en el sur se encontró a 50 m. Debajo de los 200 m y hasta los 500 m en el Canal Tiburón se observó una columna de agua mezclada con una diferencia de $5 \mu\text{M}$.

Distribución vertical de NO_3

Los nitratos presentaron una tendencia general en la concentración superficial, valores altos en las zonas de mezcla y valores bajos en las zonas estratificadas como se muestra en la figura 14. Por ejemplo en la estación norteña (E5) de la costa de Baja California se encontró un valor superficial de $9.01 \mu\text{M}$ y el valor mínimo superficial se encontró en la estación del sur (E32), el cual fue de $5.05 \mu\text{M}$, mientras que en el interior del Canal de Ballenas (E8) la concentración superficial fue de $20.77 \mu\text{M}$ y en la zona del umbral de $18.38 \mu\text{M}$ (figura 14a). La distribución vertical de este nutriente mostró que a lo largo de las costas de BC hubo una diferencia muy marcada en las concentraciones de nitratos en los primeros 100 m. El Canal de Ballenas presentó concentraciones elevadas a lo largo del perfil vertical, presentando así mayor homogeneidad, mientras que en los perfiles del norte y sur se observó una distribución tipo nutriente muy marcado, con valores bajos en la superficie y mayores hacia el fondo.

En el transecto central del golfo se encontró que los valores superficiales de nitratos aumentaron de $11.97 \mu\text{M}$ en la estación norteña a la región del umbral, donde la concentración de nitratos fue de $16.39 \mu\text{M}$, mientras que en la estación del sur se observó la concentración mínima superficial siendo esta de $6.48 \mu\text{M}$ (figura 14b). La diferencia del valor superficial entre el valor máximo encontrado en la región del umbral y la estación sureña fue de $9.91 \mu\text{M}$. Aunque tanto hacia el norte como hacia el sur del umbral se detectaron valores bajos, en comparación a la región del umbral, las concentraciones de la región norte fueron mayores que las del sur en los primeros 100 m. El perfil más homogéneo se encontró en la E28, la cual fue ubicada en la región del umbral y presentó las concentraciones más elevadas a lo largo de todo el transecto, sin embargo, el valor máximo profundo fue de $38.89 \mu\text{M}$, registrado a 1000 m en la estación del sur.

En el transecto muestreado a lo largo de la costa de Sonora se observó que el valor superficial se mantuvo alrededor de $9 \mu\text{M}$ desde la estación del norte hacia el Canal Tiburón aumentando a $12.67 \mu\text{M}$ en la E26 y posteriormente este valor disminuyó a $5.8 \mu\text{M}$ en la estación del sur (figura 14c). Por lo tanto, la diferencia entre el valor máximo y mínimo superficial fue de $6.87 \mu\text{M}$. A 100 m de profundidad se observó que el valor máximo se presentó en la estación del norte mientras que el mínimo se observó en el Canal Tiburón, sin embargo, el valor máximo encontrado en este transecto fue de $26 \mu\text{M}$ localizado a 250 m en el Canal Tiburón.

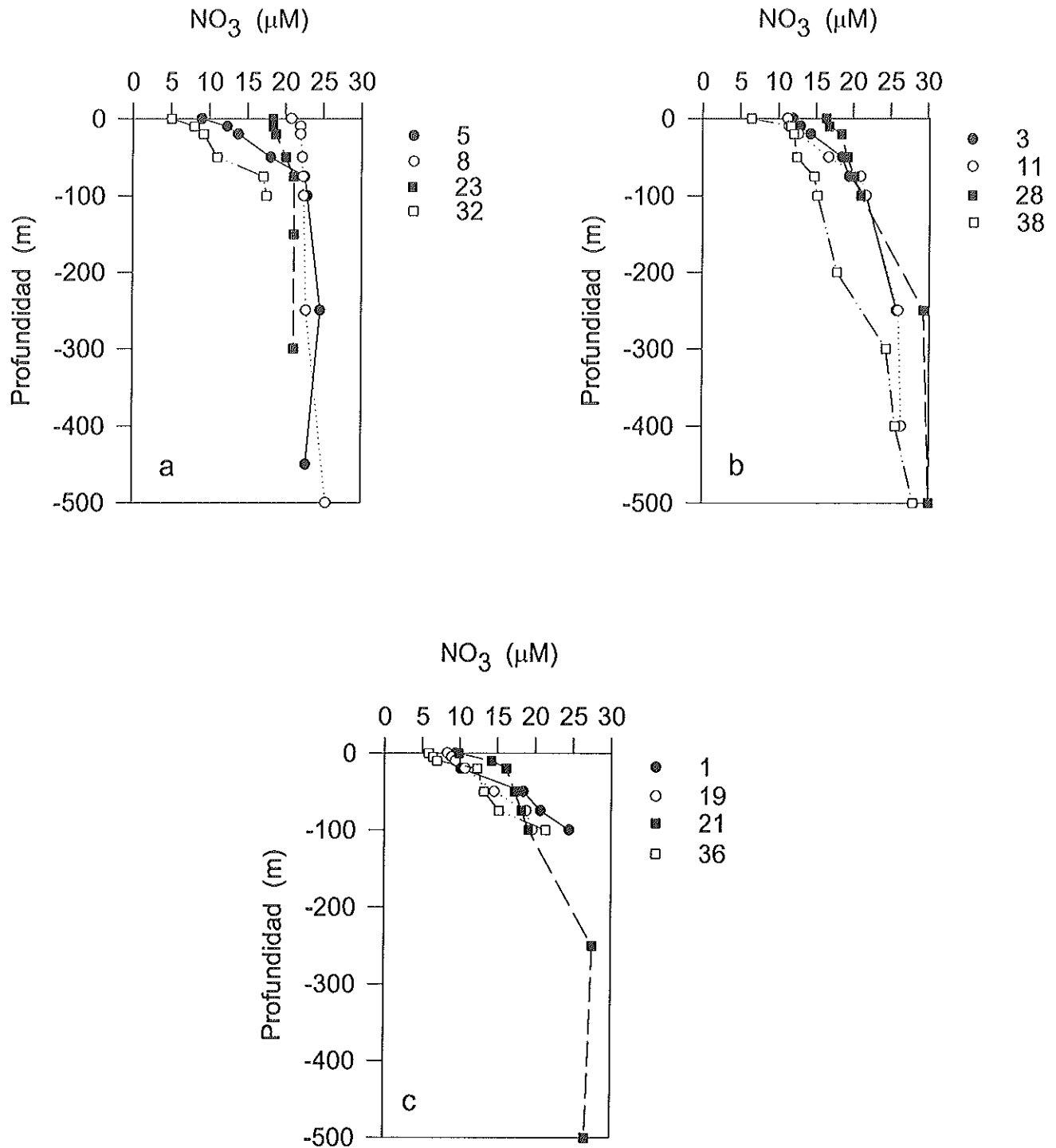


Figura 14. Distribución vertical de nitratos en algunas estaciones seleccionadas de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora.

Distribución horizontal de NO₃

En el transecto paralelo a BC se observó una mayor estratificación hacia las estaciones del norte y sur (figura 15a), pero con una estratificación mas elevada en las estaciones del norte en los primeros 100 m, mientras que en el interior del Canal de Ballenas las isolíneas de mayor concentración (21 μM) fue encontrada en la superficie. De igual manera en la zona del umbral, se observó la isolínea de 18 μM en la superficie, pero en las estaciones del sur fue encontrada a 50 y 100 m de profundidad. Debajo de esta profundidad la columna de agua se encontró menos estratificada y con una fuerte mezcla a lo largo del Canal de Ballenas, en donde la concentración de nitrato se observó $\sim 22 \mu\text{M}$ hasta los 500 m. Los valores máximos medidos fueron de 38 μM a 1000 m de profundidad en la zona sur.

A lo largo del transecto central del golfo se observó una mayor estratificación en comparación a la costa de Baja California (figura 15b), sin embargo, también mostró un comportamiento semejante debido a que se observó mayor estratificación hacia el norte y sur del umbral, en esta última región se encontró la mínima concentración de nitrato a lo largo de todo el perfil. En la E14 y en la zona del umbral se observó agua con mayor contenido de nitrato cerca de la superficie, en estas zonas la isolínea de 16 μM se encontró en la superficie mientras que en la estación del norte se encontró entre los 50 y 75 m y debajo de los 100 m en las estaciones del sur.

Sobre la costa de Sonora se observó que las menores concentraciones fueron encontradas en la parte sur y ligeramente mayores en la zona norte

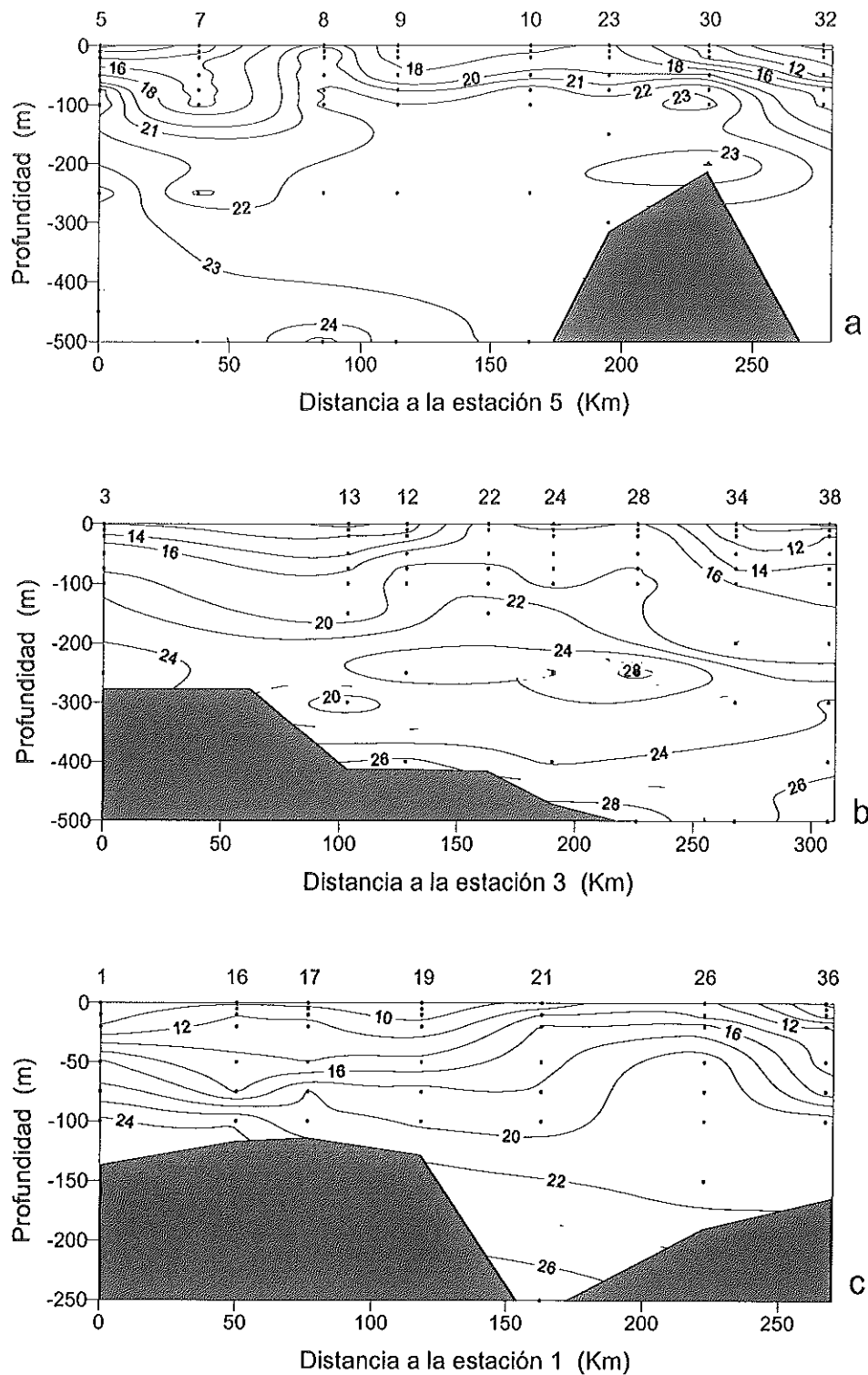


Figura 15. Distribución vertical y horizontal de nitratos (μM) en los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora. Los números de la parte superior indican las estaciones de muestreo. Nótese la escala de profundidad en c.

