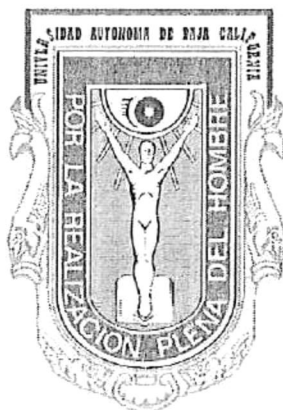


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIA MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



**EFFECTO DE LA MEZCLA VERTICAL SOBRE LA
DISTRIBUCIÓN DE NUTRIENTES INORGÁNICOS EN LA
REGIÓN DE LAS GRANDES ISLAS DEL GOLFO DE
CALIFORNIA**

T E S I S

**QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS
PARA OBTENER EL GRADO DE**

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA

EUNISE VANESSA TORRES DELGADO

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO. NOVIEMBRE DE 2008

RESUMEN

Con el objetivo de estudiar el efecto que ejerce la mezcla vertical sobre la distribución vertical de los nutrientes inorgánicos (NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4), se realizaron tres cruceros oceanográficos durante el invierno de 2002, primavera de 2003 y verano de 2004 en la región de las Grandes Islas del Golfo de California. A bordo del B/O Francisco de Ulloa se recorrió una red de 38 estaciones oceanográficas, distribuidas en 3 transectos paralelos al eje central del golfo. El diseño experimental consideró el gradiente horizontal de la intensidad de la mezcla vertical, con a) mezcla intensa en la zona de los umbrales de San Lorenzo-San Esteban y b) condiciones de menor mezcla en la zona alejada de ellos. En cada estación, se colectaron muestras a lo largo de la columna de agua usando botellas Niskin de 5 L de capacidad montadas en una roseta. Al mismo tiempo, se obtuvieron perfiles de temperatura y salinidad con un CTD. El parámetro de estratificación (ϕ) se utilizó como una medida de la intensidad de la mezcla vertical. En general, el efecto de la mezcla vertical se manifestó aumentando la concentración promedio de nutrientes en la capa superficial y formando perfiles verticalmente homogéneos. En invierno, las concentraciones promedio de nutrientes fueron de 16.8 ± 0.6 , 2.4 ± 0.13 , $31.9 \pm 1.5 \mu\text{M}$ de NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4 , mientras que en verano, los valores promedio de nutrientes fueron de 9.0 ± 0.6 , 1.4 ± 0.1 y $19.0 \pm 1.2 \mu\text{M}$ de NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4 . De manera particular, durante el invierno, la presencia del ASsSt se encontró más cercana a la superficie, sobre el umbral norte del Canal de Ballenas, umbral San Lorenzo y umbral San Esteban asociado a una alta mezcla de la columna de agua ($\phi = 3 - 20 \text{ J m}^{-3}$) en comparación con las estaciones del norte y sur ($\phi = 20 - 80 \text{ J m}^{-3}$) del área de estudio. En contraste, durante el verano el ASsSt se encontró más alejado de la superficie en la zona de los umbrales asociado a una mayor estratificación. Aunque la zona de los umbrales se encontró menos estratificada ($\phi = 100 - 200 \text{ J m}^{-3}$) que la zona sur y norte ($\phi = 200 - 350 \text{ J m}^{-3}$) del área de estudio durante esta época del año. Así, la relación entre el ϕ y la concentración promedio de nutrientes en los primeros 100 m, mostró que el 80% de la variabilidad temporal de la distribución de los nutrientes puede ser explicado por la variabilidad temporal de la intensidad de la mezcla vertical. Esta mezcla sugiere que los nutrientes emergen en el Canal de Ballenas y en la zona de los umbrales, debido al flujo del agua subsuperficial, originando de este modo un enriquecimiento con nutrientes de las aguas superficiales de la región de las Grandes Islas. La intensidad de los procesos biológicos es poco visible en los perfiles verticales de nutrientes en las zonas de los umbrales y el CB por la predominancia de la mezcla vertical. En contraste, son más visibles en los perfiles verticales de las zonas norte y sur del área de estudio por un menor efecto de la mezcla vertical y un menor aporte de nutrientes hacia la capa superficial. En general, la razón $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ y $\text{Si(OH)}_4:\text{PO}_4$ sugieren que las diatomeas pudieran ser el factor principal de remoción de nutrientes en la capa superficial en invierno y las fijadoras de nitrógeno durante el verano. Además, también pudiera estar involucrada la llegada a la RGI de agua desnitrificada proveniente de la zona centro-sur del GC.

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

EFFECTO DE LA MEZCLA VERTICAL SOBRE LA
DISTRIBUCIÓN DE NUTRIENTES INORGÁNICOS EN LA
REGIÓN DE LAS GRANDES ISLAS DEL GOLFO DE
CALIFORNIA

T E S I S

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

EUNISE VANESSA TORRES DELGADO

Aprobada por:



Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa
Director



Dr. Manuel Salvador Galindo Bect
Sinodal



Dr. José Martín Hernández Ayón
Sinodal

DEDICATORIA

A mis padres-abuelos.

Porque sentaron las bases para mi formación y porque el enorme apoyo para ver mis sueños hechos realidad siempre les fue insuficiente.

A mis hermanos Ana Guadalupe y Miguel Ángel.

Por todo el amor que me brindan y porque son dos grandes motores que mueven e impulsan mi vida.

A los nuevos integrantes de mi pequeña gran familia Leticia y Miguelito.

Porque con sus llegadas alegraron mi vida y con sus sonrisas me inyectan energía para seguir adelante.

A mi maestro y amigo Francisco Delgadillo.

Por tu invaluable enseñanza en general, porque vives mis triunfos como tuyos y porque en mis malos momentos no me has permitido sentirme sola.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis: Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa por brindarme todo su apoyo y conocimiento, por todos los momentos de discusión para el enriquecimiento de este trabajo y por la confianza de poner en mis manos este valioso proyecto.

Al Dr. J. Martín Hernández Ayón por aceptar caminar con nosotros en este emocionante proyecto. Por su apoyo para el mejoramiento de este trabajo con sus comentarios, sugerencias, críticas, correcciones y por las amenas reuniones para la discusión de este mismo.

Al Dr. Salvador Galindo Bect por aceptar ayudarnos a finalizar este trabajo, cuyos comentarios y sugerencias contribuyeron a su mejoramiento.

Al Dr. Victor F. Camacho Ibar por su apoyo y comentarios para una mayor comprensión del trabajo y por su valiosa disponibilidad, porque siempre nos brinda un espacio para sacar adelante el proyecto.

Al M.C. Eduardo Ortiz por el apoyo brindado en el laboratorio para la realización de los análisis de nutrientes durante las campañas Umbrales II y III.

A todos por los que fue posible llevar el buen desarrollo de los cruceros Umbrales I, II y III: José Antonio Segovia, Francisco Delgadillo, Arturo Siqueiros, Albino Muñoz, Martín Hernández, Tania Camiro y Gaby, por sus trabajos de alta calidad y sus esfuerzos comprometidos.

A todos los del grupo del seminario de Oceanografía química, biogeoquímica y contaminación por el apoyo que nos brindan y ayuda que nos dan para una mejor preparación.

A los del grupo del laboratorio de Química y Geoquímica por las siempre agradables pláticas tanto de ciencia como trivialidades: Carlos, Gerardo, Jacob, Alejandra, Arturo y Pedro.

A las que fueron como mi segunda familia durante mi maestría, Monserrat, Ada de la Luz y Leslie por todos los momentos dulces y amargos compartidos.

Al CONACYT por el apoyo al proyecto SEP-CONACyT 2004-C01-46523/A-1: "Efecto de la mezcla vertical sobre la distribución de metales traza Cd, Mn, Ni, Co en la Región de las Grandes Islas del Golfo de California", y por la beca otorgada para la realización de mi formación académica.

INDICE

	Página
1. Introducción	1
2. Objetivo	6
3. Hipótesis	7
4. Área de estudio	8
4.1 Descripción general	8
4.2 Circulación general en el Golfo de California	10
4.3 Mezcla por marea	11
4.4 Masas de agua en el Golfo de California	12
5. Metodología	15
5.1 Recolecta y análisis de muestra	15
5.2 Procesamiento de datos	18
6. Resultados	21
6.1 Análisis hidrográfico	21
6.1.1 <i>Distribución vertical de la salinidad</i>	21
6.1.2 <i>Distribución vertical de la temperatura</i>	23
6.1.3 <i>Distribución de la densidad</i>	26
6.1.4 <i>Distribución de las masas de agua</i>	29
6.2 Análisis de nutrientes	32
6.2.1 <i>Distribución vertical de nutrientes</i>	32
6.2.2 <i>Enriquecimiento superficial de nutrientes</i>	40
6.3 Efecto de la mezcla vertical sobre la distribución de los nutrientes	43
6.4 Efecto de los procesos biológicos sobre la distribución de los nutrientes (captación y regeneración)	49
7. Discusión	54
7.1 Análisis hidrológico	54
7.1.1 <i>Variabilidad espacial y temporal de la mezcla vertical en la RGI</i>	57
7.2 Efecto de la mezcla vertical sobre la distribución de los nutrientes	59

7.2.1	<i>Efecto sobre la forma del perfil</i>	59
7.2.2.	<i>Efecto sobre el enriquecimiento superficial</i>	60
7.3	Influencia del ASsSt sobre la distribución de los nutrientes en la RGI	63
7.4	Efecto de los procesos biológicos sobre la distribución de los nutrientes	66
7.4.1	<i>Razones nutriente-nutriente</i>	71
8.	Conclusiones	75
9.	Referencias	77

LISTA DE TABLAS

Número		Página
Tabla I	Clasificación de las masas de agua del Golfo de California. (Tomada de Torres-Orozco, 1993)	13
Tabla II	Concentración promedio integrada (μM) hasta 100 m de profundidad ($\pm$ error estándar) para invierno de 2002, primavera de 2003 y verano de 2004 en la RGI del GC. $n=23$, 20 y 20 para invierno, primavera y verano, respectivamente.	42
Tabla III	Concentración promedio integrada (μM) hasta 100 m de profundidad ($\pm$ error estándar) en las diferentes zonas de la RGI para invierno de 2002, primavera de 2003 y verano de 2004. Para la zona Norte se consideró las estaciones 1, 3 y 5. Para CB se tomó en cuenta las estaciones 7, 8 y 9. En la zona de los Umbrales se consideró las estaciones 23, 24, 28 y 30, mientras que para la zona Sur se tomó en cuenta las estaciones 32, 34, 36 y 38.	42
Tabla IV	Razones $\text{NO}_3:\text{PO}_4$, $\text{Si(OH)}_4:\text{PO}_4$, y $\text{NO}_3:\text{Si(OH)}_4$ ($\pm$ error estándar) para invierno de 2002, primavera de 2003 y verano de 2004 en la RGI. m es la pendiente de regresión, b es la ordenada al origen y r^2 es el coeficiente de determinación.	53
Tabla V	Concentración promedio de NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4 en el núcleo del ASsSt. Este valor se obtuvo utilizando todos los datos registrados entre 200 y 300 m de profundidad para esta masa de agua durante los tres cruceros realizados en este estudio.	64
Tabla VI	Factor de Enriquecimiento (FE) de las aguas superficiales de la RGI. $\text{FE} = ([\text{N}]_{\text{sup}} / [\text{N}]_{\text{ASST}}) \times 100$. Donde $[\text{N}]_{\text{ASST}}$ es la concentración promedio de PO_4 , NO_3 y/o Si(OH)_4 medidas en el núcleo del ASsSt. $[\text{N}]_{\text{sup}}$ = concentración promedio de PO_4 , NO_3 y/o Si(OH)_4 integrada a 100 m para cada una de las estaciones de la RGI. El FE es una medida referente a la concentración de PO_4 , NO_3 y/o Si(OH)_4 en el ASsSt, ya que un número cercano a 100, sugiere una mayor similitud con ella.	65

Tabla VII	Concentración promedio de nutrientes por mezcla/advección $[N(T,S)]$, concentración medida en la zona de los umbrales de la RGI (N_m) y debido a los procesos biológicos (N_B). Estos valores representan la concentración de nutriente integrados en los primeros 50 m de profundidad de la zona de los umbrales.	71
-----------	---	----

LISTA DE FIGURAS

Número		Página
Figura 1	Topografía de la región de las Grandes Islas del GC. En el mapa se muestran los umbrales de San Lorenzo (✕), San Esteban (✱) y del Canal de Ballenas (●). También se muestran las Cuencas de San Pedro Mártir, Tiburón y Delfín. Modificado a partir de López y García (2006).	9
Figura 2	Red de estaciones de colecta de agua en la región de las Grandes Islas del GC. En el mapa se muestran los umbrales San Lorenzo (✕), San Esteban (✱) y del norte del Canal de Ballenas (UNCB). También se muestra la ubicación de las Cuencas San Pedro Mártir (CSPM), Tiburón (CT) y Delfín (CD). Las letras indican los transectos paralelos a la costa de Baja California (A), al Eje Central del GC (B) y a la costa de Sonora (C).	17
Figura 3	Salinidad a lo largo del transecto paralelo a la costa de Baja California (A), del eje Central (B) y de la costa de Sonora (C), durante el invierno (a, b, c), primavera (d, e, f) y verano (g, h, i). Note la escala de la distancia en las figuras b, e y h. La salinidad de 35.0 define la frontera entre AGC y ASsSt. Las estaciones 23 y 24 se encuentran sobre el Umbral de San Lorenzo y San Esteban, respectivamente. Los números superiores corresponden a las estaciones de muestreo de la Fig. 1.	22
Figura 4	Temperatura (°C) a lo largo del transecto paralelo a la Costa de Baja California (A), del Eje Central (B) y de la Costa de Sonora (C), durante el invierno (a, b, c), primavera (d, e, f) y verano (g, h, i). Note la escala de la distancia en las figuras b, e y h.	25
Figura 5	Masas de agua presentes en la región de las Grandes Islas durante a) invierno, b) primavera y c) verano. En las figuras se muestran los datos de temperatura y salinidad obtenidos a lo largo de los transectos paralelos a la Costa de Baja California (□), del Eje Central (◇) y de la Costa de Sonora (○). Note la escala de la temperatura en la figura a. Las líneas sólidas indican la clasificación de las masas de agua de Torres-Orozco (1993).	27
Figura 6	σ_t a lo largo de los transectos paralelos a la Costa de Baja California (A), del Eje Central (B) y de la Costa de Sonora (C), durante el invierno (a, b, c), primavera	28

(d, e, f) y verano (g, h, i). Note la escala de la distancia en las figuras b, e y h.