(figura 15c). En la E26 se observó un flujo de agua con alto contenido de nitratos hacia la superficie. En esta zona la isolínea de $12 \mu\text{M}$ se encontró en la superficie, mientras que en la zona norte y sur fue observada a 20 m. Debajo de los 250 m en la Cuenca Tiburón la concentración de nitratos es generalmente uniforme.

Distribución vertical NO_2

En el transecto paralelo a la costa de Baja California se observó que a excepción de la E8, localizado en el Canal de Ballenas, el valor superficial aumenta hacia el sur (figura 16a). En el norte el valor superficial que se encontró fue de $0.32 \mu\text{M}$ y aumentó a $0.44 \mu\text{M}$ en el extremo sur, por lo tanto, el valor superficial máximo de nitrito se encontró en la estación del sur, pero el valor mínimo no se encontró en el norte, este se detectó en el Canal de Ballenas (E8). En esta zona el perfil mostró un comportamiento más homogéneo a lo largo de la columna de agua comparado con el resto de los perfiles. En todos los perfiles se presentó un máximo subsuperficial entre 20-50 m con valores de $0.2\text{-}0.7 \mu\text{M}$. Debajo de los 50 m el valor disminuye drásticamente hacia los 100 m y a partir de esta profundidad la concentración disminuye con la profundidad y además con menor variabilidad. Se observó que en el fondo al igual que en la superficie hay mayor cantidad de nitritos en la parte sur que en el Canal de Ballenas, pero la diferencia es menor en comparación con la parte superficial, ya que a 500 m hay una diferencia entre ambas zonas de $0.14 \mu\text{M}$, mientras que en la superficie la diferencia fue de $0.18 \mu\text{M}$.

En el transecto central del golfo se observó que el valor superficial, con excepción de la E11, aumentó hacia el sur, encontrando así el valor mínimo en la E11 y el máximo en la zona sur (figura 16b). En el norte, el valor superficial registrado fue de $0.34 \mu\text{M}$ y aumentó a $0.54 \mu\text{M}$ en el sur. Todos los perfiles presentaron un máximo subsuperficial entre 20-75 m con valores de $0.2\text{-}0.5 \mu\text{M}$, disminuyendo de manera drástica hacia los 100 m, a esta profundidad el valor máximo se encontró en la zona del umbral de $0.20 \mu\text{M}$ y el mínimo en la parte sur con $0.04 \mu\text{M}$. Debajo de los 100 m los valores decrecen con la profundidad y a los 500 m tanto los valores de la zona del umbral como los de la parte sur se encontraron cerca del límite de detección, este valor se mantiene hasta los 900 m en la parte sur, sin embargo, a 1000 m el valor aumentó a $0.1 \mu\text{M}$.

A lo largo de la costa de Sonora, el valor superficial aumenta hacia la E19 y posteriormente disminuye hacia el Canal Tiburón para después aumentar nuevamente hacia el sur (figura 16c), por lo que el valor máximo fue encontrado en la zona sur, mientras que el mínimo se detectó en la zona norte y este mismo comportamiento se observó a 100 m. En el norte el valor superficial que se encontró fue de $0.29 \mu\text{M}$ y aumentó a $0.43 \mu\text{M}$ en la E19, este valor disminuye nuevamente a $0.31 \mu\text{M}$ en la Cuenca Tiburón y finalmente aumenta a 0.63 en el sur. Con excepción de la E19 todos los perfiles presentan un máximo subsuperficial, el cual fue observado a 10-50 m, con valores de $0.2\text{-}0.5 \mu\text{M}$. Hacia la profundidad del Canal Tiburón se observó que el valor de nitritos disminuye, encontrándose un valor cerca del límite de detección a los 500 m.

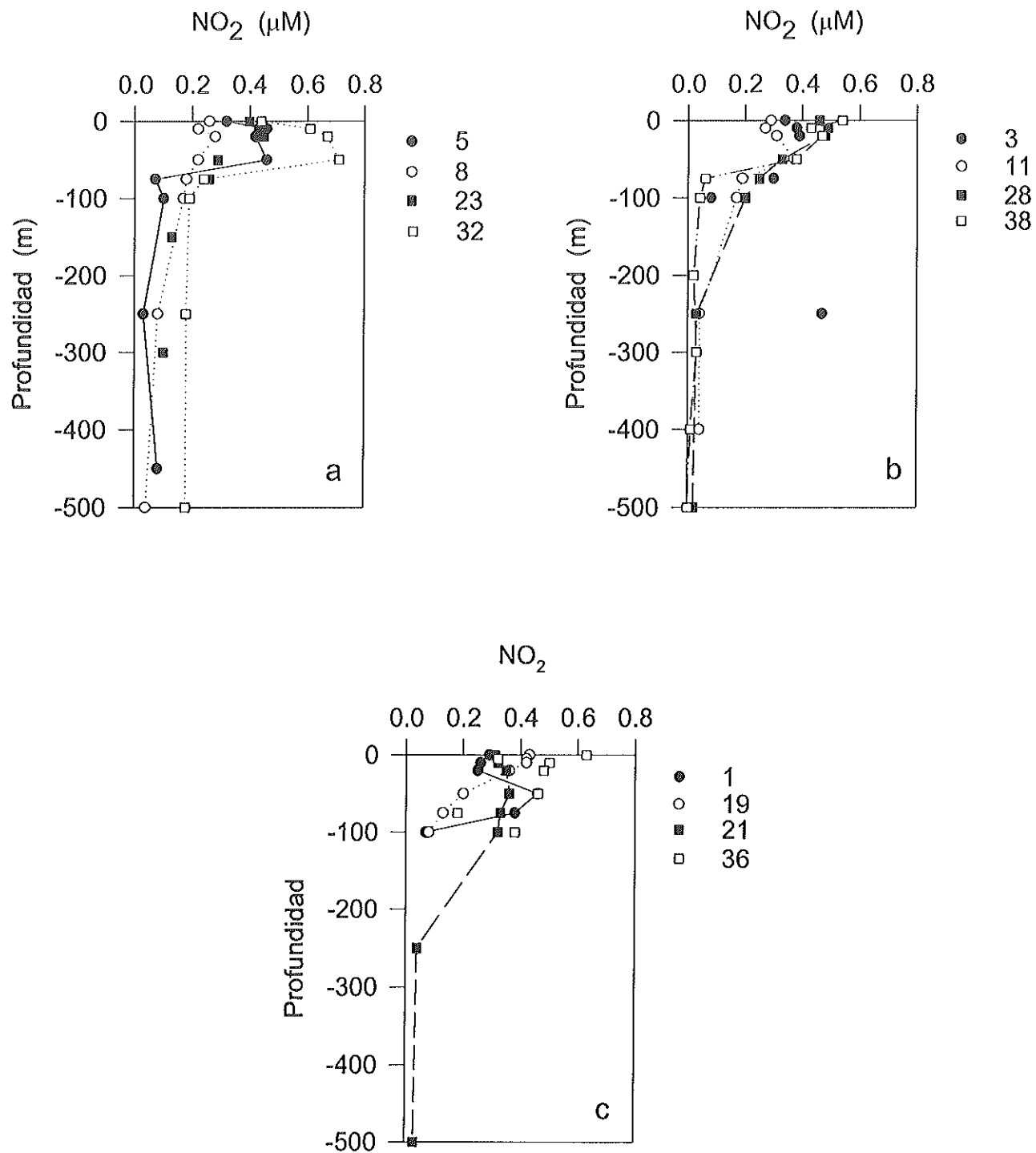


Figura 16. Distribución vertical de nitritos en algunas estaciones seleccionadas de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora.

Distribución horizontal de NO₂

La distribución horizontal de nitritos mostró que a lo largo de las costas de Baja California la mayor variación se encontró en los primeros 100 m (figura 17a). En el Canal de Ballenas y en la zona del umbral se observó un flujo de agua con mayor cantidad de este elemento hacia la superficie. Debajo de los 100 m desde el extremo norte y hasta la zona del umbral se encontró una columna de agua muy homogénea debido a que los valores oscilaron de 0.05 μM en la zona norte a 0.1 μM en el Canal de Ballenas. Además, se observó una diferencia entre el valor encontrado en el Canal de Ballenas y las estaciones del sur, ya que a la misma profundidad los valores de la zona sur fueron 0.05 μM más altos.

En el transecto central del GC se observó mayor concentración en la parte sur que en la parte norte en los primeros 100 m y la mayor concentración se encontró en la zona del umbral (figura 17b). Debajo de esta profundidad se registraron valores más altos en el extremo norte que en el resto del transecto ya que se encontraron valores de 0.15 y 0.1 μM a lo largo de la columna de agua. En las estaciones del sur se observó que debajo de los 300 m la columna fue homogénea y los valores que se encontraron fueron de 0.05 μM .

En la costa paralela a Sonora se encontraron los valores máximos en el sur y los mínimos en el norte (figura 17c). De la E17 a la E21 (Canal Tiburón) se presentó un flujo de agua hacia la superficie con valores altos de nitritos, por lo que las concentraciones encontradas en esta zona fueron mayores que las encontradas en el norte, pero menores a las registradas en el sur. Debajo de los