Figura 7	Distribución vertical de NO_3 (a,b,c,d), PO_4 (e,f,g,h) y Si(OH)_4 (i,j,k,l) a lo largo del transecto central bajo condiciones de invierno (●), primavera (▲) y verano (□).	33
Figura 8	Distribución vertical de NO_3 (a,b,c), PO_4 (d,e,f) y Si(OH)_4 (g,h,i) a lo largo del transecto de Baja California bajo condiciones de invierno (●), primavera (▲) y verano (□). En el verano la E8 y E23 pertenecientes al CB y umbral SL no se muestrearon por condiciones climáticas desfavorables, en su lugar se tomaron como representativos la E7 y E30, respectivamente.	34
Figura 9	NO_3 (μM) a lo largo del transecto paralelo a la Costa de Baja California (A), del Eje Central (B) y de la Costa de Sonora (C), durante el invierno (a, b, c), primavera (d, e, f) y verano (g, h, i). Note la escala de la distancia en las figuras b, e y h.	37
Figura 10	PO_4 (μM) a lo largo del transecto paralelo a la Costa de Baja California (A), del Eje Central (B) y de la Costa de Sonora (C), durante el invierno (a, b, c), primavera (d, e, f) y verano (g, h, i). Note la escala de la distancia en las figuras b, e y h.	38
Figura 11	Si(OH)_4 (μM) a lo largo del transecto paralelo a la Costa de Baja California (A), del Eje Central (B) y de la Costa de Sonora (C), durante el invierno (a, b, c), primavera (d, e, f) y verano (g, h, i). Note la escala de la distancia en las figuras b, e y h.	39
Figura 12	Concentración superficial de NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4 a lo largo de la costa de Baja California (a, b, c), del eje central (d, e, f) y de la costa de Sonora (g, h, i) para invierno (●), primavera (▲) y verano (□).	41
Figura 13	Correlación entre la concentración a 0 m y la concentración promedio integrada a 100 m de a) NO_3 , b) PO_4 y c) Si(OH)_4 para invierno (●), primavera (▲) y verano (□).	44
Figura 14	Parámetro de estratificación de la columna de agua (ϕ) contra la distancia. Transecto de a) la costa de Baja California, b) eje central y c) costa de Sonora para invierno (●), primavera (▲) y verano (□). En el cálculo de ϕ se consideró solo los primeros 100 m	45

superficiales.

Figura 15	Gradiente vertical de la concentración de a) PO_4 , b) NO_3 y c) Si(OH)_4 y su relación con el parámetro de estratificación de la columna de agua para invierno (●), primavera (▲) y verano (□). El gradiente de concentración se calculó como la diferencia de concentración del nutriente entre 0 y 100 m de profundidad.	47
Figura 16	Concentración superficial de a) PO_4 , b) NO_3 y c) Si(OH)_4 y su relación con el parámetro de estratificación de la columna de agua bajo condiciones de invierno (●), primavera (▲) y verano (□).	48
Figura 17	Razones a) $\text{NO}_3\text{-PO}_4$, b) $\text{Si(OH)}_4\text{-PO}_4$, y c) $\text{NO}_3\text{-Si(OH)}_4$ en la RGI durante invierno de 2002 (●), primavera de 2003 (▲) y verano de 2004 (□).	51
Figura 18	Perfiles verticales de salinidad, temperatura y σ_t registrados en la E38 (○) durante las campañas de a) invierno y b) verano de este estudio, comparados con los perfiles reportados para un sitio cercano a la E38 (▲) y la boca del GC (■) para el verano de 1996 e invierno de 1997 (Delgadillo-Hinojosa et al., 2006).	56
Figura 19	Concentración superficial ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) de a) PO_4 , b) NO_3 y c) Si(OH)_4 en el Océano Pacífico adyacente al GC (Figura tomada de Fiedler y Talley, 2006).	61
Figura 20	Relación entre la concentración de a) PO_4 , b) NO_3 y c) Si(OH)_4 contra clorofila a de 0 - 100 m en primavera (▲) y de 0 - 75 m en verano (□).	68

1. Introducción

El Golfo de California (GC) se caracteriza por ser una región con alta diversidad y abundancia de especies comerciales y no comerciales debido a su alta productividad primaria ($1 - 4 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; Gaxiola-Castro et al., 1995; Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). Esta alta productividad es el resultado de un transporte eficiente de nutrientes hacia la capa eufótica (Valdez-Holguín y Lara-Lara, 1987). No obstante, en la capa superficial del GC los niveles de nutrientes varían espacial y temporalmente. En la escala espacial, varios autores han mostrado que las concentraciones superficiales de nutrientes incrementan desde la boca del golfo hasta la Región de las Grandes Islas (RGI), con valores máximos en el Canal de Ballenas (Álvarez-Borrego et al., 1978) y en la zona de los umbrales (Torres-Valdés, 2000). Mientras que en la escala estacional, también se ha reportado que, comparada con el verano, la capa superficial del GC se enriquece con nutrientes durante el invierno (Torres-Valdés, 2000).

Entre los diferentes mecanismos a los que se ha atribuido el enriquecimiento superficial de nutrientes en el GC se incluyen la surgencia costera (Lluch-Cota, 1999), la mezcla por marea en la RGI (Álvarez-Borrego et al., 1978; Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991) y la mezcla invernal (Torres-Valdés, 2000).

Los eventos de surgencia mas intensos se presentan en la costa este del GC durante la época de invierno y primavera debido a los fuertes vientos del noroeste (Badán-Dangón et al., 1991). Como consecuencia de este fenómeno, ocurre un fuerte acarreo de nutrientes hacia la capa superficial.

En contraste, los eventos de surgencia menos intensos se presentan en la costa oeste del GC bajo condiciones de verano debido a la interacción de los vientos débiles del suroeste (Roden, 1964, Pares et al., 2003) y una fuerte estratificación de la columna de agua que se presenta en esta época del año en el GC (Santamaría del Ángel et al., 1999).

La mezcla invernal se genera por el rompimiento de la estratificación termal de la columna de agua superficial del GC, como resultado del enfriamiento estacional (Martínez-Sepúlveda, 1994), lo cual ocasiona que la capa de mezcla superficial se profundice a lo largo de todo el golfo. Este proceso favorece que los nutrientes regenerados en la capa profunda sean llevados nuevamente hacia la superficie (Thunnel, 1998; Torres-Valdés, 2000).

La mezcla vertical a causa de las mareas, ocurre porque las mareas en el golfo están en co-oscilación con las mareas del Pacífico y la componente semidiurna se encuentra cerca de la resonancia, lo cual tiene como consecuencia que la amplitud de la marea se incremente desde la boca hacia la cabeza del GC (Lavín y Marinone, 2003). En el norte del GC, la onda de marea se acopla con la topografía abrupta, causando fuertes corrientes de marea (Mateos et al., 2006). Esta interacción, provoca la mezcla de la columna de agua (Argote et al., 1995), teniendo el efecto neto de transportar agua fría y rica en nutrientes hacia la superficie (Cortés-Lara et al., 1999).

La circulación estacional del GC también se ha considerado un mecanismo de enriquecimiento con nutrientes debido a que introduce agua

rica en nutrientes proveniente del Océano Pacífico hacia el interior del GC. Esta circulación ocurre porque el GC pierde agua por evaporación ($\sim 1 \text{ m año}^{-1}$ Bray, 1988; Lavín y Organista, 1988) pero además gana calor desde la atmósfera (Castro *et al.*, 1994). Esta condición provoca que se forme una capa superficial de agua caliente, salina y menos densa que fluye hacia fuera del golfo y, para compensar este volumen, un flujo de agua subsuperficial que ocurre entre 150 y 500 m de profundidad, entra hacia el interior del golfo (Bray, 1988). En verano, este flujo de entrada, constituido fundamentalmente por Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt), se presenta con una menor intensidad debido a la intrusión superficial al GC del Agua Superficial Ecuatorial (ASE; Torres-Orozco, 1993). En invierno, el flujo de entrada de ASsSt se presenta de manera mas intensa, ya que aumenta el flujo de salida superficial del Agua del Golfo de California (AGC) debido a la retracción del ASE hacia fuera del GC. En particular, se ha propuesto que el ASsSt, la cual se caracteriza por ser fría, rica en nutrientes y en carbono orgánico disuelto, al llegar a la RGI se transporta hacia la capa superficial a través de la mezcla vertical inducida por la marea (López y García, 2003; Marinone y Lavín, 2003; Camiro-Vargas, 2004).

Estudios realizados sobre la composición química del agua a lo largo del GC han mostrado que los valores superficiales más altos de diferentes componentes químicos como los nutrientes (Álvarez-Borrego *et al.*, 1978; Torres-Valdés, 2000), metales como el cadmio (Delgadillo-Hinojosa, 2000; Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 2001) y las variables de sistema del CO_2 (Hernández-Ayón, 2000; Hernández-Ayón, 2007b) se encuentran en la RGI.

Por ejemplo, Cortés-Lara et. al. (1999) contrastaron el contenido de nutrientes superficiales entre la región de la boca del GC y la zona de la RGI durante un crucero realizado en verano. Estos autores encontraron los valores más altos de nutrientes en la zona de los umbrales de la RGI, mientras que los más bajos fueron registrados en la boca del golfo. Ellos sugirieron que las altas concentraciones de nutrientes se deben a la alta mezcla que se presenta en la zona de las islas a causa de la marea. De manera similar, Delgadillo-Hinojosa et al. (2001) reportaron que la RGI representa una fuente importante de fósforo y cadmio a las aguas superficiales del GC durante el verano, y lo atribuyeron a la mezcla vertical asociada a las mareas. Del mismo modo, otros investigadores han reportado que los valores de CO_2 total se incrementan en la RGI tanto en condiciones de verano (Hernández-Ayón, 2000; Hernández-Ayón et al., 2007a) como de invierno (Camiro-Vargas, 2004), lo cual ha sido atribuido al transporte vertical de agua subsuperficial rica en CO_2 hacia la superficie. Además, ellos detectaron condiciones de sobresaturación de CO_2 por lo que sugirieron que la zona de las islas se comporta como fuente de CO_2 hacia la atmósfera (Hernández-Ayón et al., 2007a). Además, también se ha observado la presencia de agua fría sobre la superficie en lugares específicos como la zona de los umbrales (Navarro-Olache et al., 2004) y el Canal de Ballenas (CB) (Martínez-Díaz-de-León et al., 2006). De este modo, la zona del CB y los umbrales dentro de la RGI podrían ser sitios clave para la explicación del bombeo de nutrientes hacia la superficie.

Los estudios anteriores indican que la RGI funciona como una zona de bombeo de diferentes variables químicas hacia la superficie debido a la intensificación de la mezcla vertical. El bombeo de estos elementos químicos se magnifica bajo condiciones de invierno, época en la que la columna de agua se encuentra mucho mas mezclada ($\phi = 5 - 16 \text{ J m}^{-3}$; Torres-Valdés, 2000). Aunque este bombeo aún está presente durante el verano, época en que se encuentra la mayor estratificación de la columna de agua ($\phi = 75 - 125 \text{ J m}^{-3}$; Cortés-Lara et al., 1999; Delgadillo-Hinojosa et al., 2001). Delgadillo-Hinojosa (2000) explicó el efecto de las condiciones de mezcla sobre la distribución de cadmio en la RGI a través de un modelo de fracciones de mezcla de masas de agua. Bajo condiciones de invierno, este autor calculó que el contenido de cadmio en la zona de los umbrales, en los primeros 50 m superficiales de la RGI, puede explicarse por una mezcla de 41% de AGC y 59% de ASsSt. En contraste, en verano, la misma capa superficial se explicó por una mezcla de 15% de ASE, 33% de ASsSt y 52% de AGC.

A pesar de las aportaciones de los trabajos descritos anteriormente, aun existe un conocimiento escaso de la variabilidad espacial y temporal de la concentración de los nutrientes y su asociación con las condiciones de la mezcla vertical y la circulación estacional en la RGI. En este estudio se pretende alcanzar un mayor entendimiento de la importancia que tienen los procesos físicos en controlar la distribución vertical y el enriquecimiento con nutrientes de la capa superficial en la RGI del GC.

2. Objetivo General

Estudiar el efecto que ejerce la mezcla vertical y los procesos biológicos sobre la distribución espacial y la variabilidad temporal de la concentración de nutrientes inorgánicos (nitratos, fosfatos, silicatos) en la RGI del GC.

2.1 Objetivos particulares

- Caracterizar las masas de agua presentes en las diferentes épocas del año en la región de las Grandes Islas.
- Detectar la influencia de las masas de agua profundas sobre las masas de agua superficiales.
- Describir la distribución espacial y la variabilidad temporal de la concentración de nutrientes en la región de las Grandes Islas.
- Estudiar el efecto de la intensidad de la mezcla vertical sobre la distribución espacial y la variabilidad temporal de la concentración de los nutrientes.
- Estudiar el efecto de los procesos biológicos sobre la distribución espacial y la variabilidad temporal de la concentración de los nutrientes.

3. Hipótesis

Estudios previos, han sugerido que las aguas subsuperficiales en la región de las Grandes Islas actúan como una fuente de elementos químicos para la capa superficial, como consecuencia de la mezcla vertical de la columna de agua en conjunto con la circulación termohalina. Por ello, la variabilidad en la concentración de los nutrientes inorgánicos se espera que este influenciada por la intensidad de la mezcla vertical y la penetración estacional de las masas de agua hacia el interior del GC. Se hipotetiza que el enriquecimiento superficial estará en función fundamentalmente del aporte de nutrientes del ASsSt, y los principales sitios de bombeo serán el CB y la región de los umbrales. Por efecto de la mezcla, en los sitios de bombeo la distribución típica de los nutrientes cambiará por una distribución vertical más homogénea, producto del enriquecimiento del agua superficial. Mientras que en los sitios de mayor estratificación, la distribución típica se mantendrá con valores bajos en la superficie que aumentan hacia el fondo por efecto de los procesos biológicos. En relación a la variabilidad temporal, la concentración superficial de los nutrientes será mayor durante el invierno a causa de la mezcla invernal y a una mayor proporción del ASsSt. En contraste, durante el verano, la concentración superficial de los nutrientes será menor debido a que disminuirá la proporción de ASsSt presente en la RGI.

4. Área de estudio

4.1 Descripción general.

El GC se localiza en el noroeste de México, entre la árida Península de Baja California y los también estados áridos de Sonora y Sinaloa (Fig. 1). Mide aproximadamente 1200 km de largo y 150 km de ancho y tiene una orientación de noroeste a sureste (Case, 1983). Entre la provincia norte y sur del golfo se encuentra la RGI, la cual está formada por una serie de umbrales, canales, cuencas e islas de diferentes tamaños, donde las islas Ángel de la Guarda y Tiburón son las más sobresalientes.

El GC se divide en dos partes de acuerdo a sus condiciones topográficas: 1) la zona entre la boca y la RGI que presenta más de 2000 m de profundidad y tiene comunicación abierta con el Océano Pacífico (Álvarez-Borrego, 1983); y 2) la zona de la RGI a la cabeza del golfo que tiene una profundidad menor a 200 m (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979). La separación de ambas partes está limitada por el umbral sur del CB o Umbral San Lorenzo, el cual se encuentra aproximadamente a 450 m de profundidad (Fig. 1).

La RGI presenta un régimen hidrográfico diferente al resto del GC. Esta región se extiende desde el norte de la Isla Ángel de la Guarda (29°34'N) hasta la isla San Pedro Mártir (28°23'N). Aquí se presentan una serie de cuencas y umbrales, como Cuenca Delfín (CD), Cuenca Salsipuedes o Canal de Ballenas (CB), Cuenca Tiburón (CT), Umbral San Esteban (USE), Umbral San Lorenzo (USL) y Cuenca San Pedro Mártir (CSPM). La topografía que presenta esta región en combinación con las

fuertes corrientes de marea genera una intensa mezcla vertical, creando en esta zona del GC un régimen hidrográfico único.

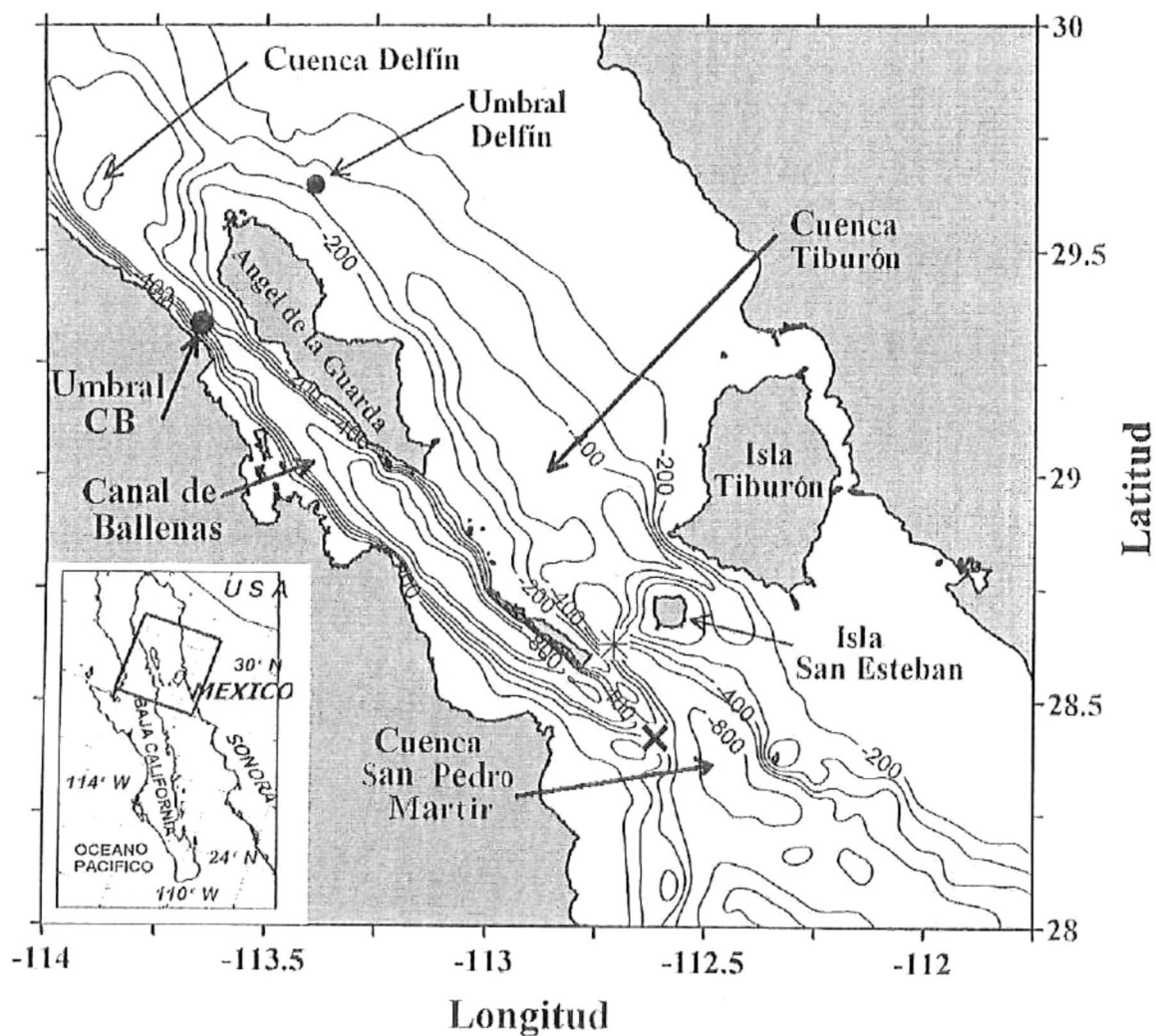


Figura 1. Topografía de la región de las Grandes Islas del GC. En el mapa se muestran los umbrales de San Lorenzo (X), San Esteban (*) y del Canal de Ballenas (●). También se muestran las Cuencas de San Pedro Mártir, Tiburón y Delfín. Modificado a partir de López y García (2006).

4.2 Circulación general en el Golfo de California.

El GC presenta un clima con un efecto moderado por parte del Océano Pacífico debido a que se encuentra relativamente aislado por una cadena de montañas continua de 1 a 3 km de altura en Baja California. Así, su climatología está más influenciada por las tierras áridas que lo rodean, que por el océano (Álvarez-Borrego, 1983).

En este mar marginal, la evaporación excede a la precipitación en la superficie, originando una pérdida de humedad hacia la atmósfera, lo cual ocasiona que su salinidad sea mayor en comparación al agua oceánica adyacente (Ketchum, 1983). Sin embargo, en un ciclo anual, a pesar de tener una fuerte evaporación (1 m año^{-1}), presenta una ganancia neta de calor 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 poco densa, provocando un flujo de agua ligera con salida por la superficie y un flujo de agua más densa con entrada por el fondo (Bray, 1988a). Esta circulación trae como consecuencia que el golfo exporte sal y calor al Océano Pacífico por la superficie y reciba por el fondo agua fría y rica en nutrientes.

Bray (1988) propuso un modelo de circulación de tres capas de acuerdo a las corrientes superficiales y a la circulación termohalina del GC. 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 estacionales, con mayor intensidad del noroeste durante el invierno y del sureste durante el verano (Badán-Dangón *et al.*, 1991). La segunda capa, se encuentra entre los 50 y

250 m de profundidad y fluye hacia afuera del golfo. La tercera capa, se encuentra entre los 250 y 500 m y fluye hacia el interior del golfo.

De manera particular en la RGI, existe una corriente sobre el fondo de los umbrales San Esteban y San Lorenzo que fluye hacia el noroeste causando una circulación de dos capas (Marinone y Lavín, 2003). El agua subsuperficial sobrepasa el USE y USL por el fondo, cercano a los 350 y 400 m, respectivamente y llena las cuencas más profundas de la región norte, mientras que una capa intermedia y otra superficial fluyen hacia afuera de la región norte (Marinone y Lavín, 2003; López et al., 2006).

4.3 Mezcla por marea.

En el GC las mareas intensas combinadas con otros forzamientos como el viento, el intenso calentamiento solar, la comunicación directa con el Océano Pacífico y la interacción con una topografía compleja, producen una circulación variable y vigorosa (Carbajal y Backhaus, 1997). Desde las primeras mediciones hidrográficas en el GC, la RGI fue identificada como una zona de mezcla intensa debido a la presencia de agua fría sobre la superficie. Actualmente se ha observado que la presencia de agua fría en la superficie se presenta en lugares específicos como la zona de los umbrales (Navarro-Olache et al., 2004) y el CB (Martínez-Díaz-de-León et al., 2006). Así, las primeras evidencias físicas de que la mezcla ocurría durante todo el año fueron las observaciones continuas de menor temperatura superficial en la RGI en relación al resto del GC.

En la RGI, la fricción del agua con el fondo juega un papel importante en la generación de la mezcla vertical, debido a que la marea disipa grandes cantidades de energía ($\sim 0.1 \text{ W m}^{-2}$ Argote et al., 1995). Este valor es 20 veces mayor en esta región que en el centro y sur del golfo (Paden et al., 1991) y tiene un fuerte impacto que afecta la estratificación profunda en la RGI (Simpson et al., 1994). De manera particular, se ha detectado que la mezcla mas fuerte ocurre sobre y cercano a los umbrales, aun en mareas muertas se presentan altos niveles de disipación de energía alrededor del USL, USE y en el UNCB, mientras que durante las mareas vivas, el área con mayor nivel de energía se amplía incluyendo a las Cuencas San Pedro Mártir, Tiburón y Delfín. En general, el forzamiento de mareas vivas es más grande que las de mareas muertas pero casi no existe diferencia entre invierno y verano (Marinone y Lavín, 2003).

4.4 Masas de Agua en el Golfo de California.

En el GC se han encontrado seis masas de agua (Bray y Robles, 1991; Torres-Orozco, 1993; Alvarado-Aguilar, 1998). Tres de estas masas de agua se presentan en la superficie: Agua fría de baja salinidad de la Corriente de California (ACC); agua cálida y de salinidad intermedia del Pacífico Oriental Tropical o Agua Superficial Ecuatorial (AST o ASE) y agua caliente y salina del Golfo de California (AGC). Por debajo de estas masas de agua se encuentran el ASsSt que viene desde el Pacífico Tropical en donde se puede encontrar con un marcado máximo de salinidad en la termoclina (Wyrčki, 1966, 1967; Fiedler y Talley, 2006). En el interior del GC,

el ASsSt se transforma en el AGC, a través de la intensa evaporación que ocurre en el golfo norte (Torres-Orozco, 1993; Lavín et al., 1995).

Por debajo del ASsSt se localizan las masas de Agua Intermedia del Pacífico (AIP) y Agua Profunda del Pacífico (APP). El AIP se caracteriza por presentar un mínimo de salinidad de 34.5 alrededor de los 900 m. Por debajo de los 1100 m de profundidad, el APP se distingue por un incremento de la salinidad a partir del mínimo de salinidad del AIP (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Torres-Orozco, 1993; Lavín y Marinone, 2003).

En general, el 74% del volumen total del golfo lo ocupan las masas de aguas profundas; el AIP contribuye con el 33% y el APP con el 41%. El volumen restante lo ocupan tres masas de agua: el ASsSt (19%), el AGC (6%) y el ASE (1%), mientras que la contribución del ACC al volumen total del golfo es pequeña (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 superficiales y subsuperficiales en el interior del GC varían a lo largo del año, mientras que las masas de agua profundas no muestran variaciones estacionales apreciables en términos volumétricos (Torres-Orozco, 1993). El ASE invade solamente la región de la boca del GC en invierno, mientras que en verano se encuentra prácticamente hasta el sur de la RGI (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Torres-Orozco, 1993). En la RGI, el ASsSt sobrepasa el USE y se mezcla con el AGC (López y García, 2003). Esta agua que se mezcla sobre los umbrales es transporta hacia el sur de la RGI, lo cual contribuye a la alta productividad biológica del GC (Gaxiola-Castro et al., 1995). Por otro lado, el ASsSt también se moviliza por el fondo hacia el norte, donde contribuye a la renovación del agua de las cuencas mas profundas de la región norte del GC, como Canal de Ballenas, Cuenca Tiburón y Delfín (López et al., 2008).

5. Metodología

5.1 Recolecta y análisis de muestras

Las muestras de agua de mar fueron recolectadas durante tres cruceros oceanográficos realizados en la RGI del GC a bordo del B/O Francisco de Ulloa (Fig. 2). El crucero Umbral I se realizó en el invierno de 2002 (del 17 al 22 de marzo). El Umbral II se llevó a cabo en la primavera del 2003 (del 12 al 17 mayo), mientras que el Umbral III se efectuó en el verano de 2004 (del 30 de agosto al 5 de septiembre). En el diseño experimental se consideró el gradiente horizontal en la distribución de la intensidad de la mezcla vertical, con a) mezcla intensa en la zona de los umbrales y b) condiciones de menor mezcla en la zona alejada de ellos. Con la intención de cubrir los diferentes regímenes hidrográficos presentes en la RGI, se consideró una red de 38 estaciones oceanográficas, distribuidas en 3 transectos: uno paralelo a la costa de Baja California (A), otro paralelo al eje central del GC (B) y el tercero, paralelo a la costa de Sonora (C; Fig.2).

Las muestras de agua mar para el análisis de los nutrientes se colectaron en cada estación, desde la superficie hasta 1000 m (en donde fue posible), utilizando una roseta equipada con 6 botellas Niskin de 5 L de capacidad y un CTD modelo SeaBird. Las muestras fueron almacenadas en botellas de polietileno de 250 mL, se congelaron y se mantuvieron a -20°C hasta el momento de su análisis en el laboratorio. También se tomaron muestras de agua para el análisis de salinidad en botellas de borosilicato y para el análisis de oxígeno en botellas DBO de 300 mL. La determinación del oxígeno disuelto se llevó a cabo a bordo del barco utilizando el método

Microwinkler y la salinidad se determinó a partir de la medición de la conductividad usando un Salinómetro 3400B de la marca Guildline. En el laboratorio, las muestras para los análisis de nutrientes se descongelaron y se filtraron a través de filtros de fibra de vidrio GF/C Whatman de 24 mm de diámetro con un poro nominal de 0.7 μm . La cuantificación se realizó con un Autoanalizador de Flujo Segmentado modelo Skalar San Plus con modificaciones de los métodos colorimétricos descritos por Strickland y Parsons (1972).