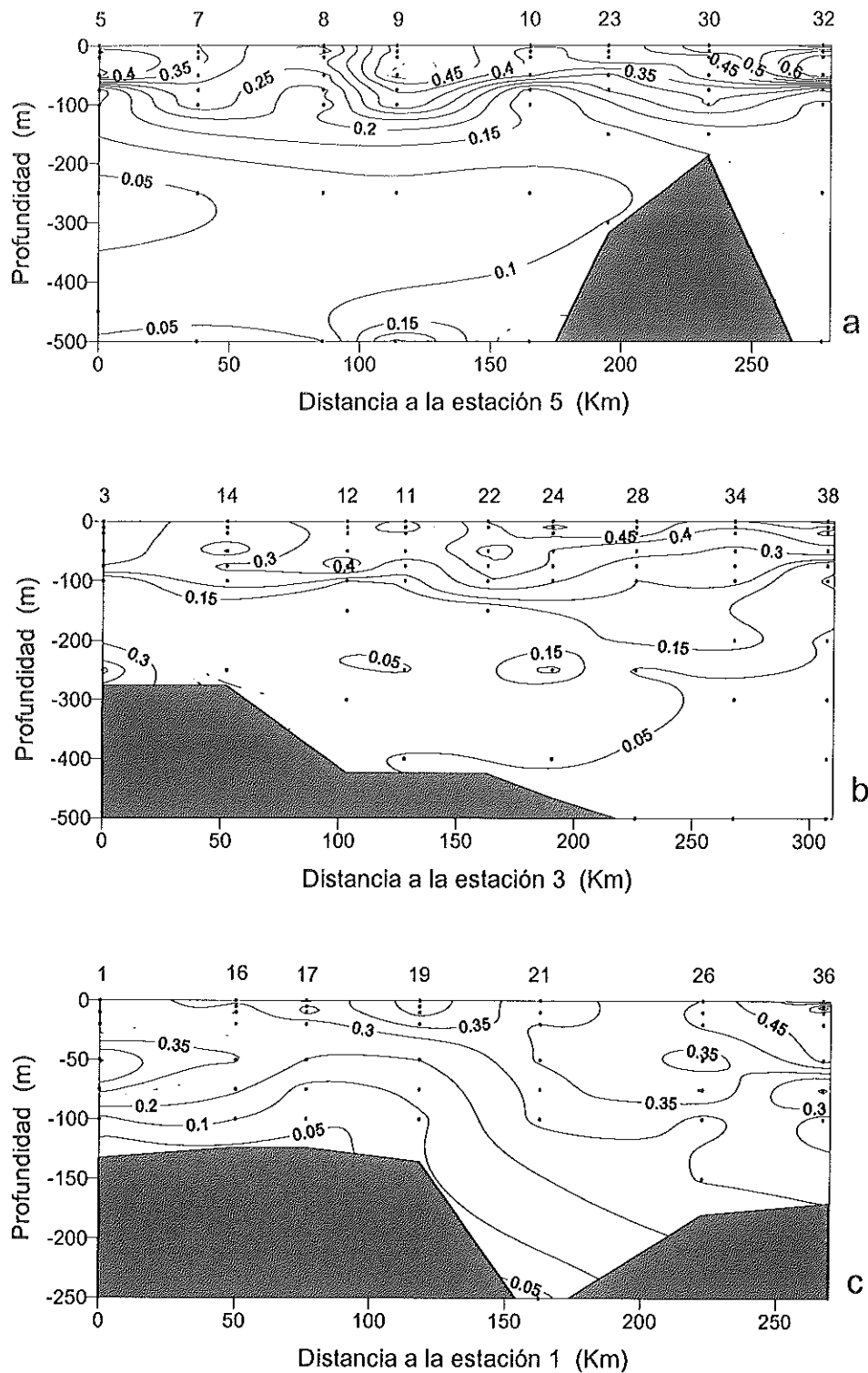


Figura 17. Distribución vertical y horizontal de nitritos (μM) de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora. Los números de la parte superior indican las estaciones de muestreo. Nótese la escala de profundidad en c.

200 m en la Cuenca Tiburón la columna se observó estable y la concentración encontrada fue de $0.05 \mu\text{M}$.

Distribución vertical de NH_4

El valor superficial del amonio disminuyó de $3.61 \mu\text{M}$ en la estación del norte a $1.25 \mu\text{M}$ en el Canal de Ballenas y posteriormente aumento al sur, donde se observó un valor superficial de $2.29 \mu\text{M}$ (figura 18a). En los primeros 100 m se muestra una variación muy marcada en cuanto al valor del amonio a lo largo del perfil; en todos se observó un máximo en la superficie, pero con excepción de la estación del sur también se observó un máximo a 50 m de profundidad. Debajo de los 100 m la concentración de amonio disminuyó mostrando una pequeña variación con la profundidad.

En el transecto central del golfo se observó que el valor de amonio superficial fue de alrededor de $1 \mu\text{M}$ hasta la zona del umbral y posteriormente aumentó hacia el extremo sur a $1.73 \mu\text{M}$ (figura 18b). En este transecto también se observó un máximo superficial y otro entre los 20 y 50 m con excepción de la E11. En el caso de la estación del sur también se observó un máximo profundo a 800 m, el cual fue mayor que los otros dos máximos, en este punto se midió una concentración de $\sim 4.84 \mu\text{M}$.

En el transecto muestreado a lo largo de la costa de Sonora la concentración superficial de amonio aumentó de $1.0 \mu\text{M}$ en el norte a $1.75 \mu\text{M}$ en la E19, posteriormente disminuyó a $1.07 \mu\text{M}$ en el Canal Tiburón y finalmente aumentó hacia el sur, donde se registró un valor de $3.11 \mu\text{M}$, por lo tanto, en

este transecto el valor máximo se encontró en el extremo sur y el mínimo en el norte (figura 18c). A excepción de la estación del norte (E1) donde se encontró un máximo a 5 m, todos muestran un máximo en la superficie, mientras que el segundo varió entre los 10 y 50 m. Debajo de los 100 m en el Canal Tiburón el valor de amonio disminuye conforme aumenta la profundidad.

Distribución horizontal de NH_4

A lo largo de las costas de Baja California se observaron valores superficiales altos de amonio, acentuándose estos valores en la E30, donde se encontraron los valores máximos en la parte superficial, en esta estación hacia el fondo, pegado al piso oceánico, los valores volvieron a aumentar (figura 19a). Desde la parte norte hasta la zona del umbral debajo de los 100 m, los valores de amonio fueron muy estables de alrededor de $0.2 \mu M$, pero hacia el fondo del Canal de Ballenas la concentración aumentó a $0.6 \mu M$ de los 800 a 1000 m.

En el transecto central del golfo se observó una variación en cuanto a la concentración de amonio en los primeros 100 m, mostraron valores más altos en la parte norte que en la parte sur, sin embargo, los valores más altos se encontraron en la zona del umbral, disminuyendo drásticamente en la E38 (figura 19b). Debajo de los 100 m se observó una columna de agua homogénea, pero en las estaciones del sur (E34 y E38) se observaron valores altos de hasta $\sim 3.8 \mu M$ hacia los 800 m en la E34 y 1000 m de profundidad en la E38.

En las costas de Sonora se observó una mayor concentración en la parte sur que en la norte a todo lo largo de la columna de agua (figura 19c), pero los

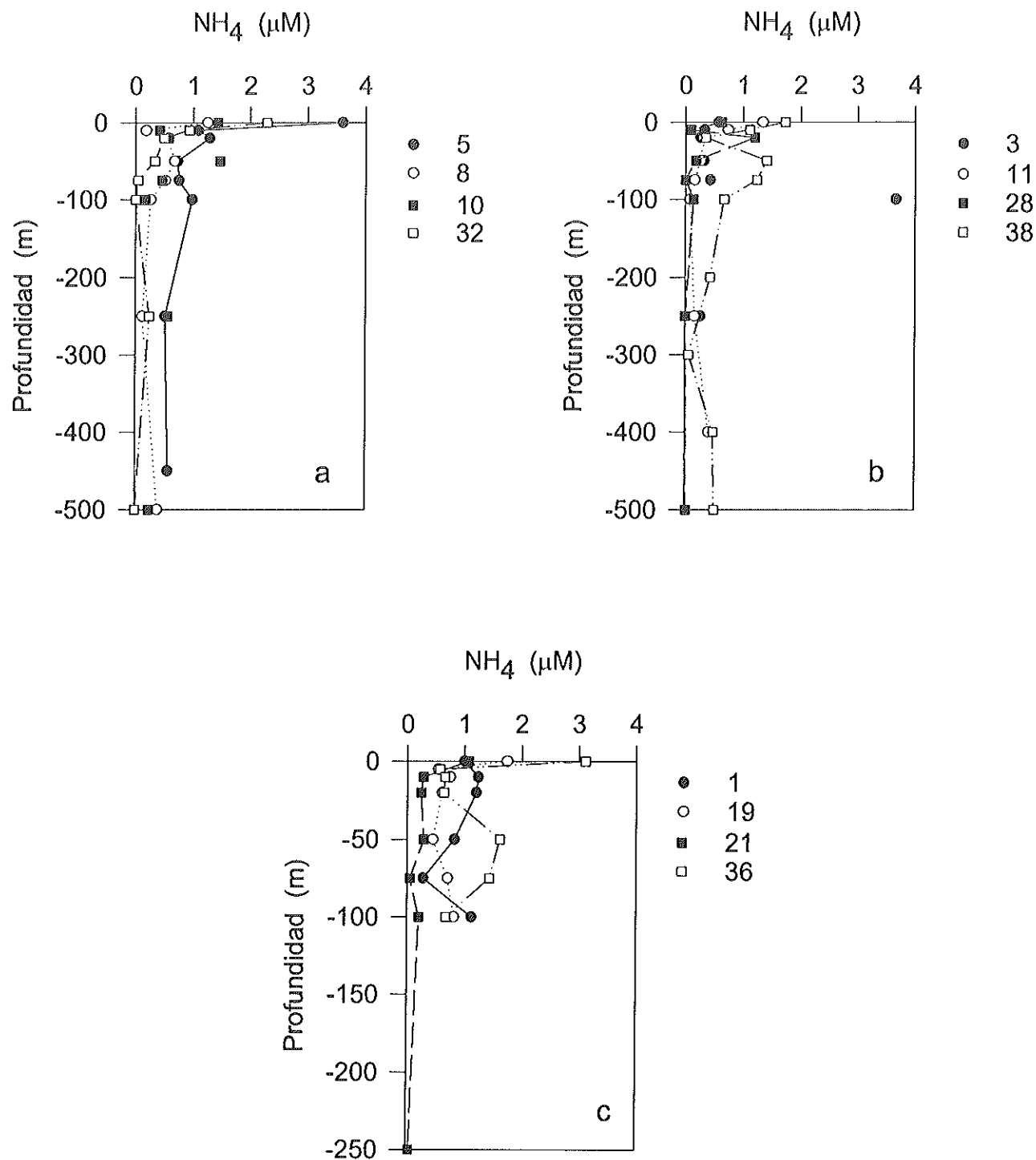


Figura 18. Distribución vertical de amonio en algunas estaciones seleccionadas de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora. Nótese la escala en c.