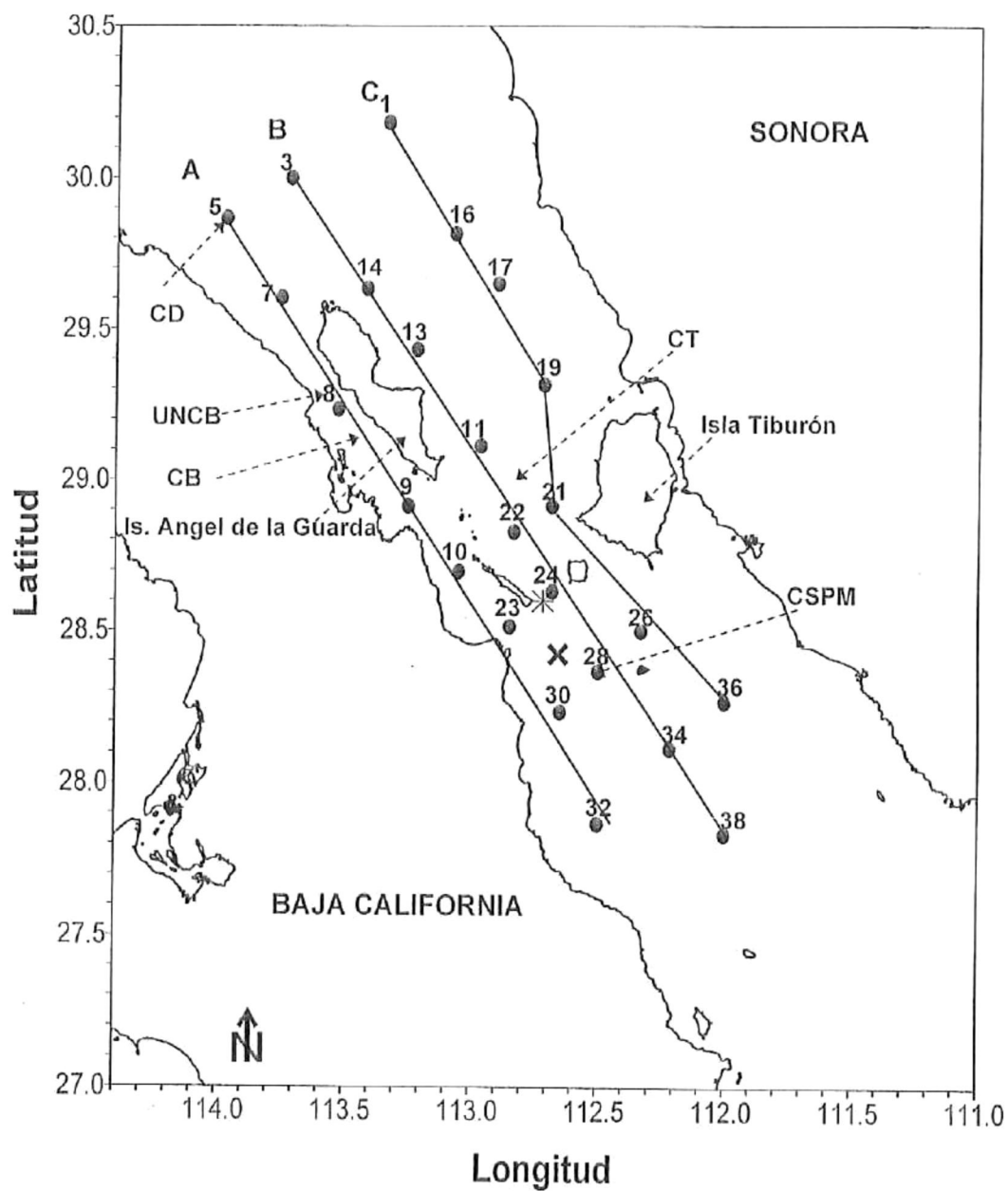


Figura 2. Red de estaciones de colecta de agua en la región de las Grandes Islas del GC. En el mapa se muestran los umbrales San Lorenzo (X), San Esteban (*) y del norte del Canal de Ballenas (UNCB). También se muestra la ubicación de las Cuencas San Pedro Mártir (CSPM), Tiburón (CT) y Delfín (CD). Las letras indican los transectos paralelos a la costa de Baja California (A), al Eje Central del GC (B) y a la costa de Sonora (C).

5.2 Procesamiento de datos.

Se realizó un análisis hidrográfico utilizando diagramas de temperatura-salinidad (T-S) para caracterizar los diferentes regímenes hidrográficos e identificar las masas de agua presentes en las diferentes estaciones del año en el área de estudio, así como para estudiar la influencia de aguas profundas sobre la capa superficial.

Se efectuó un análisis gráfico de los gradientes verticales y horizontales de los nutrientes para identificar las zonas con mayores concentraciones de nutrientes superficiales, así como para observar la variabilidad espacial y temporal que presentan estos elementos en la zona de las Grandes Islas.

Para evaluar la intensidad de la mezcla vertical de la columna de agua se calculó el parámetro de estratificación (ϕ) de acuerdo a la ecuación descrita por Simpson y Bowers (1981):

$$\phi = \frac{1}{h} \int (\rho - \bar{\rho}) \cdot g z dz$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{h} \int \rho \cdot dz$$

Donde ϕ es la cantidad de energía promedio requerida para mezclar la columna de agua (es cero para una columna bien mezclada y aumenta con la estratificación), h es la profundidad de la columna de agua, (en este trabajo $h = 100$ m), ρ es la densidad del agua a cada profundidad de colecta, $\bar{\rho}$ es la densidad promedio para el intervalo de 0-100 m, g es la

aceleración debido a la gravedad, z es la coordenada vertical (positivo hacia arriba) y dz es el incremento de profundidad.

Así, una gráfica del parámetro de estratificación contra la distancia permitió distinguir las zonas con mayor influencia de la mezcla vertical. Además, se correlacionó la concentración de nutrientes superficiales con el ϕ , con el propósito de estudiar el efecto que ejerce la mezcla vertical sobre la disponibilidad de los nutrientes, así como el enriquecimiento superficial de la columna de agua en la región del archipiélago.

Las concentraciones promedio superficiales de nutrientes se calcularon de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\overline{N} = \frac{1}{h} \int N \cdot dz$$

Donde $\overline{N}$ es la concentración de nutriente promedio, N es la concentración de nutriente medida a las diferentes profundidades desde 0-100 m y h es la profundidad total de la columna de agua integrada (100 m para este estudio).

El efecto de la actividad biológica se observó a través de la razón N:P. De manera general el fitoplancton remueve nitrógeno y fósforo del ambiente en razones molares cercanas a la razón de Redfield (16:1). Por lo que esta razón permitió observar si existían otros procesos adicionales a la fotosíntesis y respiración, tales como la nitrificación, fijación de nitrógeno o desnitrificación que estuvieran afectando la distribución de los nutrientes.

Otra manera de analizar el efecto de los procesos biológicos sobre la concentración de los nutrientes en la RGI, fue calcular la concentración de nutrientes en la superficie debido a los procesos físicos y sustraerla de la concentración medida, siguiendo el procedimiento de Delgadillo-Hinojosa (2000). Así, la concentración de nutrientes debida a los procesos biológicos se calculó de la siguiente manera:

$$N_B = N_m - N(S,T)$$

Donde N_B es la concentración de nutriente afectado por procesos biológicos como la fotosíntesis y/o respiración de la materia orgánica, N_m es la concentración del nutriente medido y $N(S,T)$ es la concentración del nutriente conservativo u ocasionado por mezcla y advección.

Para calcular la concentración de nutrientes debido a la mezcla y advección es necesario utilizar las fracciones de mezcla de las masas de agua presentes en el área de estudio. Como una primera aproximación, se utilizó el porcentaje de masas de agua para los primeros 50 m (invierno= 41% AGC y 59% ASsSt; verano= 52% AGC, 33% ASsSt y 15% ASE) reportados solo para la zona de los umbrales (Delgadillo-Hinojosa, 2000; Delgadillo-Hinojosa et al., 2008). Así, la concentración de nutriente conservativo se calculó de la siguiente manera:

$$N(S,T) = X_1 * N_1 + X_2 * N_2$$

Donde: X_1 es el porcentaje de AGC presente sobre los umbrales y N_1 es la concentración de nutriente en el AGC medido en este estudio. X_2 es el porcentaje de ASsSt presente sobre los umbrales y N_2 es la concentración de nutriente en el ASsSt medido en este estudio.

6. Resultados

6.1 Análisis Hidrográfico.

6.1.1 Distribución vertical de la salinidad.

La distribución vertical de la salinidad registrada a lo largo de los tres transectos durante los cruceros de invierno, primavera y verano se presenta en la figura 3. Durante el invierno, la salinidad presentó valores superficiales mínimos de 35.0 a 35.1 en la región del USL (E23-E30; Fig. 3a), umbral norte del CB (UNCB, E8), USE y CSPM (E24, E28; Fig. 3b), mientras que los valores máximos superficiales de salinidad (35.2 - 35.4) fueron registrados en las zonas sur y norte del área de estudio (Fig. 3a b, c). En primavera, la salinidad en el USL fue de ~35.3 y en el UNCB ~35.4 (Fig. 3d). Hacia el USE y CSPM se registró una salinidad de ~35.2 (Fig. 3e), lo que sugiere agua de menor salinidad en estos sitios que al norte del área de estudio donde los valores de salinidad encontrados fueron de ~35.5 - 35.6. Este incremento en la salinidad tanto en la zona de los umbrales como el sur sugieren una época de transición donde el agua superficial empieza a tener una mayor evaporación y por lo tanto de mayor salinidad (Fig. 3d, e, f). Así, para el verano, se observó que la salinidad superficial aumentó consistentemente a partir de valores de ~35.2 medidos en la zona sur, hasta alcanzar niveles de ~35.7 al norte de los umbrales (Fig. 3g, h, i) con valores ligeramente menores de ~35.3 - 35.5 USL y CB (Fig. 3d), USE y CSPM (Fig. 3g, h).

Por debajo de los 100 m de profundidad, la variabilidad de la salinidad fue muy pequeña. Por ejemplo, en el transecto central, la salinidad entre los

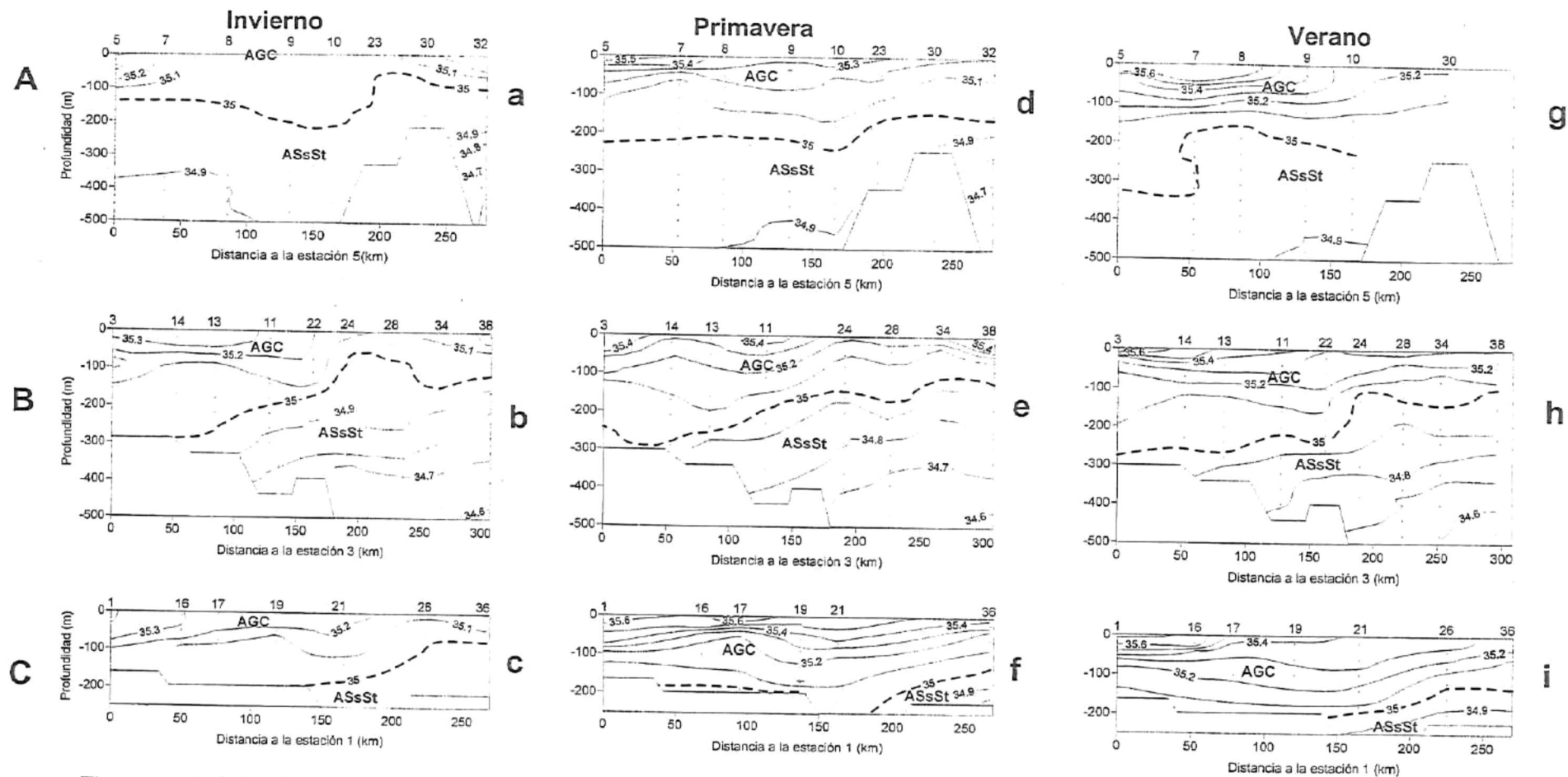


Figura 3. Salinidad a lo largo del transecto paralelo a la costa de Baja California (A), del eje Central (B) y de la costa de Sonora (C), durante el invierno (a, b, c), primavera (d, e, f) y verano (g, h, i). Note la escala de la distancia en las figuras b, e y h. La salinidad de 35.0 define la frontera entre AGC y ASsSt. Las estaciones 23 y 24 se encuentran sobre el Umbral de San Lorenzo y San Esteban, respectivamente. Los números superiores corresponden a las estaciones de muestreo de la Fig. 1.

120 y los 500 m de profundidad, presentó una diferencia de ~ 0.4 en invierno, 0.5 en primavera y 0.6 en verano (Fig. 3b, e y h). En contraste, en el interior del CB y específicamente sobre el UNCB, la diferencia en salinidad entre los 120 m y 500 m fue de 0.1 en invierno, de 0.2 en primavera y 0.3 en verano (Fig. 3a, d y g), indicando que el CB presenta una columna de agua verticalmente mas homogénea durante todas las estaciones del año, lo cual implica una condición semipermanente de intensa mezcla de la columna de agua.

6.1.2 Distribución vertical de la temperatura.

La distribución vertical de la temperatura en los tres transectos se presenta en la figura 4. Al igual que la salinidad, la temperatura mostró mayor variabilidad en los primeros 100 m de profundidad. En invierno, a lo largo del transecto paralelo a Baja California, la temperatura superficial decreció de $\sim 18^\circ\text{C}$ en la zona sur hasta $\sim 14^\circ\text{C}$ en la zona del USL y CB. En contraste, la temperatura aumentó desde la zona de los umbrales hacia la parte norte, alcanzando valores hasta de 16°C (Fig. 4a). Un comportamiento similar se observó en el transecto a lo largo del eje central, con una temperatura superficial mínima de $\sim 15^\circ\text{C}$ en la zona del USE y en la CSPM, mientras que al norte y sur del transecto la temperatura fue de $\sim 16^\circ\text{C}$ (Fig. 4b).

En primavera, la temperatura presentó un comportamiento similar al de invierno solo que con una mayor temperatura superficial y menor diferencia entre los umbrales y las zonas norte-sur del área de estudio (Fig.

4d, e, f). En el USE, USL y CSPM se registró una temperatura de $\sim 18^{\circ}\text{C}$, mientras que en las zonas norte y sur del área de estudio se registraron valores entre $\sim 18^{\circ}\text{C}$ y 20°C .

En verano, se observó un claro aumento de la temperatura en el agua de la capa superficial de toda la RGI (Fig. 4g, h, i). En esta época del año, los valores superficiales de la temperatura fueron de $\sim 28^{\circ}\text{C}$ en la zona sur y norte de la RGI, mientras que en el interior del CB la temperatura registrada fue de $\sim 26^{\circ}\text{C}$. Así, estos resultados muestran que la temperatura superficial en la RGI presentó un incremento de $\sim 3^{\circ}\text{C}$ de invierno a primavera y hasta de $\sim 10^{\circ}\text{C}$ de invierno a verano.

La capa subsuperficial entre 100 y 500 m de profundidad en el CB mostró una clara variación estacional del gradiente vertical de la temperatura. En invierno, por ejemplo, se encontró una columna de agua completamente mezclada con una temperatura de aproximadamente 14°C . En cambio, durante la primavera, el gradiente de la temperatura registrada entre 100 y 500 m de profundidad fue de 1°C , mientras que en el verano el gradiente de la temperatura fue de 5°C (Fig. 4a, d, g). De la misma manera, en el eje central, se observó que el gradiente de la temperatura entre 100 y 500 m de profundidad, también aumentó de invierno a verano en la parte sur del área de estudio. Así, el gradiente de temperatura fue de 5°C en invierno, 6°C en primavera y 7°C durante el verano (Fig. 4b, e, h). Estos resultados muestran que hubo una mayor estratificación de la columna en el transecto central comparado con el CB, incluso durante el invierno.

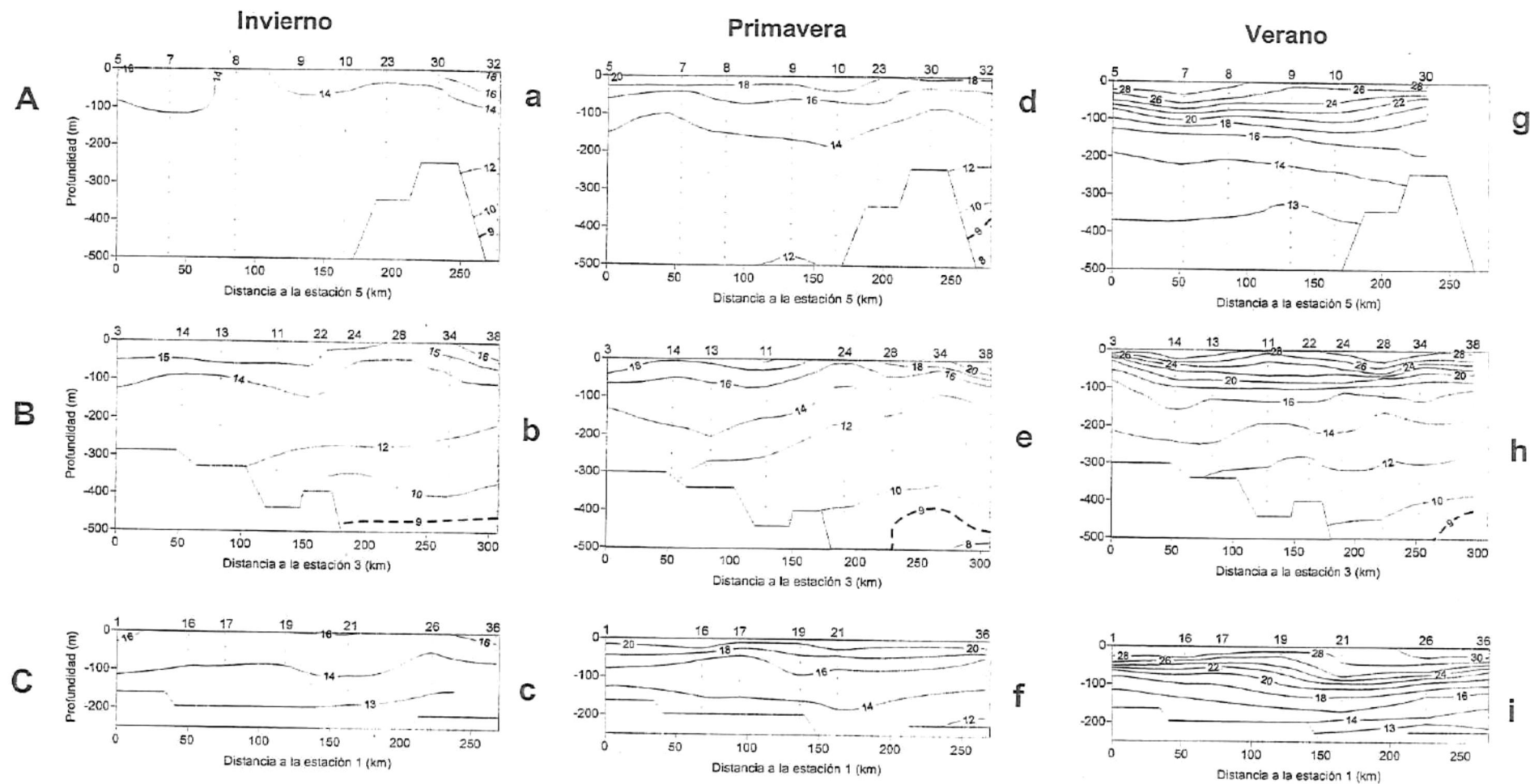


Figura 4. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) a lo largo del transecto paralelo a la costa de Baja California (A), del eje Central (B) y de la costa de Sonora (C), durante el invierno (a, b, c), primavera (d, e, f) y verano (g, h, i). Note la escala de la distancia en las figuras b, e y h.

6.1.3 Distribución de la densidad.

El diagrama TS de invierno muestra que la densidad presentó una división (Fig.5a) entre las estaciones de la parte norte del área de estudio con valores por debajo de la isopícnica de 26 kg/m^3 y las estaciones de la parte sur, con valores por encima de la isopícnica de 26 kg/m^3 . Consistente con estos resultados, la figura 6(a, b, c) muestra que el agua superficial de la parte norte presentó mayor densidad ($\sigma_t > 26.0 \text{ kg/m}^3$) que el agua superficial de la parte sur ($\sigma_t < 26.0 \text{ kg/m}^3$), principalmente en el CB, USL, USE, CSPM y norte del transecto de Sonora. En la primavera, el agua superficial de la RGI presentó menor densidad en comparación con el invierno. La división en la densidad entre la parte norte y sur de la RGI también se observó en esta época del año aunque no tan claramente como en invierno, debido al incremento en la temperatura. Así, en las estaciones del norte (E5, E3 y E1) también se observó agua de mayor densidad en relación a la zona sur durante la primavera.

Durante el verano, aunque con una menor densidad también se observó la división entre la zona norte y sur de la RGI (Fig. 5c). El agua superficial presentó una mayor estratificación a lo largo de toda la RGI y además fue menos densa que en primavera aunque los valores de mayor densidad se encontraron en el CB y la zona de los umbrales (Fig. 6g, h, i).

La capa subsuperficial entre 100 y 500 m de profundidad en el CB mostró una clara variación estacional del gradiente vertical de la densidad. En el interior del CB, el gradiente de la densidad registrada fue de aproximadamente 0.2 kg/m^3 en invierno y primavera, mientras que en verano

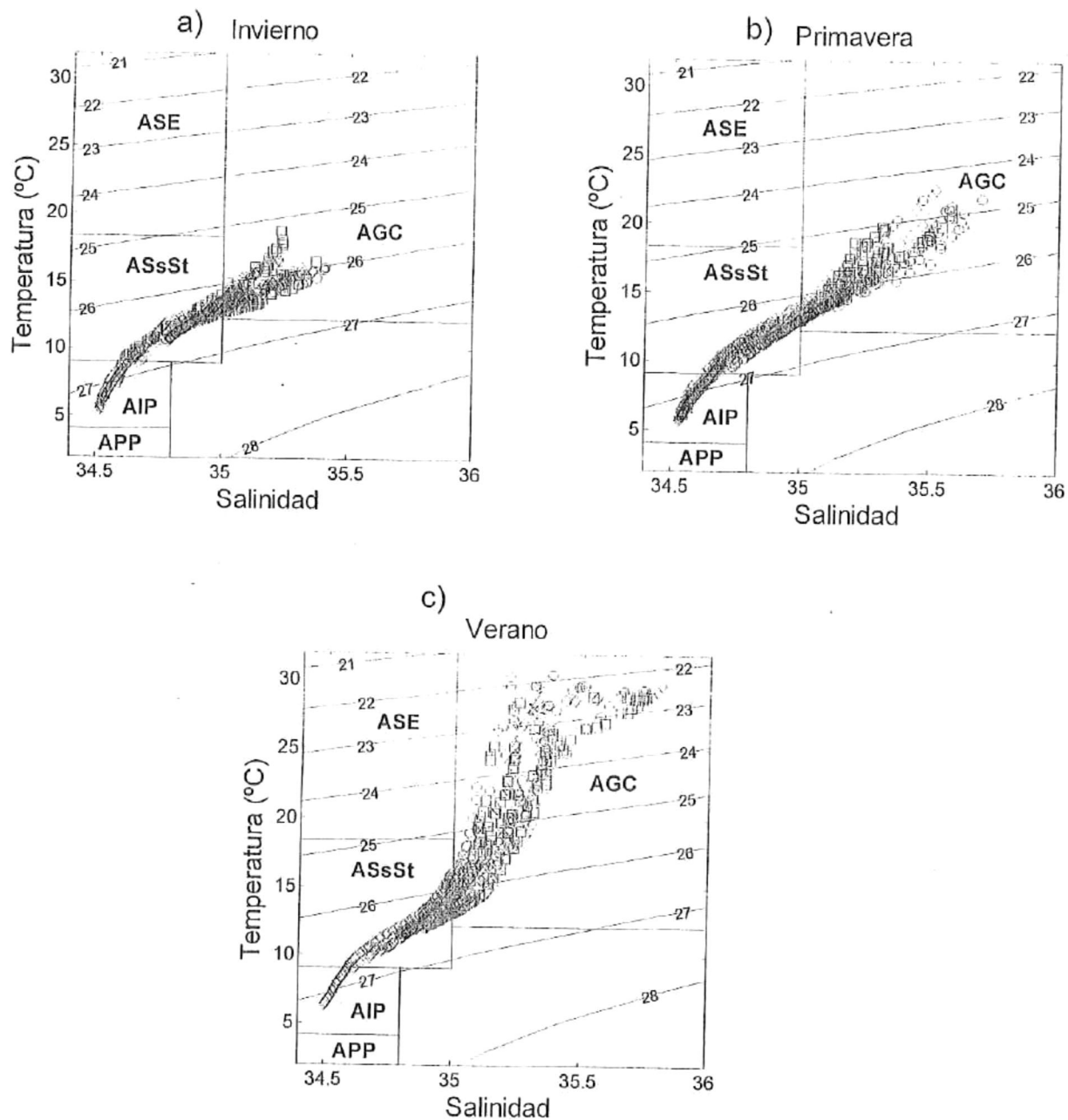


Figura 5. Masas de agua presentes en la región de las Grandes Islas durante a) invierno, b) primavera y c) verano. En las figuras se muestran los datos de temperatura y salinidad obtenidos a lo largo de los transectos paralelos a la costa de Baja California ($\square$), del eje central ($\diamond$) y de la costa de Sonora ($\circ$). Las líneas sólidas indican la clasificación de las masas de agua de Torres-Orozco (1993).