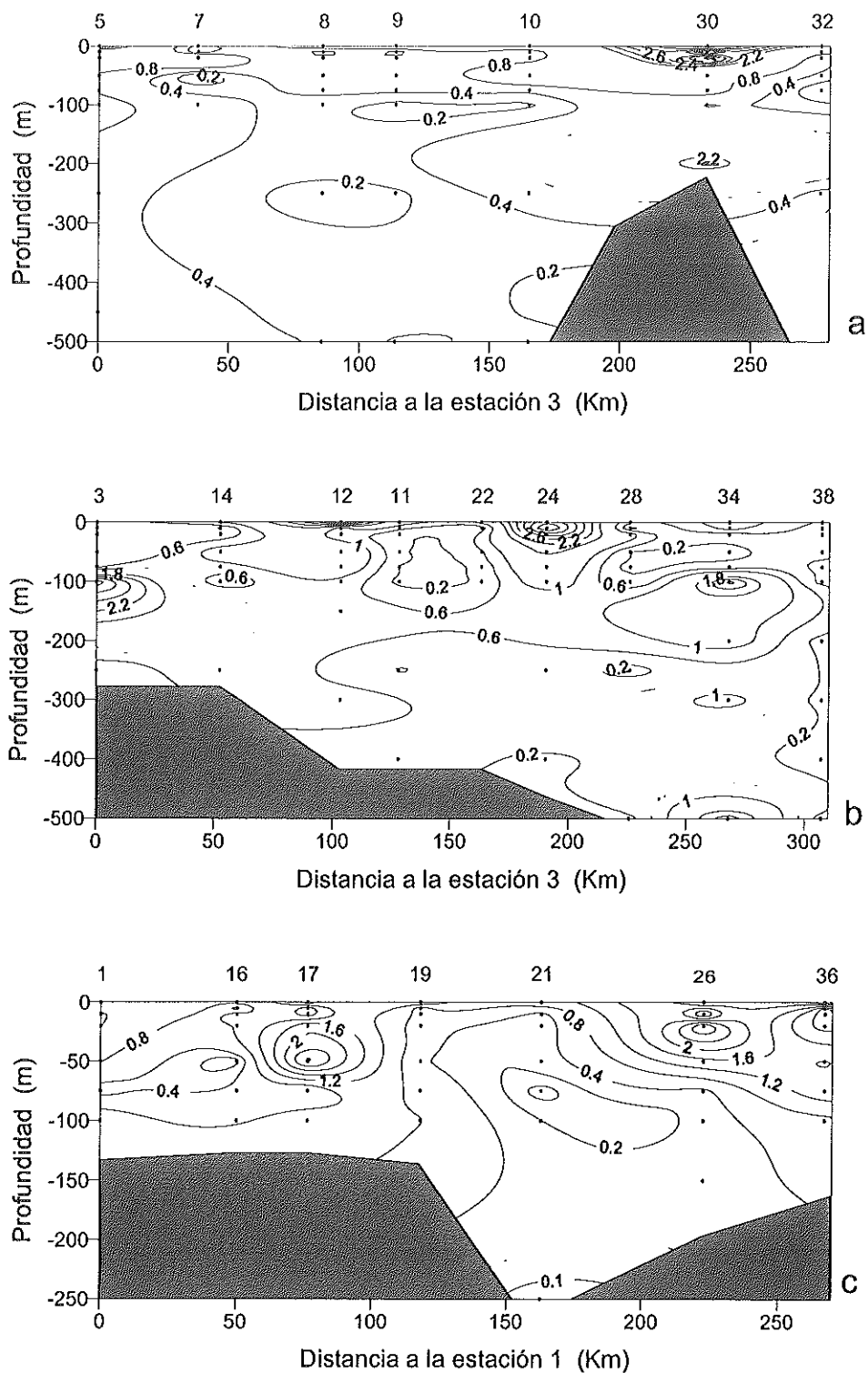


Figura 19. Distribución vertical y horizontal de amonio (μM) de los transectos de a) Costa de Baja California, b) Central y c) Costa de Sonora. Los números de la parte superior indican las estaciones de muestreo. Nótese la escala en c.

valores más altos en los primeros 100 m fueron encontrados en la E17 y hasta la E26, sin embargo, debajo de esta profundidad la concentración fue muy homogénea en ambas estaciones, donde se midieron concentraciones de 0.2 μM hasta los 200 m, después de esta profundidad y hasta los 500 m en el Canal Tiburón la concentración de amonio se mantuvo en 0.1 μM . En esta última estación se observó un flujo de agua hacia la superficie.

6.3 Razon N:P

Las razones de Redfield son las razones de los componentes químicos de la materia particulada en el océano. En este estudio de la región de las islas del GC, la razón N:P considerando el total de los datos obtenidos durante este crucero fue de 13.1 (mol/mol) con una $r = 0.88$ (figura 20).

En las aguas superficiales se encontraron concentraciones de fosfatos proporcionalmente mayores a los nitratos. La gráfica de NO_3 vs PO_4 para la región de las islas muestra un intercepto negativo, cruzando al eje x en 1 μM .

Se sabe que en esta parte de la columna de agua uno de los procesos que puede alterar la concentración de los nutrientes es la fotosíntesis. Si se observa el agua a 100 m de profundidad la razón N:P es de ~ 8.75 . Sin embargo, cuando llevamos el agua con estas características hacia la superficie y asumiendo que el fitoplancton consume su contenido de NO_3 y PO_4 en una proporción de 16:1, se observa que al agotarse el NO_3 , el agua queda con un exceso de $\sim 1 \mu\text{M}$ de PO_4 . Este ejercicio sugiere que en la superficie del GC la

razón N:P esta siendo controlada por procesos de fotosíntesis y respiración, pero el agua llega a la superficie desde el fondo con un déficit de nitratos.

En zonas con material particulado dominado por organismos silicios la relación de Redfield es alrededor de 105:40:15:1 para C:Si:N:P (Open University, 1989). En la región de las grandes islas se encontró una razón de 35.5 con una $r = 0.85$ y al igual que los fosfatos, también se observó un exceso de $\sim 1 \mu\text{M}$ de silicatos en la superficie.

6.4 Mezcla vertical

Dentro del GC, en la región de las grandes islas (Tiburón y Ángel de la Guarda) existen zonas específicas donde la mezcla de la columna de agua se presenta con mayor intensidad. Una manera de visualizar las condiciones de mezcla es a través de la homogeneidad que presentan los perfiles representativos de esta zona. Pero también se puede observar de una manera cuantitativa a través de la obtención de la diferencia de temperatura que hay entre el valor superficial y a una cierta profundidad (ΔT), este gradiente de temperatura es una estimación del parámetro de estratificación. Así un valor de cero o cercano a él, indica que la columna de agua se encuentra mezclada, mientras que un valor alto indica que la columna de agua esta estratificada. Por lo tanto, la estratificación se intensifica conforme aumenta el valor de ΔT . En la figura 21 se puede observar las zonas en las que se encontró mayor mezcla debido a que en ellas los valores de ΔT fueron menores. De esta manera, del Canal de Ballenas y hasta la zona del umbral se observó un área mezclada. A

100 m de profundidad el valor de ΔT en el Canal de Ballenas fue de 0.90 °C, mientras que en la parte norte y sur se observó una columna estratificada, los valores de ΔT fueron de 2.82 °C y 4.76 °C, respectivamente. En el transecto central el ΔT para los primeros 100 m fue de 1.49 °C para la estación del norte y de 3.03 °C en la estación del sur, lo cual indica que al igual que en el transecto paralelo a Baja California, la estratificación es mayor en el extremo sur que en el extremo norte, mientras que en la E14 ΔT fue de 0.52 °C y de 1.34 °C para la E28, situada en la zona del umbral. En el Canal Tiburón se presentó una columna moderadamente mezclada, debido a que para los primeros 100 m el ΔT fue de 1.19 °C, mientras que para los extremos norte y sur fueron de 1.87 °C y 3.39 °C respectivamente. Lo cual fue consistente con las otras dos estaciones por lo que se puede observar que para este muestreo la estratificación fue mayor en el extremo sur que en el extremo norte.

Otra manera de visualizar que los nutrientes son afectados por los procesos físicos es observando la relación que hay entre los nutrientes y una variable conservativa, como por ejemplo la temperatura. La figura 22a muestra que el ΔPO_4 se correlacionó positivamente con el ΔT en los primeros 100 m de profundidad y de igual manera se observó con el ΔNO_3 (figura 22b), lo cual indica que ambos elementos son controlados por el mismo proceso, en este caso principalmente por la mezcla vertical en la región de las Islas. Así en las zonas donde se encontró la columna de agua mezclada con mayor intensidad, las concentraciones de los nutrientes fueron más altas, mientras que en las

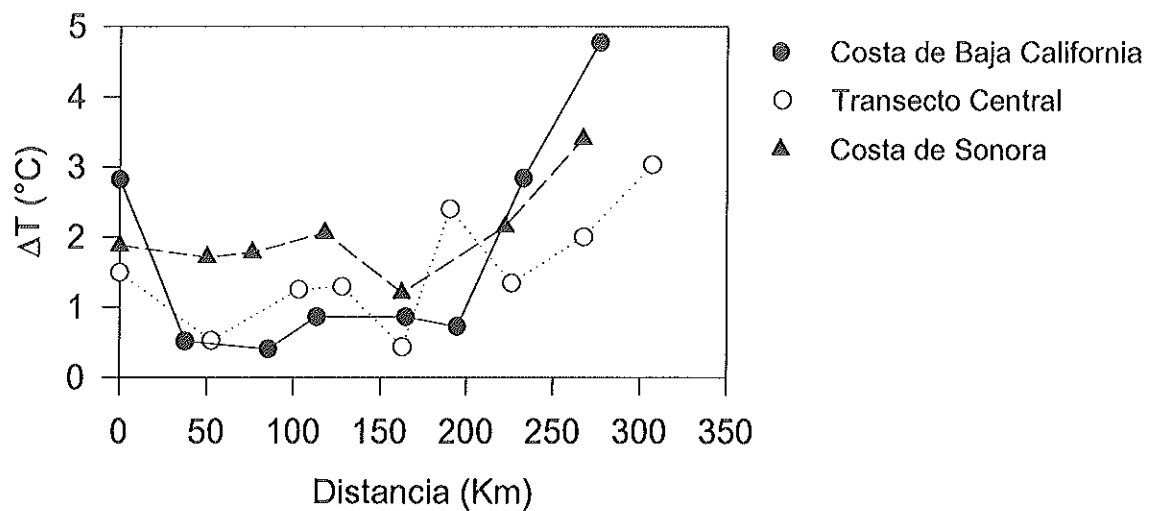


Figura 21. Zonas de mezcla y estratificación a lo largo de la Región de las Grandes Islas del GC en base al gradiente de temperatura considerando los primeros 100 m de profundidad.

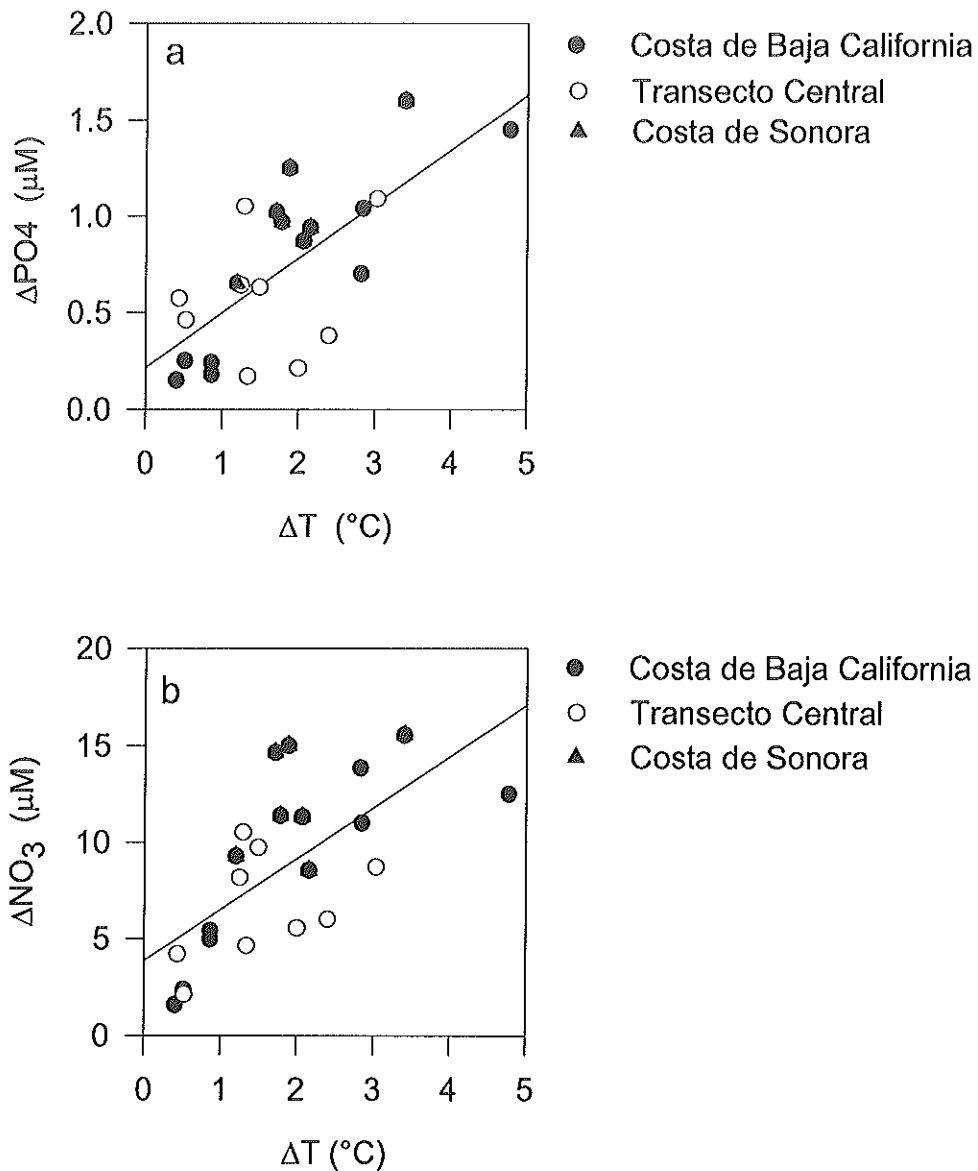


Figura 22. Relación del gradiente vertical de (a) fosfatos y (b) nitratos con respecto al gradiente de temperatura en base a los valores de los primeros 100 m de profundidad y considerando todas las estaciones.

estaciones donde predominó la estratificación las concentraciones de nutrientes disminuyeron.