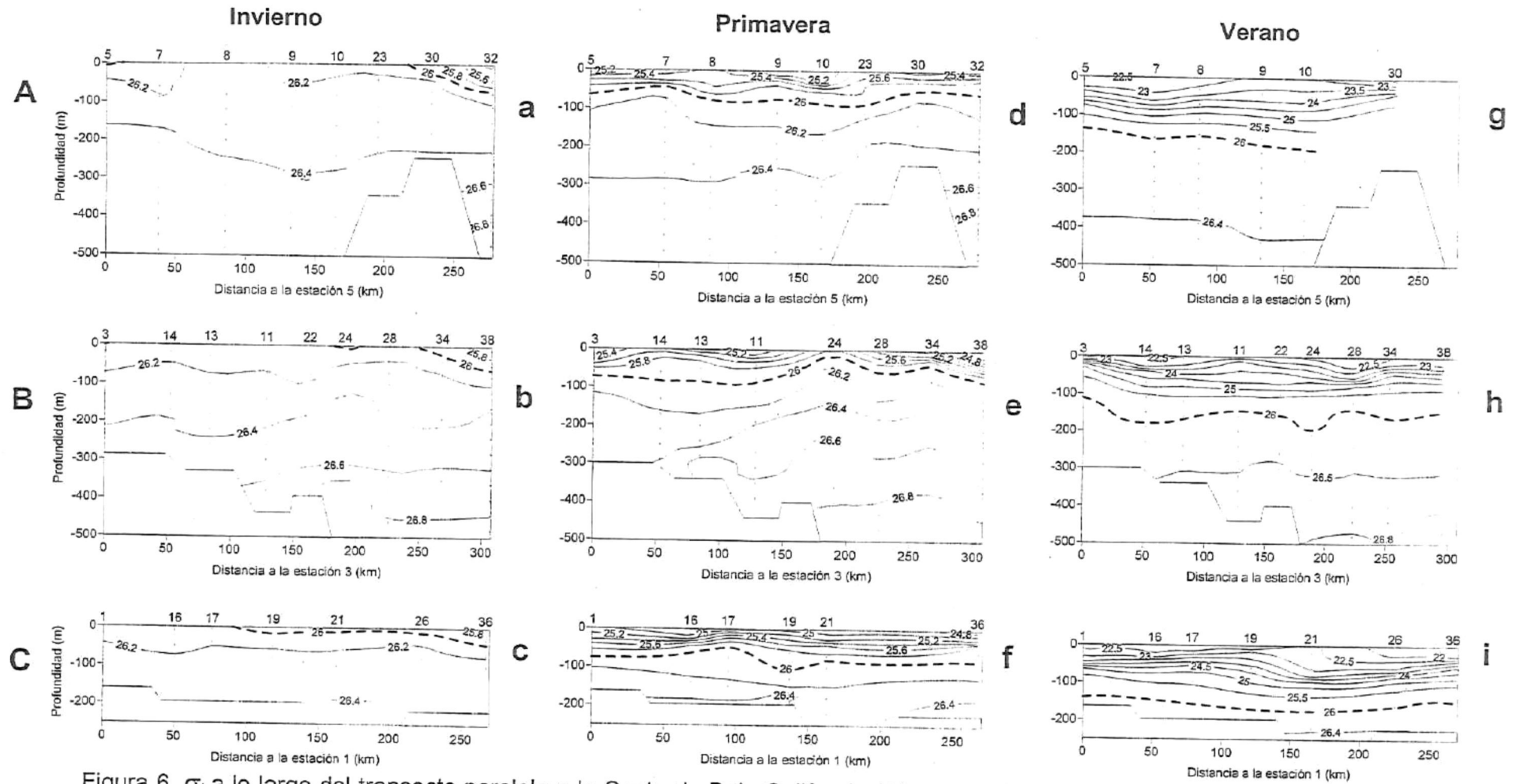


Figura 6. σ_t a lo largo del transecto paralelo a la Costa de Baja California (A), del Eje Central (B) y de la Costa de Sonora (C), durante el invierno (a, b, c), primavera (d, e, f) y verano (g, h, i). Note la escala de la distancia en las figuras b, e y h.

se registró un gradiente de densidad de 0.9 kg/m^3 (Fig. 4a, d y g), indicando que el CB se estratifica ligeramente de invierno a verano. En el eje central también se observó que existe una mayor estratificación hacia el verano. Los gradientes verticales de densidad estimados fueron de 0.6 kg/m^3 para invierno y primavera, mientras que en verano fue de 1.3 kg/m^3 . Así, estos resultados sugieren que las condiciones de mezcla de la columna de agua prevalecieron en el interior del CB (Fig. 4b, e, h).

6.1.4 Distribución de las masas de agua.

Los diagramas T-S para los tres cruceros realizados en la RGI muestran la presencia del AGC, ASsSt y AIP durante el invierno de 2002, primavera de 2003 y verano de 2004 (Fig. 5). El AIP, caracterizada por presentar una salinidad de 34.52 y temperaturas menores de 9°C , solo se observó por debajo de los 450 m de profundidad en las estaciones del sur del transecto central (Fig. 3b, e, h y 4b, e, h), sugiriendo que su paso hacia el norte de los umbrales estuvo restringido. Además, aunque no se presentan los datos, el APP solo se encontró en la estación sur del eje central (E38) debajo de los 1000 m.

En invierno, al norte del transecto de Baja California, el AGC se encontró desde la superficie hasta ~ 150 m de profundidad (E5-E7; Fig. 3a). En el CB aumentó su espesor desde la superficie hasta ~ 200 m (E8-E10), mientras que en la zona del USL su espesor fue de ~ 60 m (E23-E30; Fig. 3a). Por otro lado, al norte de la Isla Ángel de la Guarda (IAG) en el transecto central (Fig. 3b), el AGC se observó hasta ~ 250 m de profundidad

(E3-E13) mientras que en el USE (E24) y CSPM (E28) se registró a ~70 m. En las estaciones del sur de este transecto (E34-E38) el grosor de esta masa de agua aumentó a ~140 m. Estos resultados sugieren que, en la zona donde se localizan tanto el USL como el USE, el grosor de la capa del AGC disminuyó debido a la intrusión del ASsSt hacia la superficie. Además, esta masa de agua también se encontró llenando el interior del CB y parte de la CT debajo de los ~150 m y ~200 m de profundidad, respectivamente.

En primavera, en el transecto paralelo a Baja California, la intrusión del ASsSt hacia la superficie sobre el umbral fue menor que en invierno. Así, el AGC se observó hasta ~220 m de profundidad desde el norte de IAG hasta el interior del CB y ~140 m sobre el USL (Fig. 3d), mientras que en la estación sur se observó a ~200 m. Por otro lado, al norte de la IAG en el transecto central, el AGC tuvo como límite inferior los 280 m (Fig. 3e). En la zona del USE y CSPM, el grosor de esta masa de agua fue de ~180 m mientras que en la zona sur del área de estudio disminuyó hasta ~120 m. Aunque el grosor del AGC fue mayor en la zona de los umbrales que en la zona sur, la zona de los umbrales mostró agua superficial más fría y salada (Fig. 3d, e y 4d, e), sugiriendo de nueva cuenta, que hubo una mayor intrusión de agua subsuperficial en la zona de los umbrales que en el resto de las estaciones del transecto. El ASsSt en esta época del año se encontró a mayor profundidad en la zona de los umbrales. En el CB y la CT se observó por debajo de los ~200 m de profundidad, lo que también muestra que esta masa de agua se encontró a una ligera mayor profundidad en estas cuencas con relación al invierno.

En el verano, en el transecto de Baja California, el AGC se observó en los primeros 300 m al norte de IAG y ~200 m hacia el interior del CB (Fig. 3g); el resto de la columna de agua en estos sitios fue ocupada por el ASsSt. La estación del USL (E23) y sur del transecto (E32) no se muestrearon debido a que las condiciones climáticas durante ese crucero no lo permitieron. Por otra parte, en el transecto central, el AGC se encontró hasta ~250 m al norte del transecto (Fig. 3h) mientras que en la zona del USE y la zona sur se registró aproximadamente hasta 100 m de profundidad. El ASsSt en el interior del CB y CT se encontró debajo de los ~200 m y ~250 m de profundidad, respectivamente. Así, estos resultados sugieren una mayor profundidad de esta masa de agua con respecto a la primavera.

En las tres épocas del año, en el transecto paralelo a la costa de Sonora, el AGC abarcó toda la columna de agua en la zona norte por tratarse de una zona somera (Fig. 3c, f, i), quedando el ASsSt restringida hacia las zonas más profundas de la CT (E21) y del área sur del transecto (E26-E36).

En general, los resultados de este trabajo muestran que durante el invierno, el límite superior del ASsSt se encontró cercano a los 60 m de profundidad en el USL, USE y la CSPM, mientras que en primavera y verano, en estas mismas áreas, este límite se extendió entre 100 y 200 m de profundidad. Además, en todas las épocas del año, también se observó que el ASsSt consistentemente se encontró sobre el USL y el USE.

6.2 Análisis de nutrientes.

6.2.1 Distribución vertical de nutrientes.

Durante los tres cruceros, la distribución vertical de los nutrientes en la zona norte y sur del área de estudio mostró su forma típica, con valores bajos en la superficie y altos en las aguas más profundas (Fig. 7 y 8a, d, e, h, i, l). Sin embargo, los perfiles verticales fueron mas homogéneos durante el invierno y la diferencia en la concentración de los nutrientes entre las aguas superficiales y de fondo fue menos pronunciada en la zona de los umbrales San Esteban (Fig. 7b, f, j), San Lorenzo (Fig. 8c, g, k) y el CB (Fig. 8b, f, j). En esta época del año, los valores superficiales (0 m) mas altos de nutrientes se registraron en la zona de los umbrales y el CB, con concentraciones variando entre 13.0 - 20.0, 2.0 - 2.9 y 25.0 - 40.0 μM para NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4 , respectivamente. Mientras que en los extremos sur y norte del área de estudio se midieron concentraciones entre 5.0 - 12.0, 1.3 - 1.9 y 4.5 - 16.5 μM de NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4 , respectivamente. En cambio, durante el verano, los valores superficiales de NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4 se registraron entre 0.05 - 4.3, 0.5 - 0.8 y 1.7 - 8.1 μM para los extremos norte y sur, mientras que en la zona de los umbrales y el CB, los valores superficiales fueron de 3.9 - 5.1, 0.7 - 1.1 y 3.4 - 6.4 μM para NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4 , respectivamente.

La mayor variabilidad en la concentración de los nutrientes ocurrió en los primeros 100 m (Fig. 7 y 8), lo cual coincide con la profundidad a la cual se encontró la mayor variabilidad de las variables físicas como

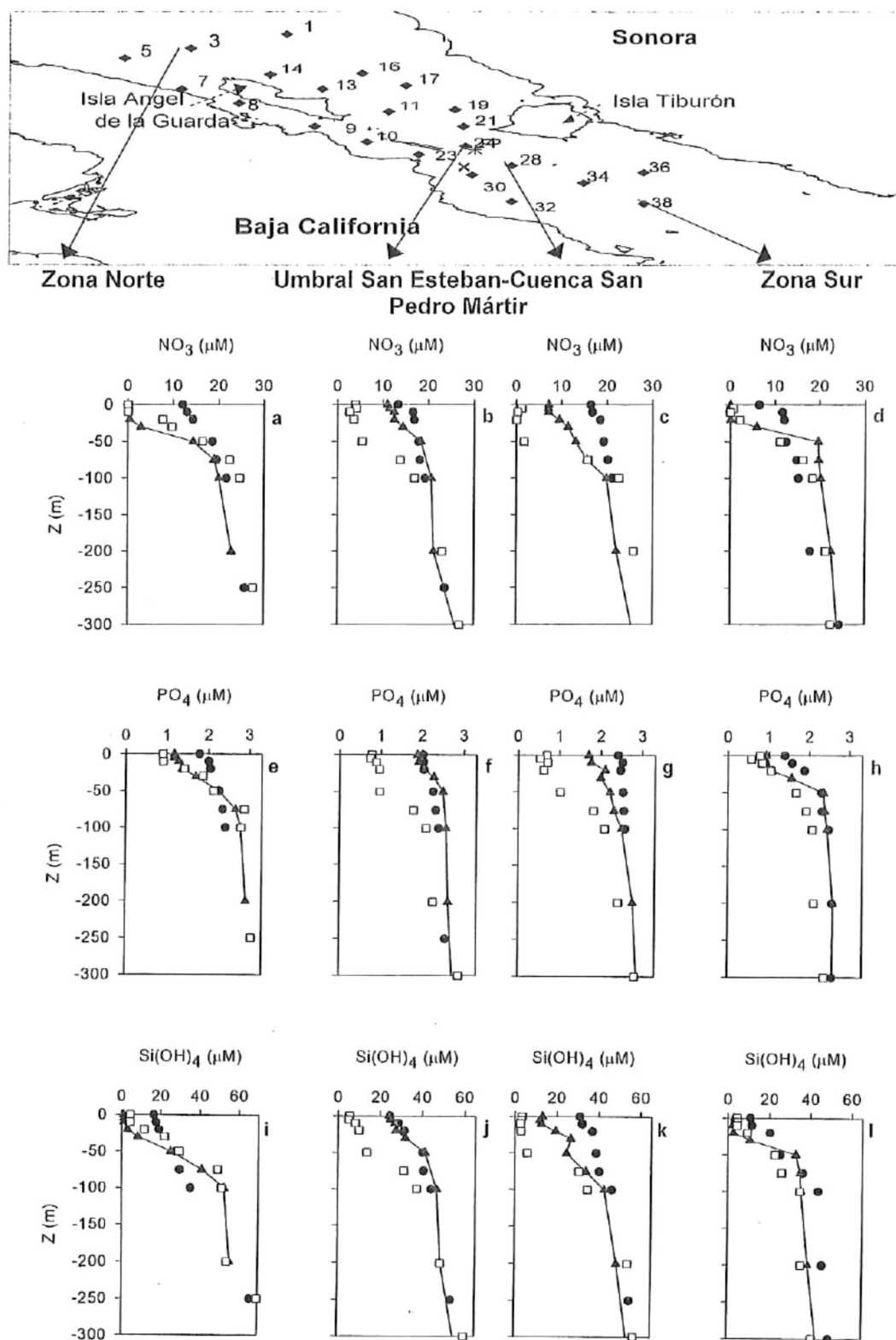


Figura 7. Distribución vertical de NO_3 (a,b,c,d), PO_4 (e,f,g,h) y Si(OH)_4 (i,j,k,l) a lo largo del transecto central bajo condiciones de invierno ($\bullet$), primavera ($\blacktriangle$) y verano ($\square$).