La concentración de los nutrientes en la capa superficial de la columna de agua puede ser alterada en los primeros 50 m por medio del proceso de fotosíntesis, pero en la región de las islas se observó que en esta capa los procesos físicos fueron más intensos, opacando así a los procesos biológicos. En la figura 23a se presenta la concentración de PO_4 promedio integrada en los primeros 50 m vs el gradiente de temperatura (ΔT). A través de esta figura se observó que la concentración promedio de PO_4 integrado fue inversamente proporcional al gradiente de temperatura. Lo cual también indica que las estaciones que presentan mayor mezcla de la columna de agua tienen una mayor concentración de fosfatos. Estas zonas con mayor forzamiento físico tienen concentraciones de $\text{PO}_4 > 2 \mu\text{M}$, mientras que en las zonas con menor mezcla las concentraciones encontradas fueron $< 2.0 \mu\text{M}$. Este mismo comportamiento fue observado con la concentración de NO_3 promedio (figura 23b). En las estaciones que presentaron mayor mezcla las concentraciones fueron $> 14 \mu\text{M}$ y en las zonas con menor mezcla las concentraciones fueron $< 14 \mu\text{M}$. Lo anterior muestra que en las zonas de mayor mezcla las concentraciones de nitratos también son mayores.

A través de los diagramas de mezcla se puede observar si los nutrientes siguen un comportamiento conservativo o si presentan desviaciones como consecuencia de alguna remoción o adición, como por ejemplo, consumo por fitoplancton o remineralización. Los diagramas de mezcla para la región de las

islas (figura 24) muestran que la concentración de los nutrientes como fosfato, nitrato y silicato fueron en la mayoría de sus datos linealmente correlacionados con la salinidad. A pesar de la alta variabilidad de la concentración de estos nutrientes en esta zona por la presencia de varias masas de agua, la mayoría de los datos siguen la línea de mezcla. Estos diagramas presentan en sus extremos al AIP y al AGC para los transectos de la Costa de Baja California y Central, mientras que para la Costa de Sonora sus extremos son ASsSt y AGC. En el extremo donde se encuentra el AGC se observó que la concentración de los nutrientes es baja, mientras que en la parte correspondiente al agua del fondo (ASsSt y AIP) las concentraciones de los nutrientes son más altas, lo cual sugiere que el agua del fondo es agua menos salada y rica en nutrientes. Los nitritos fueron correlacionados inversamente con la salinidad, esto indica que en la capa superficial las concentraciones de nitritos fueron mayores. Algunos valores caen por arriba y por debajo del conjunto de datos muy probablemente debido al proceso de nitrificación en el primero y consumo en el segundo debido al proceso de fotosíntesis. El amonio mostró un comportamiento no conservativo, lo cual sugiere que este elemento está siendo afectado por otro proceso diferente a los procesos físicos, en este caso muy probablemente debido al pastoreo.

Las concentraciones superficiales principalmente de las estaciones del norte y sur caen por debajo de la línea de mezcla probablemente por el consumo de nutrientes a través del proceso de fotosíntesis.

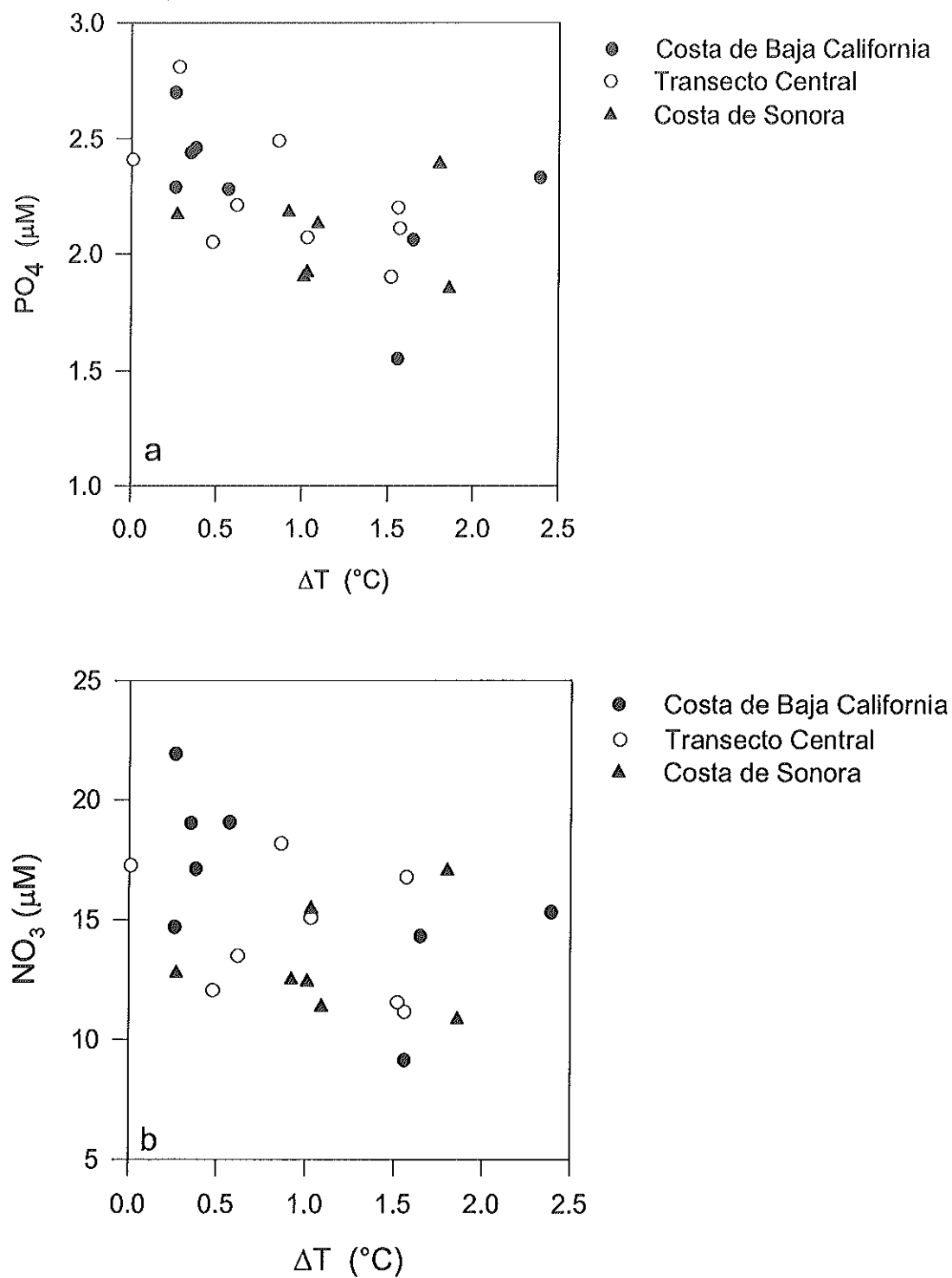


Figura 23. Concentración promedio de (a) fosfatos y (b) nitratos integrados en los primeros 50 m considerando todas las estaciones.

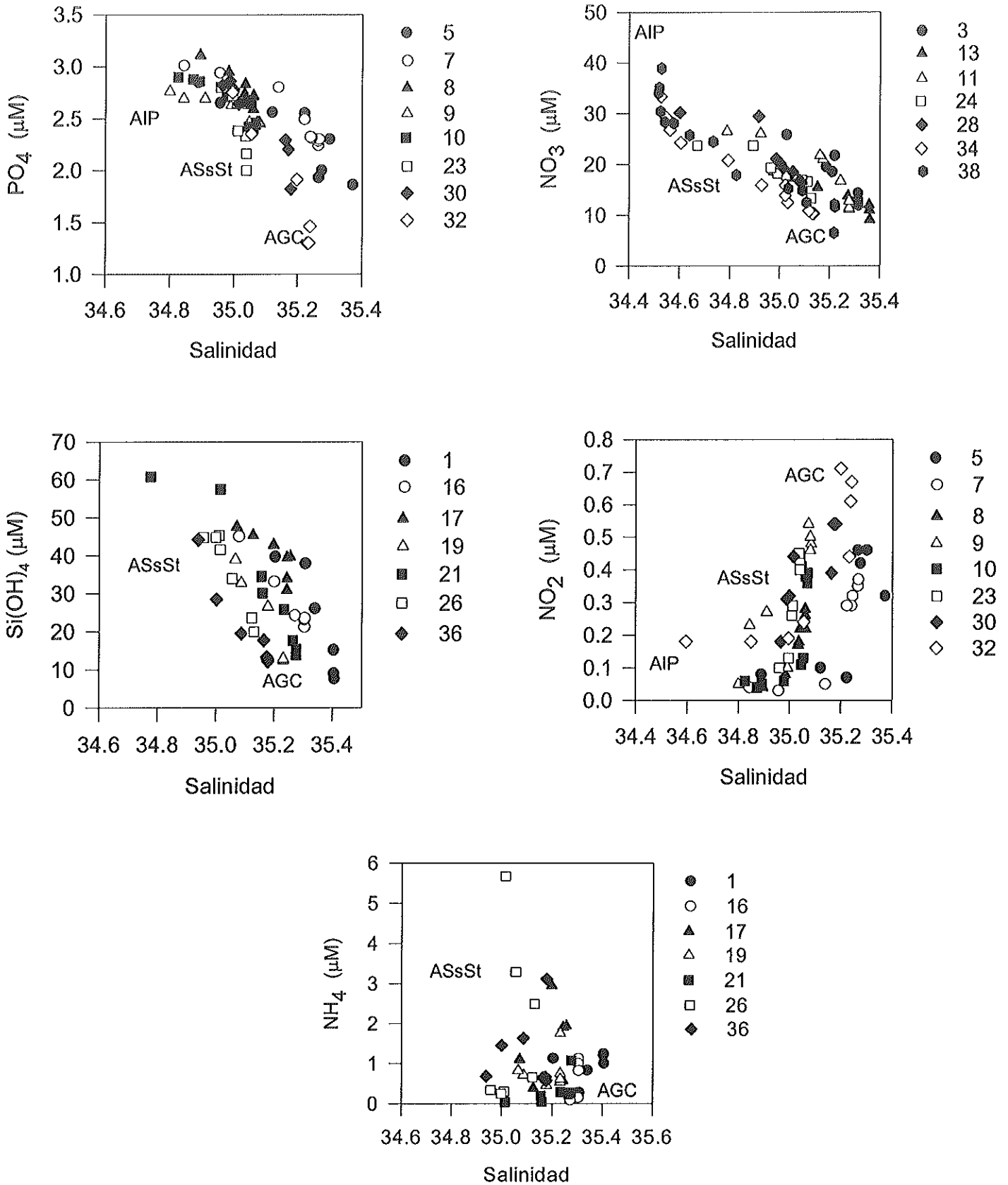


Figura 24. Diagramas de Mezcla considerando el total de datos de diferentes transectos seleccionados de la figura 1.