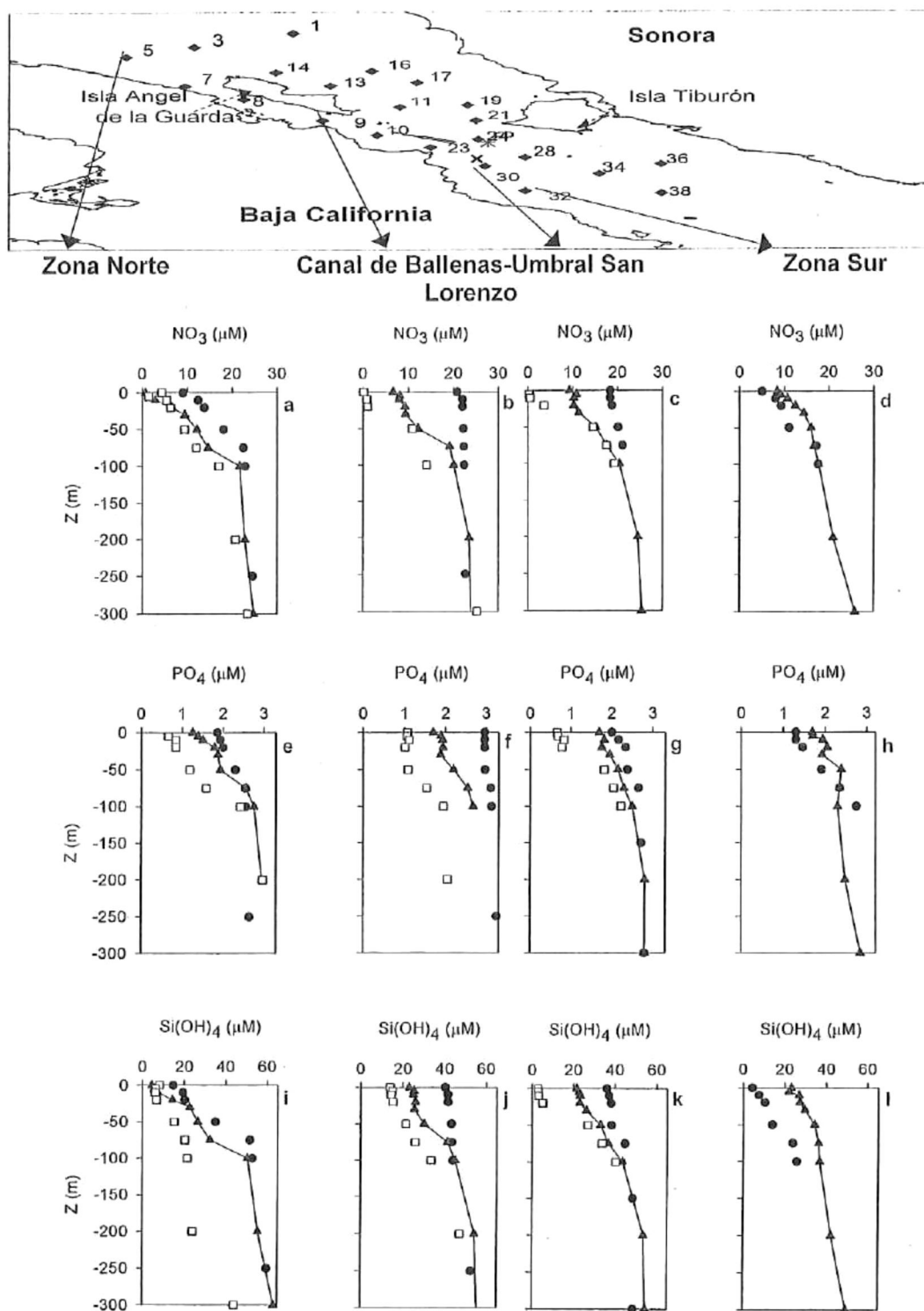


Figura 8. Distribución vertical de NO_3 (a,b,c), PO_4 (d,e,f) y Si(OH)_4 (g,h,i) a lo largo del transecto de Baja California bajo condiciones de invierno (●), primavera (▲) y verano (□). En el verano la E8 y E23 pertenecientes al CB y umbral SL no se muestrearon por condiciones climáticas desfavorables, en su lugar se tomaron como representativos la E7 y E30, respectivamente.

temperatura, salinidad y densidad. Estos resultados sugieren que podría existir una asociación entre los procesos físicos y las concentraciones superficiales de nutrientes en la RGI. En contraste, durante el verano se registró una disminución en las concentraciones superficiales de nutrientes con relación al resto de las estaciones del año, lo que sugiere un mayor consumo de nutrientes producto de la actividad biológica. Alternativamente podría sugerirse una disminución de la intensidad de los procesos físicos que aportan nutrientes a la capa superficial, favoreciendo de este modo, que el efecto de los procesos biológicos sobre la concentración de los nutrientes se manifieste.

La concentración superficial de los nutrientes varió estacionalmente, disminuyendo de invierno a verano. Por ejemplo, durante el invierno en el transecto de Baja California, la isolínea de $20 \mu\text{M}$ de NO_3 , se encontró aflorando prácticamente hasta la superficie en los UNCB y USL, mientras que al sur y al norte de estos sitios, esta isolínea se encontró a ~ 100 m de profundidad (Fig. 9a). En primavera, la isolínea de $20 \mu\text{M}$ de NO_3 , se encontró ~ 100 m de profundidad a lo largo de todo el transecto (Fig. 9d) y en verano se encontró cerca de los 200 m (Fig. 9g). A lo largo del transecto central, la isolínea de $20 \mu\text{M}$ se mantuvo alrededor de los 100 m de profundidad en todas las épocas del año (Fig. 9b, e, h). En el transecto paralelo a la costa de Sonora esta isolínea se mantuvo ~ 100 m durante invierno, mientras que en primavera y verano se encontró ~ 150 m (Fig. 9c, f, i). Un comportamiento similar se encontró con la isolínea de $2.4 \mu\text{M}$ de PO_4 (Fig. 10) y $40 \mu\text{M}$ de Si(OH)_4 , (Fig. 11) las cuales se encontraron a mayor

profundidad de invierno a verano. Además, en las tres épocas del año en las que se recorrió la RGI, se observaron altas concentraciones de nutrientes en las aguas superficiales del CB, USL, USE, CSPM y CT, lo cual podría ser resultado de un importante flujo de nutrientes hacia la capa superficial en estos lugares (Fig. 9, 10 y 11). Este flujo de nutrientes coincide con los flujos de menor temperatura y salinidad hacia la superficie (Fig. 3 y 4). Ambos flujos se observaron generando una estructura en forma de domo de hasta 100 km de largo en la zona de los umbrales, los cuales se manifestaron con mayor claridad en invierno que en primavera y verano (Fig. 9, 10 y 11). Durante invierno y primavera, principalmente, estas estructuras en forma de domos de nutrientes estuvieron asociadas al ASsSt (Fig. 3 y 4), lo que sugiere que esta masa de agua que transporta agua fría rica en nutrientes hacia la capa superficial, es la fuente principal del suministro de nutrientes hacia la superficie en la RGI.

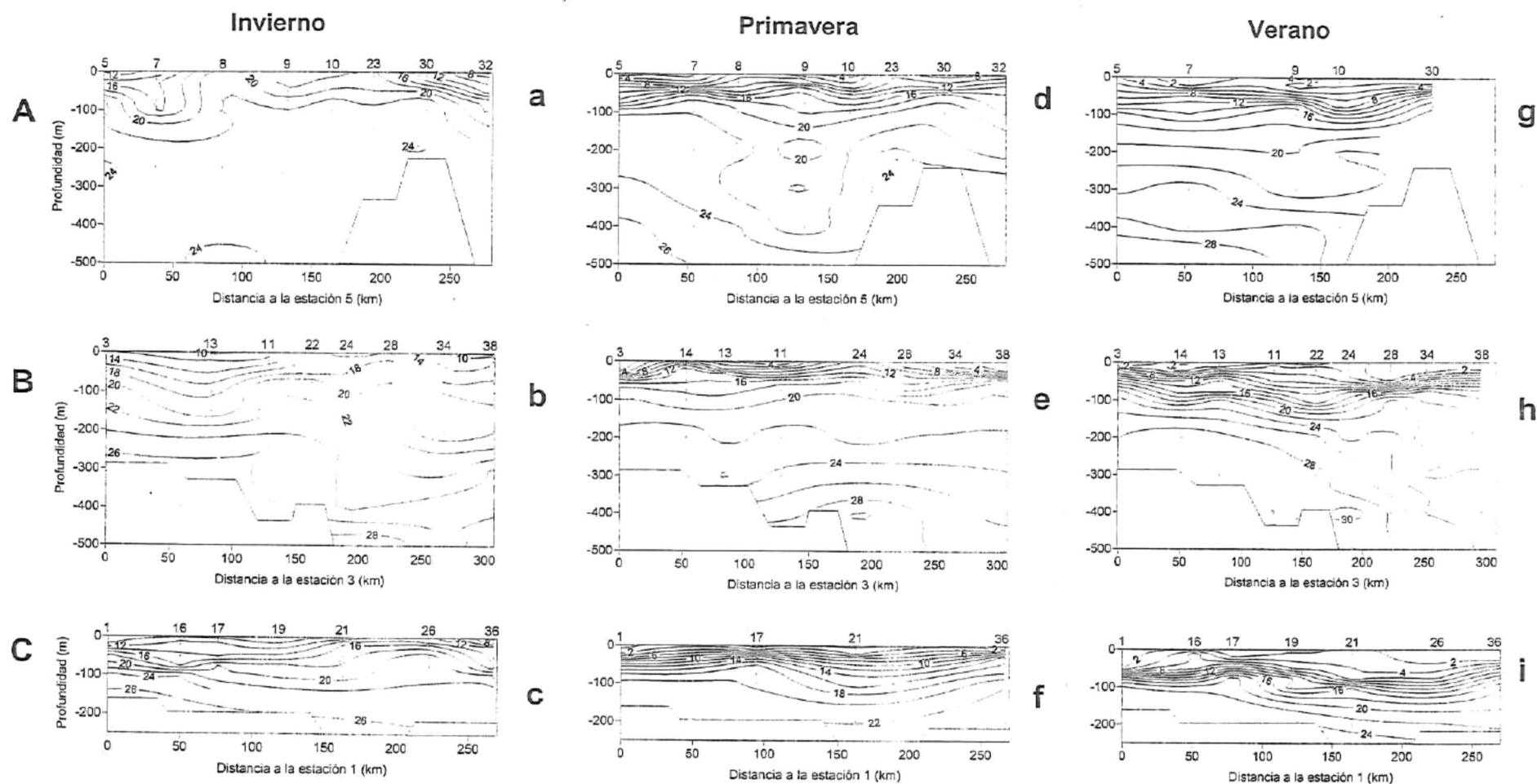


Figura 9. NO_3 (μM) a lo largo del transecto paralelo a la Costa de Baja California (A), del Eje Central (B) y de la Costa de Sonora (C), durante el invierno (a, b, c), primavera (d, e, f) y verano (g, h, i). Note la escala de la distancia en las figuras b, e y h.

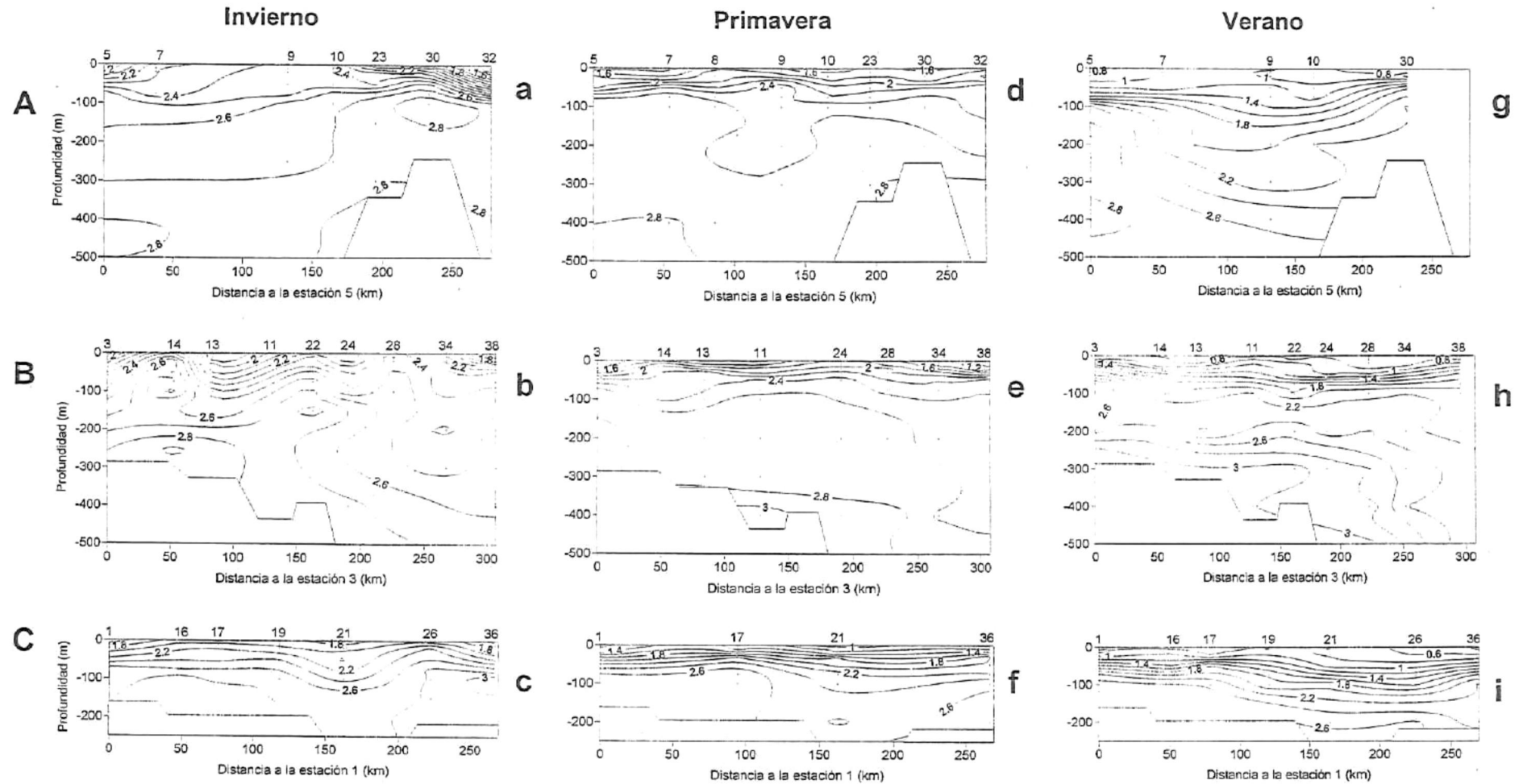


Figura 10. PO_4 (μM) a lo largo del transecto paralelo a la Costa de Baja California (A), del Eje Central (B) y de la Costa de Sonora (C), durante el invierno (a, b, c), primavera (d, e, f) y verano (g, h, i). Note la escala de la distancia en las figuras b, e y h.