7. Discusión

7.1 Hidrografía

La temperatura y la salinidad son parámetros que cambian solo por procesos físicos y por ello se les considera como variables conservativas (Chester, 2000). En este estudio en la región de las grandes islas del GC, el diagrama TS mostró de manera clara que durante este invierno tres masas de agua distintas estuvieron presentes y ocuparon los 1000 m superiores en la región de las islas: AGC, ASsSt y AIP (Figura 2). En el extremo sur del área de estudio, Camiro-Vargas (2004) estudiando el sistema del CO₂ durante el mismo crucero observó la presencia del APP a 1200 m de profundidad. Estos resultados son consistentes con los reportes previos de la literatura (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Bray y Robles, 1991; Torres-Orozco, 1993). En este crucero se observó que el AGC ocupó la capa superficial a lo largo de toda la zona de estudio. En el transecto de Baja California se encontró ocupando los primeros 250 m, desde la región norte hasta el Canal de Ballenas. Sin embargo, en la zona de los umbrales San Lorenzo-San Esteban fue observada en los primeros 100 m debido al surgimiento del Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt, Figura 3). Esta última masa de agua se encontró a lo largo de todo el transecto paralelo a la costa de Baja California, llenando el Canal de Ballenas a partir de los 250 m. López y García (2003) encontraron que el ASsSt originada en el Océano Pacífico fluye al interior del GC pasando a través del umbral San Esteban hacia la Cuenca Tiburón, esta cuenca esta conectada con la Cuenca Delfín al norte de la isla Ángel de la Guarda. Así, esta masa de agua es

transportada hacia la Cuenca Delfín y el Canal de Ballenas rodeando la punta norte de la isla Angel de la Guarda (López y García, 2003). En la región del umbral el ASsSt se encontró fluyendo hacia la superficie hasta los 100 m como producto de la mezcla vertical, llevando agua fría y menos salada hacia la superficie, mientras que al norte y sur del umbral, así como en el Canal Tiburón, esta masa de agua se encontró a partir de los 250 m. Finalmente el Agua Intermedia del Pacífico (AIP) fue detectada solo en el extremo sur de la costa de Baja California y desde la zona del umbral hasta el extremo sur del transecto central del golfo, mientras que sobre la costa de Sonora no fue detectada.

En la región de las Grandes Islas, la temperatura superficial es menor a la del resto del golfo durante todo el año (Soto-Mardones, 1999), acentuándose estas bajas temperaturas durante el invierno. La temperatura superficial en la región de las islas presentó a una escala espacial menor, el mismo comportamiento del todo el GC. La temperatura superficial promedio disminuye del norte del golfo hacia la región de las islas y posteriormente aumenta hacia la boca del golfo (Soto-Mardones *et al.*, 1999), mientras que en la región de las islas, disminuye del extremo norte hacia los umbrales y posteriormente aumenta hacia el extremo sur de esta región. De manera general, la temperatura superficial fue de 14 - 18 °C para este invierno en la región de las islas, lo cual es consistente con lo reportado en la literatura (Roden, 1964; Soto-Mardones *et al.*, 1999; Torres-Valdés, 2000). Las temperaturas superficiales fueron mayores en el extremo sur que en el extremo norte del área de estudio, probablemente porque la región sur esta influenciada por el agua de la región central del GC,

donde las temperaturas son mas cálidas durante el invierno (Soto-Mardones et al., 1999). A lo largo de la costa de Sonora, aunque la temperatura superficial presentó una menor variación, su comportamiento fue similar a la que mostró en los otros dos transectos. En general, dentro de la región de las islas se encontró una alta variabilidad en la distribución vertical de la temperatura. En ambos extremos de los transectos paralelo a la Costa de Baja California, Central y a lo largo de la costa de Sonora, los perfiles de temperatura mostraron su forma típica, valores altos en la superficie que decrecen con la profundidad como lo hace en la zona sur del GC y el Océano Pacífico adyacente. Sin embargo, del Canal de Ballenas a la zona de los umbrales San Lorenzo-San Esteban y en el Canal Tiburón, la distribución vertical presenta temperaturas bajas en la superficie y más cálidas hacia el fondo en comparación al resto de las estaciones, cambiando la forma del perfil típico por uno homogéneo. Las isothermas muestran una estructura cóncava del Canal de Ballenas a la zona de los umbrales y al sur del Canal Tiburón (E26) indicando un flujo de agua fría hacia la superficie que proviene del fondo probablemente a causa de la mezcla vertical. A 500 m de profundidad, la diferencia de temperatura fue de 4.24 °C entre el Canal de Ballenas y la parte sur del umbral de San Lorenzo debido a que el umbral sur controla la entrada hacia el Canal de Ballenas y ambos sitios no están conectados por debajo de los 200 m (López y García, 2003).

Las salinidades superficiales fueron mayores en la parte norte que en el sur, lo cual muy posiblemente se debe a la fuerte evaporación que ocurre en la parte norte del GC (Lavín y Organista, 1988; Lavín et al., 1995; Berón-Vera y

Ripa, 2000). La salinidad al igual que la temperatura presentó valores superficiales que disminuyen del extremo norte hacia la zona del umbral y aumentan nuevamente hacia el extremo sur de la zona de estudio (figura 6). Estas salinidades superficiales fluctúan entre 35.0 -35.5 y son 1-2 unidades más grandes que los valores fuera del golfo a latitudes similares (Roden, 1964). En este muestreo la isohalina de 35 se observó a ~250 m de profundidad al norte del umbral, lo cual muestra que en esta ocasión esta isohalina fue registrada a mayor profundidad en comparación a muestreos anteriores en los que se detectó a 150 m (Torres-Valdés, 2000).

Los perfiles de salinidad en los extremos norte, sur y a lo largo de la costa de Sonora muestran su forma típica, valores altos en la superficie y bajos hacia el fondo. Sin embargo, en la zona de mayor forzamiento físico cambia los perfiles de salinidad, se tornan homogéneos a causa de la mezcla vertical. Esta mezcla de la columna de agua lleva agua profunda de menor salinidad hacia la superficie y de manera simultánea un flujo de agua superficial con mayor contenido de sal se transporta hacia el fondo. Comparadas con el resto de las estaciones del golfo, en la zona de mezcla el agua presenta menor salinidad en la superficie y mayor salinidad en el fondo. En el Canal de Ballenas además de presentar rangos uniformes de salinidad a lo largo de la columna de agua, lo cual es consistente con lo reportado en la literatura (Lavín *et al.*, 1995), se observó un domo de baja salinidad al igual que en la zona de los umbrales, sugiriendo un importante aporte de agua menos salada hacia la superficie. En contraste, la costa de Sonora mostró de manera general las más altas

salinidades. La distribución de las variables físicas como la salinidad y temperatura solo se altera por procesos físicos, lo cual muestra que en la zona del Canal de Ballenas, en la zona de los umbrales y en el Canal Tiburón el proceso de la mezcla vertical homogeniza la columna de agua mostrando perfiles con concentraciones similares a lo largo de la columna de agua.

Las concentraciones superficiales de oxígeno que se han reportado en el norte y sur del GC son altas debido a la intensidad con que ocurren los procesos biológicos (Lavín et al., 1995; Torres-Valdés, 2000). En este estudio, al norte y al sur de la región de las islas se registraron altas concentraciones de oxígeno disuelto en la capa superficial, muy probablemente debido al proceso de fotosíntesis. De manera general, la distribución superficial del oxígeno presentó un comportamiento similar al de temperatura y salinidad, decrece hacia la zona del umbral y aumenta nuevamente hacia las estaciones del sur (figura 7). En el Canal de Ballenas y en la zona del umbral la concentración superficial de oxígeno decrece debido a que la mezcla vertical es más intensa opacando de esta manera el proceso de fotosíntesis, mientras que en los extremos de la zona de estudio, la columna de agua se encuentra estratificada y el proceso de fotosíntesis es más intenso. El porcentaje de saturación superficial muestra que el agua en los extremos se encuentra sobresaturada (Tabla II; Figura 8), lo cual es consistente con lo reportado para la región sur del GC (Torres-Valdés, 2000).

Tabla II. Valores del porcentaje de saturación de Oxígeno de algunas estaciones representativas de la región de las islas.

Zonas	Norte	Umbral*	Sur
Costa de Baja California	110.36	83.97 ¹ -78.63 ²	113.02
Transecto Central	106.03	79.96 ³	101.28
Costa de Sonora	110.32	105.77 ⁴	129

*El valor corresponde al ¹canal de ballenas, ²Umbral San Lorenzo, ³Umbral San Esteban y ⁴Canal de la Isla Tiburón.

Las posibles causas de que el oxígeno se encuentre sobresaturado en las aguas superficiales del mar son el aporte atmosférico y el proceso de fotosíntesis (Libes, 1991). Los valores del porcentaje de saturación muestran que el proceso de fotosíntesis es más claro en ambos extremos del archipiélago y a lo largo de la costa de Sonora (Figura 24). Cuando ambos procesos están ocurriendo al mismo tiempo no rebasan el 5% de sobresaturación (Chester, 2000) a menos que se este llevando a cabo un intenso proceso de fotosíntesis (Takahashi et al., 1985). En contraste, en el Canal de Ballenas el oxígeno presenta perfiles homogéneos con valores bajos en la superficie y altos en el fondo, comparados con los de las estaciones alejadas de los umbrales. Por ejemplo, las estaciones del sur presentaron concentraciones muy pequeñas de oxígeno a partir de los 400 m de profundidad (Figura 7). Esta diferencia en la estructura vertical del oxígeno en la zonas de las islas se debe al efecto de la mezcla vertical (Roden, 1964; Álvarez-Borrego et al., 1978) ya que por un lado lleva agua con menos oxígeno hacia la superficie y por el otro funciona como un

mecanismo de aireación al transportar agua rica en oxígeno hacia la parte profunda de esta región (Delgadillo-Hinojosa, 2000; Macias-Zamora y Delgadillo-Hinojosa, 2003).

7.2 Distribución vertical de los nutrientes

Las concentraciones superficiales de los nutrientes aumentaron de la región norte hacia la zona de los umbrales, lugar donde la influencia de la mezcla es mayor y posteriormente disminuyeron hacia la región sur. La distribución vertical de los nutrientes al sur de los umbrales es similar a la del Océano Pacífico nororiental, valores bajos en la superficie y altos hacia el fondo, pero en la región de las islas, principalmente en el Canal de Ballenas los nutrientes presentan una distribución vertical homogénea debido a los fuertes procesos de mezcla provocados por corrientes de marea (Figura 25 a y b). En el Canal de Ballenas la concentración de los nutrientes aumenta con la profundidad hasta $2.8 \mu\text{M}$ de fosfato, $60 \mu\text{M}$ de silicatos y $25 \mu\text{M}$ de nitratos (Figuras 9a, 11a y 13a). Los valores de nutrientes encontrados en la profundidad del umbral son similares a los del Canal de Ballenas a la misma profundidad. En el transecto central del golfo solo se detectaron perfiles homogéneos en la zona del umbral, incluso los perfiles de nitritos y amonio al igual que en Canal de Ballenas en esta zona disminuyeron el valor del máximo superficial (figuras 15 y 17) debido a que fueron diluidos por el aporte de agua con menor contenido de estos elementos del fondo hacia la superficie. Lo anterior, sugiere que la mezcla vertical en la línea media del GC no ocurre con la misma intensidad a lo largo de todo el transecto y que la zona más influenciada por la mezcla vertical en este transecto

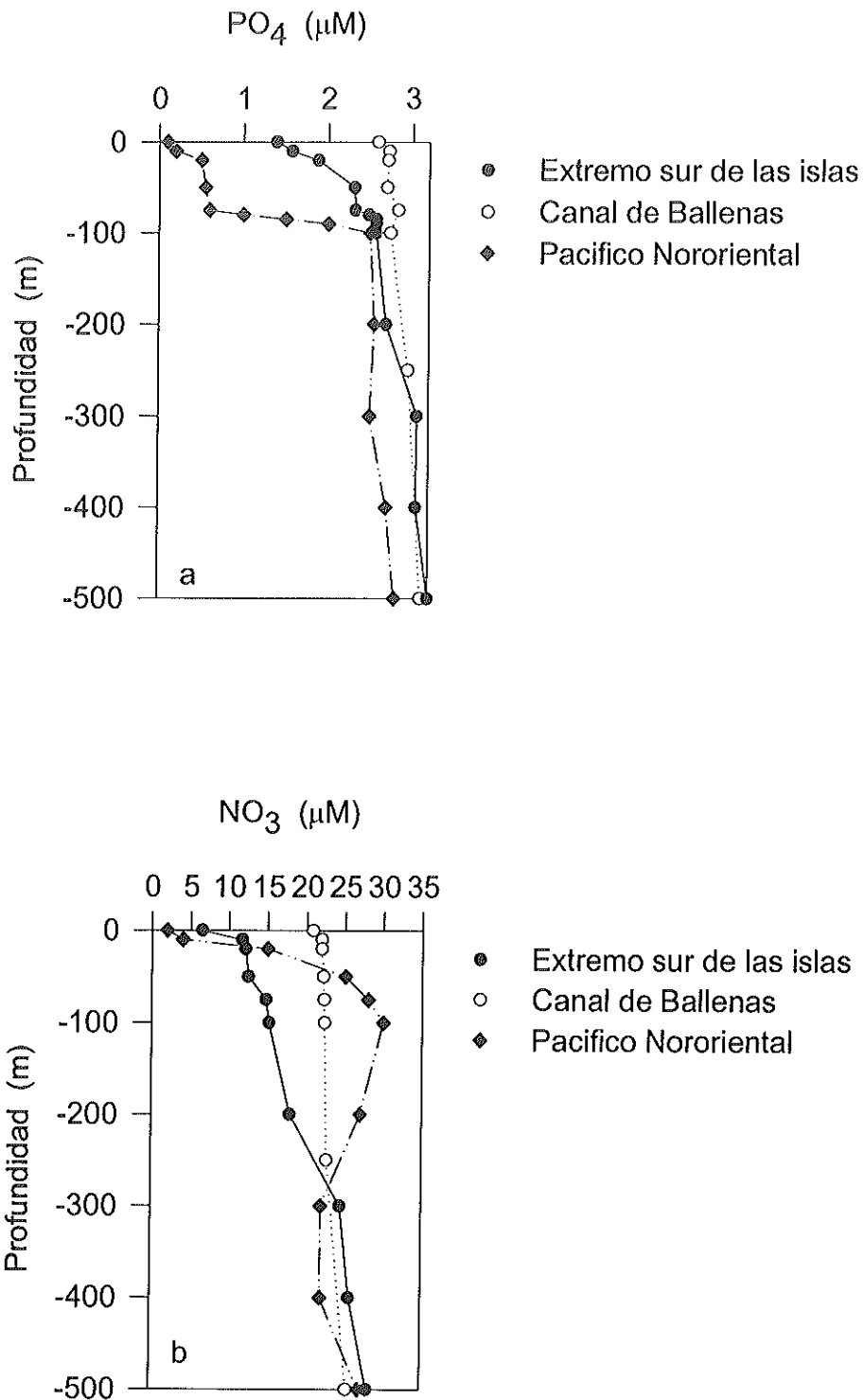


Figura 25. Distribución vertical de (a) fosfatos y (b) nitratos de la región de las islas comparados con la distribución del Pacífico Nororiental.

es la región del umbral. Resultados similares también fueron observados con los datos de temperatura y salinidad. En las estaciones localizadas hacia los extremos norte y sur del área de estudio y sobre la costa de Sonora mostraron la forma típica, tipo nutriente. Esta configuración de los perfiles de nutrientes se debe a la utilización de los nutrientes por el fitoplancton en la superficie y en el fondo a la presencia de masas de agua ricas en nutrientes a causa del proceso de la respiración de la materia orgánica.

La distribución vertical de los fosfatos y nitratos en la región de las islas, sugiere un enriquecimiento de nutrientes en la superficie comparados con la distribución vertical reportada en el Pacífico (Figura 25). En contraste, nutrientes como los nitritos y el amonio que presentan valores altos en la superficie, en las zonas con forzamiento físico el máximo superficial se diluye con aguas del fondo y presentan valores muy bajos a causa de la mezcla vertical. Como se mostró anteriormente este efecto también fue observado con la temperatura, salinidad y oxígeno. En las zonas de mezcla intensa se observaron perfiles de nutrientes mucho más homogéneos y como consecuencia, el gradiente vertical de concentración de nutrientes en la columna de agua (la diferencia entre los valores de nutrientes en la superficie y 100 m de profundidad) del Canal de Ballenas y de la zona del umbral fue muy pequeño (figura 22).

7.3 Distribución vertical y horizontal de nutrientes

Las isólinas de los nutrientes muestran variaciones en ambos extremos a lo largo de la columna de agua, lo cual indica una fuerte estratificación tanto en el extremo norte como en el sur. En las regiones con mayor influencia de los

procesos físicos como el Canal de Ballenas, la región de los umbrales San Lorenzo-San Esteban y alrededor del Canal Tiburón muestran estructuras en forma de domo, por lo que en estas zonas las isolíneas de mayor concentración fueron encontradas cerca de la superficie, sugiriendo la presencia de un flujo de agua del fondo rica en nutrientes hacia la capa superficial como consecuencia de la mezcla vertical. Torres-Valdés (2000) estudió la variación espacial y temporal de los fosfatos y los nitratos en todo el GC y reportó un comportamiento similar en la distribución vertical de los fosfatos y nitratos. Este autor encontró que las aguas superficiales en la región de las islas se encontraron enriquecidas cuando se compararon con las medidas en la boca del golfo y atribuyó este enriquecimiento a la intensificación de la mezcla vertical en la región de las islas. Por varios años, la mezcla vertical en la región de las islas se ha considerado un proceso que juega un papel muy importante en modificar las características químicas del agua de mar que ahí se encuentra. Por ejemplo, Delgadillo-Hinojosa et al. (2001) y Hernández-Ayón (2000) registraron en la región del archipiélago valores altos de Cd y CO₂ total, respectivamente, y lo atribuyeron a las condiciones de mezcla intensa que persisten en esa región del GC.

La distribución vertical de los nitritos presentó valores altos en la capa superficial indicando la presencia de un máximo en el GC. Álvarez-Borrego et al. (1978) reportaron un máximo superficial con valores similares a los observados en este estudio. Este máximo superficial, característico común de los océanos, se genera como producto del proceso de nitrificación (Libes, 1991). En la región

de las islas, el máximo de nitritos se localizó entre los 20-75 m de profundidad, debido a que este proceso es inhibido por la luz (Ward y Zafiriou, 1988; Sutka et al., 2003). Sutka *et al.*, (2003) demostraron la ocurrencia de la nitrificación en la zona eufótica del Pacífico nororiental y reportaron que tasas de nitrificación de 15 a 23.7 nmol L⁻¹ d⁻¹ eran responsables de generar un máximo superficial de nitritos. Del mismo modo, la distribución vertical del amonio presentó un máximo superficial en los extremos norte y sur que se ubicó en los 50 m superficiales, posiblemente debido a la respiración de la materia orgánica y al pastoreo del zooplancton en las aguas superficiales del golfo. También se ha reportado que en aguas dominadas por diatomeas las concentraciones de amonio y los productos de la degradación de clorofila son muy altas debido al pastoreo del zooplancton (Arrigo, 1999).

7.4 Razón N:P

El fitoplancton remueve nitrógeno y fósforo de las aguas superficiales en razones molares cercanas a la razón de Redfield (N:P = 16) (Arrigo *et al.*, 1999) incorporándolo al interior del material particulado, por lo que la proporción es determinada por su metabolismo celular y requerimiento estructural (Arrigo *et al.*, 2002).

La razón N:P estimada en este trabajo fue similar a lo encontrado previamente por Lavín et al., (1995) para la región norte del GC y Torres-Valdés (2000) para todo el GC. El valor encontrado es menor al clásico rango de Redfield 16:1. Sin embargo, evidencias recientes sugieren que la razón de

Redfield no es tan constante como se pensaba. Estudios en las aguas del Mar de Ross, donde los nutrientes son abundantes (Arrigo *et al.*, 1999; Arrigo *et al.*, 2002) y en el Estrecho de Gibraltar (Dafner *et al.*, 2003) muestran que la razón C:N:P (106:16:1) varía dependiendo de las tasas fitoplanctónicas.

La figura 19 muestra que la ordenada al origen es negativa, sugiriendo que existe un déficit de NO_3 , lo cual eventualmente causa que la razón N:P disminuya. La razón de Redfield indica que el fitoplancton consume nutrientes disueltos del agua de mar y las bacterias transforman la materia orgánica a nutrientes inorgánicos en la misma proporción (16:1). Así la fotosíntesis y la remineralización no causan ninguna desviación significativa en la pendiente de la gráfica NO_3 vs PO_4 , estos procesos biológicos solo generan movimientos hacia arriba y hacia abajo de la línea con pendiente de $\sim 16:1$ (Tyrrell y Lucas, 2002). Por lo tanto, en la región de las islas la razón N:P sugiere la presencia de otro proceso además de la fotosíntesis y/o remineralización, ya que la correlación lineal en la gráfica de NO_3 vs PO_4 se encuentra desviada hacia la derecha de la línea con pendiente de 16:1. Una de las causas por la cual la pendiente puede desviarse hacia la derecha es la desnitrificación (Tyrrell y Lucas, 2002).

En el GC las condiciones que pueden producir valores bajos en la razón N:P son la dominancia del grupo de diatomeas en el fitoplancton y el proceso de la desnitrificación (Torres-Valdés, 2000). Estudios recientes en el Mar de Ross han mostrado que en aguas dominadas por diatomeas exhiben razones N:P mucho más bajas a Redfield con una media de 11.9 (mol/mol) debido al requerimiento de nutrientes por parte de estos organismos (Arrigo, 2002). En el

GC se ha reportado la presencia de diatomeas, encontrando la mayor abundancia al sur de isla San Esteban y Tiburón (Gaxiola-Castro *et al.*, 1999). Macias-Carranza (1999) encontró que el pigmento característico de las diatomeas (fucoxantina) es un pigmento muy abundante en el GC con concentraciones de 0.2-1.9 mg m³. Thunell *et al.* (1996) encontró que el flujo mas alto de opal (~0.35 g m³ d⁻¹) ocurre durante el invierno y primavera, este flujo es estacional y esta relacionado con los niveles de biomasa fitoplanctónica, por lo que ambos procesos son controlados por los cambios de condiciones ambientales y hidrográficas. Así, la presencia de diatomeas en el Golfo de California puede ser la causa por la cual la razón N:P es baja. Sin embargo, también puede deberse al proceso de la desnitrificación. Los perfiles verticales de nitritos y amonio medidos en este trabajo no muestran que este ocurriendo el proceso de desnitrificación en la región de las islas debido a que el segundo máximo de nitrito y amonio generados por la correspondiente actividad microbiana de las bacterias desnitrificantes. Sin embargo, al sur de las islas hay una capa suboxica entre 200-1000 m con condiciones que sugieren que la desnitrificación ha ocurrido. (Altabet, 1999; Torres-Valdés, 2000).

La figura 19 también muestra que en la superficie se observó un exceso de 1 μM de PO₄. Esta característica fue previamente reportada por Álvarez-Borrego y Schwartzlose (1978) para datos colectados a lo largo de todo el GC durante abril y mayo de 1974, y por Lavín, *et al.* (1995) para la región norte del GC durante febrero y marzo de 1988. Se sabe que en esta parte superficial de la columna de agua uno de los procesos que puede alterar la concentración de los

los valores de los nutrientes es pequeña, por lo tanto, en esa capa de agua los valores son similares, por ello los perfiles se muestran homogéneos, mientras que en las zonas donde se encontró una mayor diferencia de temperatura también hubo una diferencia mayor en la concentración de los nutrientes a lo largo de la columna de agua, mostrando así una fuerte estratificación. En las zonas mezcladas también se observó que en promedio presentaron mayor concentración de nutrientes que las zonas estratificadas (figura 22) por el suministro de agua rica en nutrientes a la capa superficial.

Los diagramas de mezcla muestran que la mezcla vertical es el proceso que principalmente controla el comportamiento de los nutrientes en la región de las islas. A excepción del amonio todos los nutrientes mostraron un comportamiento conservativo. El comportamiento del amonio sugiere que este elemento está siendo afectado por otro proceso diferente a los procesos físicos, en este caso muy probablemente debido al pastoreo ya que se han reportado altos valores de amonio en la capa superficial debido a un alto contenido de diatomeas en la capa superficial (Arrigo, *et al.*, 1999) y en el Golfo de California se ha encontrado una alta abundancia de diatomeas (Gaxiola-Castro, *et al.* 1999).

Las concentraciones superficiales principalmente de las estaciones del norte y sur caen por debajo de la línea de mezcla probablemente por el consumo de nutrientes a través del proceso de fotosíntesis, ya que estos valores coinciden con una sobresaturación de oxígeno en esta capa. Este exceso de

oxígeno se encuentra en un 10% para la parte norte y de 13-30% en el extremo sur (Tabla II; Figura 8).

Lluch-Cota (2000) encontró para la parte central del golfo una relación negativa entre la temperatura y la abundancia de pigmentos. La mayor cantidad de pigmentos se han encontrado durante el invierno (Santamaría del Angel *et al.*, 1994; Thunell *et al.*, 1996; Lluch-Cota, 2000; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego, 2001) debido a que en esta época del año se encuentran las temperaturas más bajas (Roden, 1964; Soto-Mardones *et al.*, 1999). Sin embargo, a pesar de que durante el invierno los valores de productividad primaria son altos $2.82 \text{ gCm}^{-2}\text{día}^{-1}$ (Lara-Lara y Valdez-Holguín, 1988), los procesos biológicos son opacados por el enriquecimiento de nutrientes, causado por la mezcla vertical.

8. Conclusiones

Las zonas que mostraron condiciones de mezcla vertical intensa fueron el Canal de Ballenas, la región de los umbrales San Lorenzo-San Esteban y el Canal Tiburón.

La región de las grandes islas se encuentra enriquecida con nutrientes en la capa superficial. En particular, en el Canal de Ballenas y en la región de los umbrales los valores altos de fosfato, nitrato y silicato, sugieren que existe un flujo vertical de nutrientes con dirección neta hacia la superficie. En esta región llega agua rica en nutrientes debido a la circulación termohalina que presenta el GC y se transporta verticalmente hacia la superficie como consecuencia de la mezcla generada por la marea.

En las estaciones alejadas de la zona de mezcla, el PO_4 , $\text{Si}(\text{OH})_4$ y NO_3 mostraron la forma típica, tipo nutriente, con valores bajos en la superficie y altos en el fondo. Los valores de nutrientes bajos en la superficie se deben posiblemente al proceso de fotosíntesis dado que se encontraron asociados a niveles de sobresaturación de oxígeno de 113 a 130 %.

Los diagramas de mezcla para la región de las islas muestran que la concentración de estos nutrientes se correlacionaron positivamente con la salinidad, sugiriendo que la mezcla vertical es el principal proceso que controla la distribución de estos nutrientes.

En las zonas con mayor efecto de la mezcla vertical, la distribución de los nutrientes se manifiesta modificando el perfil y la concentración promedio de los nutrientes en la capa superficial. En general los perfiles se tornan verticalmente homogéneos con un mayor contenido superficial de fosfato, nitratos y silicatos sugiriendo un enriquecimiento, debido a la mezcla de agua profunda rica en estos elementos con agua de la capa superficial.

A diferencia de los otros nutrientes, los nitritos y el amonio presentaron un claro máximo superficial en estaciones alejadas de la zona de mezcla. El máximo de nitritos se localizó entre los 20 y los 75 m de profundidad sugiriendo que la nitrificación ocurre de manera intensa en la capa superficial del GC. El máximo superficial de amonio se ubicó en los 50 m superficiales, posiblemente debido a la respiración de la materia orgánica y al pastoreo en las aguas superficiales del golfo.

Los valores bajos de nitrito y amonio en la capa superficial en la zona de mezcla sugieren una dilución debido a la mezcla de agua profunda pobre en estos elementos con agua de la capa superficial.

La razón N:P en la región de la islas fue de 13.1 probablemente debido a la presencia de agua desnitrificada proveniente de la zona sur del golfo y del Océano Pacífico.

9. Referencias

- Altabet, M. A., C. Pilskaln, R. Thunell, C. Pride, D. Sigman, F. Chavez y R. Francois. 1999. The nitrogen isotope biogeochemistry of sinking particles from the margin of the Eastern North Pacific. *Deep-Sea Research*. **46**: 655-679.
- Alvarado-Aguilar, D. 1998. Uso de nutrientes como trazadores de masas de agua: boca del Golfo de California. Tesis de Licenciatura, FCM, UABC. 44 pp.
- Álvarez-Borrego, S. 1983. Gulf of California. p. 427-449. In: Ketchum BH (ed). *Estuaries and Enclosed Seas.*, Elsevier, Amsterdam. 500 pp.
- Álvarez-Borrego, S., J. A. Rivera, G. Gaxiola-Castro, J.M. Acosta-Ruiz y R.A Schwartzlose, 1978. Nutrientes en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*. **5**: 53-71.
- Álvarez-Borrego, S. y R. A. Schwartzlose, 1979. Water masses of the Gulf of California. *Ciencias Marinas*. **6**: 43-63.
- Álvarez-Borrego, S. y J. R. Lara-Lara, 1991. The physical environment and primary productivity of the Gulf of California: En: *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. (Dauphin, J. P. y Simoneit, B. R., eds). *AAPG Memoir*. **47**: 555-567.
- Argote, M. L., A. Amador, M. F. Lavin y J. R. Hunter, 1995. Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*. **100**(C8): 16103-16118.
- Arrigo, K. R., D. H. Robinson, D. L. Worthen, R. B. Dunbar, G. R. DiTullio, M. VanWoert y M. P. Lizotte. 1999. Phytoplankton Community Structure and the Drawdown of Nutrients and CO₂ in the Southern Ocean. *Science*. **283**: 365-367.
- Arrigo, K. R., R. B. Dunbar, M. P. Lizotte D. H. Robinson. 2002. Taxon-specific differences in C/P and N/P drawdown for phytoplankton in the Ross Sea, Antarctica. *Geophysical Research Letters*. **29**: (44-1)-(44-4).
- Badán-Dangón, A., M. C. Hendershott y M. F. Lavin, 1991. Underway Doppler current profiles in the Gulf of California. *Trans. Am. Geophys. Union*. **72**: 209-218.
- Berón-Vera, F. J. y P. Ripa. 2002. Seasonal salinity balance in the Gulf of California, *Journal Geophysical Research*. **107**: 15-1/15-15.

- Macías-Zamora, J. V. and Delgadillo-Hinojosa, F. (2003). Hypoxic waters in the Gulf of California: Origin, distribution, and possible consequences. In: Proceedings of the Sixth International Symposium on Fish Physiology, Toxicology, and Water Quality, La Paz B.C.S. Mexico. R.V. Thurston (ed). U.S. Environmental Protection Agency, Ecosystems Research Division, Athens, Georgia, USA. EPA 600/R-02/097. pp 285-296.
- Marinone, S. G. y Lavín, M. F. 2003. Residual flux and mixing in the large islands region of the central gulf of California. In: Velasco-Fuentes, O. U. et al. (Eds), *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Kluwer Academic Publisher, Netherlands, pp. 213-236.
- Open University. 1989. *Ocean Chemistry and deep-sea sediments*. Pergamon Press. Great Britain. 134 pp.
- Riley, J. P. y R. Chester, 1989. *Introducción a la Química Marina*. AGT Editor. México. 459 pp.
- Roden, G. I., 1964. Oceanographic aspects of the Gulf of California. En: *Marine geology of the Gulf of California* (T. H. van Andel & G. G. Shor Eds.) American Association of Petroleum Geologists Memoir **3**: 30-58.
- Santamaria-del-Angel, E., S. Alvarez-Borrego y F. E. Muller-Karger, 1994. Gulf of California biogeographic regions based on coastal color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research*. **99**: 7411-7421.
- Simpson, J. H., A. J. Souza y M. F. Lavín. 1994. Tidal mixing in the Gulf of California. En: *Mixing and transport in the environment*. John Wiley and Sons Ltd, London, 169-182 pp.
- Soto-Mardones, L., S. G. Marinone y A. Parés-Sierra, 1999. Time and spatial variability of the sea surface temperature in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*. **25**(1): 1-30.
- Sutka, R. L., N. E. Ostrom, P. H. Ostrom y M. S. Phanikumar. Stable nitrogen isotope dynamics of dissolved nitrate in a transect from the North Pacific Subtropical Gyre to the Eastern Tropical North Pacific. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **68**: 517-527.
- Takahashi, T., W. S. Broecker y S. Langer. 1985. Redfield Ratio Based on Chemical Data from Isopycnal Surfaces. *Journal of Geophysical Research*. **90**: 6907-6924.
- Torres-Orozco, E, 1993. Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de Maestría. CICESE, Ensenada, México. 80 pp.

- Torres-Valdés, S., 2000. Distribución espacial y variabilidad temporal de nutrientes en el Golfo de California. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas - UABC, Ensenada, México. 62 pp.
- Thunell, R., C. Pride, P. Ziveri, F. Muller-Karger, C. Sancetta y D. Murray. 1996. Plankton response to physical forcing in the Gulf of California. *Journal of Plankton Research*. **18**:2017-2026.
- Thunell, R.C., 1998. Seasonal and annual variability in particle fluxes in the Gulf of California: A response to climate change. *Deep-Sea Research I*. **45**:2059-2083.
- Tyrrell, T. y M. I. Lucas. 2002. Geochemical evidence of denitrification in the Benguela upwelling system. *Continental Shelf Research*. **22**:2497-2511.
- Voss, M., J. W. Joachim y J. P. Montoya. 2001. Nitrogen isotope patterns in the oxygen-deficient waters of the Eastern Tropical North Pacific Ocean. *Deep-Sea Research I*. **48**:1905-1921.
- Ward, B. B. y O. C. Zafiriou. 1988. Nitrification and nitric oxide in the oxygen minimum of the eastern tropical North Pacific. *Deep-Sea Research*. **35**:1127-1142.
- Wu, J., W. Sunda, E. A. Boyle y D. M. Karl. 2000. Phosphate Depletion in the Western North Atlantic Ocean. *Science*. **289**:759-762.
- Zeitschel, B. 1969. Primary productivity in the Gulf of California. *Marine Biology* **3** (3): 201-318.