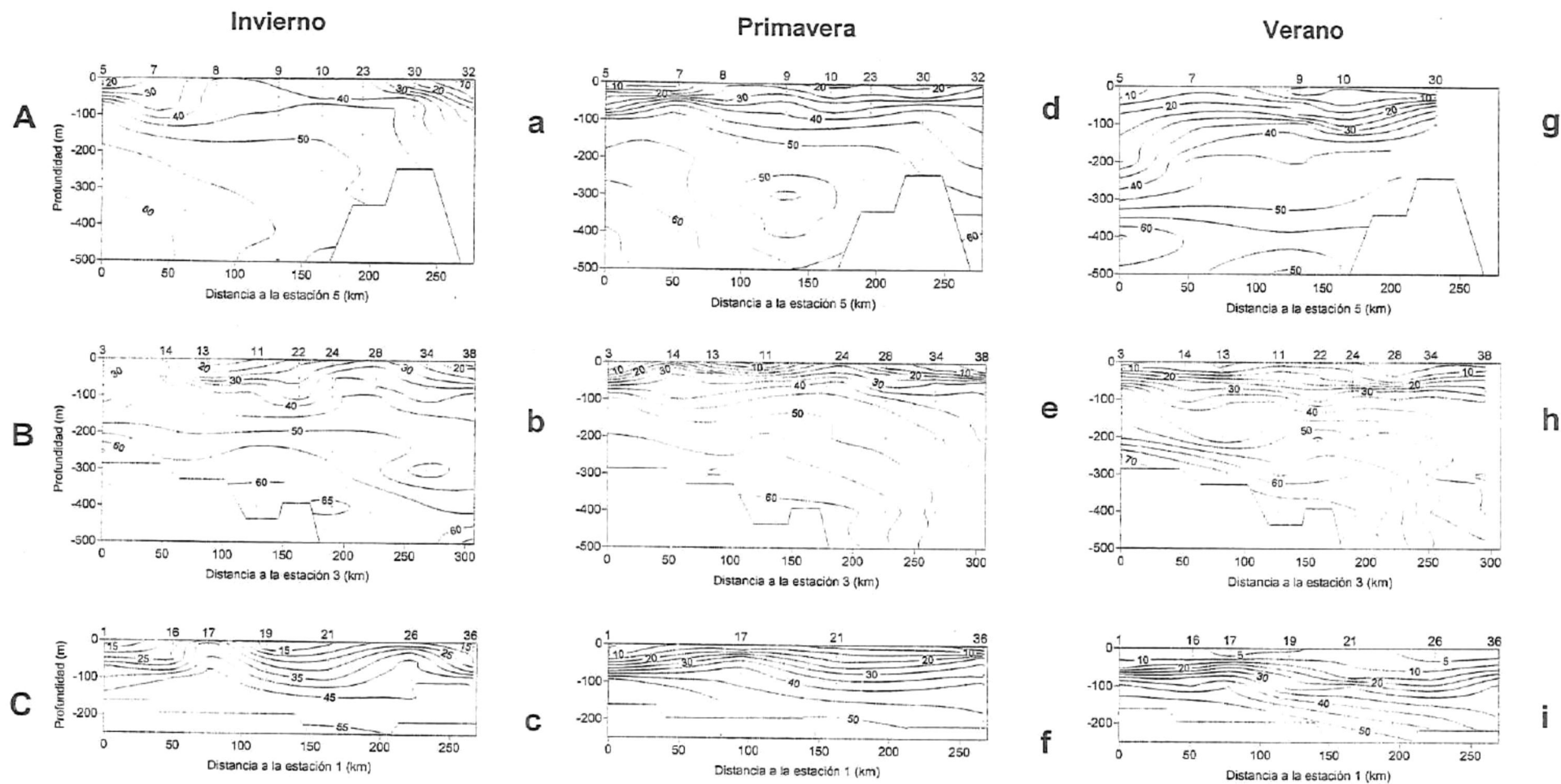


Figura 11. Si(OH)_4 (μM) a lo largo del transecto paralelo a la Costa de Baja California (A), del Eje Central (B) y de la Costa de Sonora (C), durante el invierno (a, b, c), primavera (d, e, f) y verano (g, h, i). Note la escala de la distancia en las figuras b, e y h.

6.2.2 Enriquecimiento superficial de nutrientes.

En este trabajo se considera la concentración promedio de nutrientes integrados en la columna de agua como una medida de la disponibilidad de nutrientes. En invierno, las concentraciones superficiales de NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4 (Fig. 12) y las concentraciones promedio integradas a 100 m (Tabla II) fueron las más altas en comparación a las otras estaciones del año. Hacia la primavera y verano, los valores superficiales y la concentración promedio integrada disminuyeron marcadamente, lo cual probablemente este relacionado con una disminución de la intensidad del flujo del ASsSt a la capa superficial de la RGI (Fig. 4 y 5). En general, las zonas que presentaron mayores concentraciones de nutrientes en invierno y primavera fueron el CB y la zona de los umbrales (Fig. 9, 10 y 11; Tabla III), lo que sugiere que estos sitios son zonas de bombeo de nutrientes hacia la superficie.

Es importante resaltar que la salinidad y la temperatura registrados en este trabajo sugieren un flujo de agua subsuperficial hacia las capas superficiales de la RGI y que en particular, ocurre de manera intensa sobre los USL, USE y el UNCB. Así, el enriquecimiento superficial con nutrientes en la RGI parece estar asociado a la presencia de esta masa de agua rica en nutrientes, la cual llega desde el golfo sur y, además, al efecto de la mezcla vertical de la columna de agua que favorece un incremento en la disponibilidad de nutrientes en la capa superficial de la RGI.

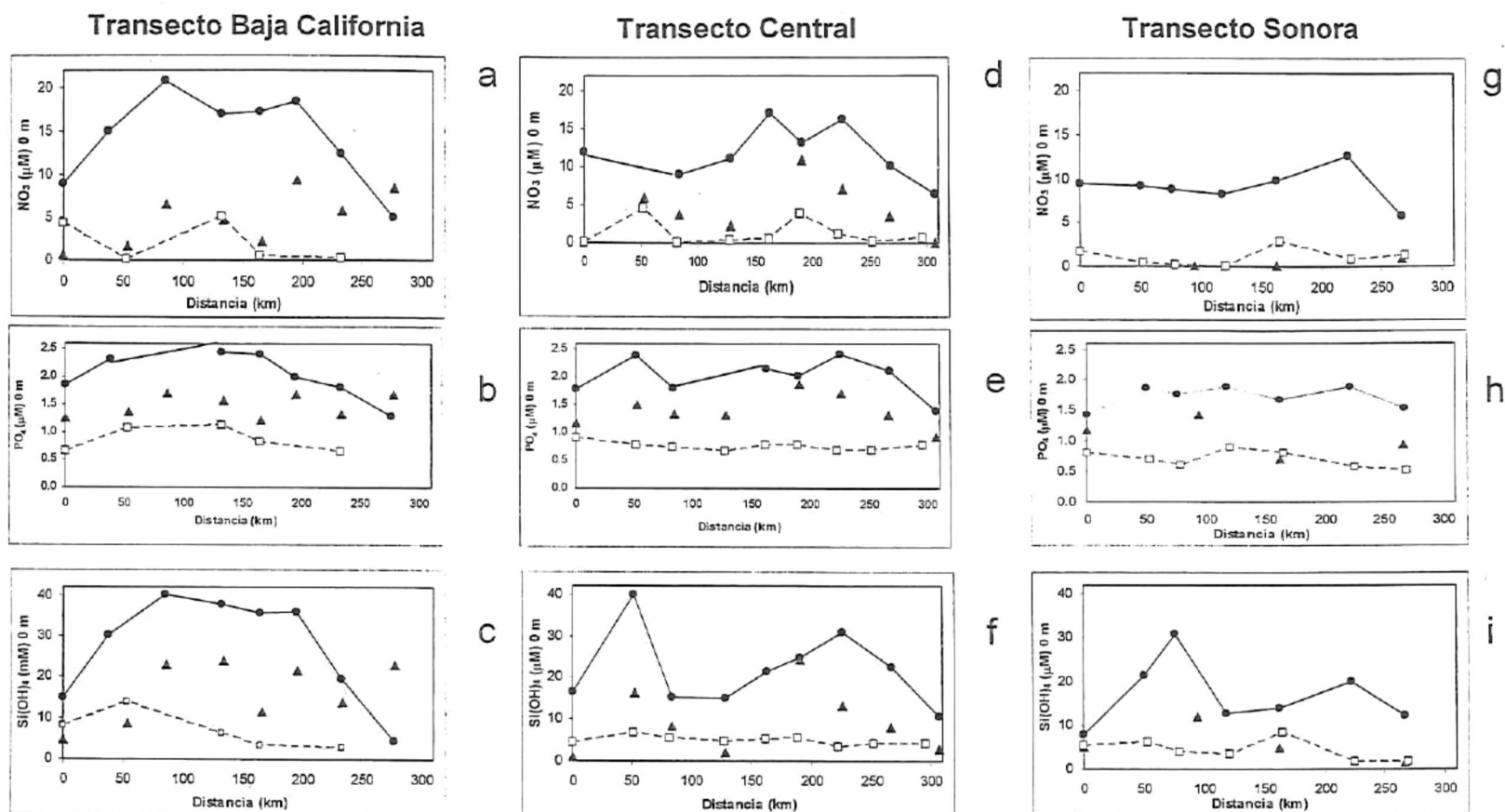


Figura 12. Concentración superficial de NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4 a lo largo de la costa de Baja California (a, b, c), del eje central (d, e, f) y de la costa de Sonora (g, h, i) para invierno ($\bullet$), primavera ($\blacktriangle$) y verano ($\square$).

Tabla II. Concentración promedio integrada (μM) hasta 100 m de profundidad ($\pm$ error estándar) de todas las estaciones de muestreo para invierno de 2002, primavera de 2003 y verano de 2004 en la RGI del GC. $n=23$, 20 y 20 para invierno, primavera y verano, respectivamente.

	NO_3	PO_4	Si(OH)_4
Invierno	16.8 ± 0.6	2.4 ± 0.1	31.9 ± 1.5
Primavera	13.4 ± 0.4	2.1 ± 0.1	29.5 ± 1.0
Verano	9.0 ± 0.6	1.4 ± 0.1	19.0 ± 1.2

Tabla III. Concentración promedio integrada (μM) hasta 100 m de profundidad ($\pm$ error estándar) en las diferentes zonas de la RGI para invierno de 2002, primavera de 2003 y verano de 2004. Para la zona Norte se consideró las estaciones 1, 3 y 5. Para CB se tomó en cuenta las estaciones 7, 8 y 9. En la zona de los Umbrales se consideró las estaciones 23, 24, 28 y 30, mientras que para la zona Sur se tomó en cuenta las estaciones 32, 34, 36 y 38.

A) INVIERNO			
	NO_3	PO_4	Si(OH)_4
Norte	17.4 ± 0.3	2.24 ± 0.02	29.2 ± 3.3
CB	18.6 ± 2.1	2.40 ± 0.06	38.3 ± 4.1
Umbrales	18.9 ± 0.5	2.43 ± 0.07	37.7 ± 1.3
Sur	12.9 ± 0.3	2.15 ± 0.08	24.3 ± 3.1
b) primavera			
	NO_3	PO_4	Si(OH)_4
Norte	11.0 ± 0.3	2.08 ± 0.01	24.5 ± 0.7
CB	13.9 ± 0.3	2.23 ± 0.02	33.6 ± 0.4
Umbrales	15.2 ± 0.9	2.18 ± 0.06	32.1 ± 2.1
Sur	13.7 ± 0.5	2.01 ± 0.06	26.4 ± 2.1
c) verano			
	NO_3	PO_4	Si(OH)_4
Norte	10.7 ± 2.0	1.68 ± 0.23	23.9 ± 4.9
CB	8.5 ± 0.4	1.25 ± 0.05	19.1 ± 2.7
Umbrales	9.0 ± 1.3	1.35 ± 0.10	18.8 ± 2.3
Sur	9.3 ± 0.6	1.37 ± 0.08	18.1 ± 1.6

Además, las concentraciones promedio de NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4 , integradas hasta 100 m de profundidad, se correlacionaron positivamente con las concentraciones medidas a 0 m durante las diferentes épocas del año ($r_{\text{NO}_3} = 0.82$, $r_{\text{PO}_4} = 0.85$ y $r_{\text{Si(OH)}_4} = 0.81$; $p < 0.05$; $n=64$). Altas concentraciones de nutrientes en la superficie se encontraron asociadas a promedios altos de nutrientes integrados en la columna de agua (Fig. 13). Por lo tanto, los valores de nutrientes registrados en la superficie (0 m) podrían utilizarse para estimar la concentración integrada para los primeros 100 m de profundidad de la RGI durante invierno y primavera.

6.3 Efecto de la mezcla vertical sobre la distribución de los nutrientes.

El parámetro de estratificación (ϕ) fue utilizado como medida de la intensidad de la mezcla de la columna de agua. La mezcla vertical calculada a partir del ϕ incluye los efectos de la mezcla por el viento, mezcla por marea y en general cualquier proceso que mezcle la columna de agua debido a que el ϕ estima la cantidad de energía requerida para mezclar la columna de agua. La figura 14 muestra la distribución espacial de la intensidad de la mezcla vertical en los primeros 100 m a lo largo de los tres transectos, durante las tres estaciones del año. En invierno, la intensidad de la mezcla de la columna de agua fue alta en el CB y los umbrales, el ϕ presentó valores de 3 - 19 J m^{-3} , mientras que hacia los extremos norte y sur los valores del ϕ fueron de 20 - 80 J m^{-3} indicando una disminución en la intensidad de la mezcla vertical de la columna de agua. En primavera, la

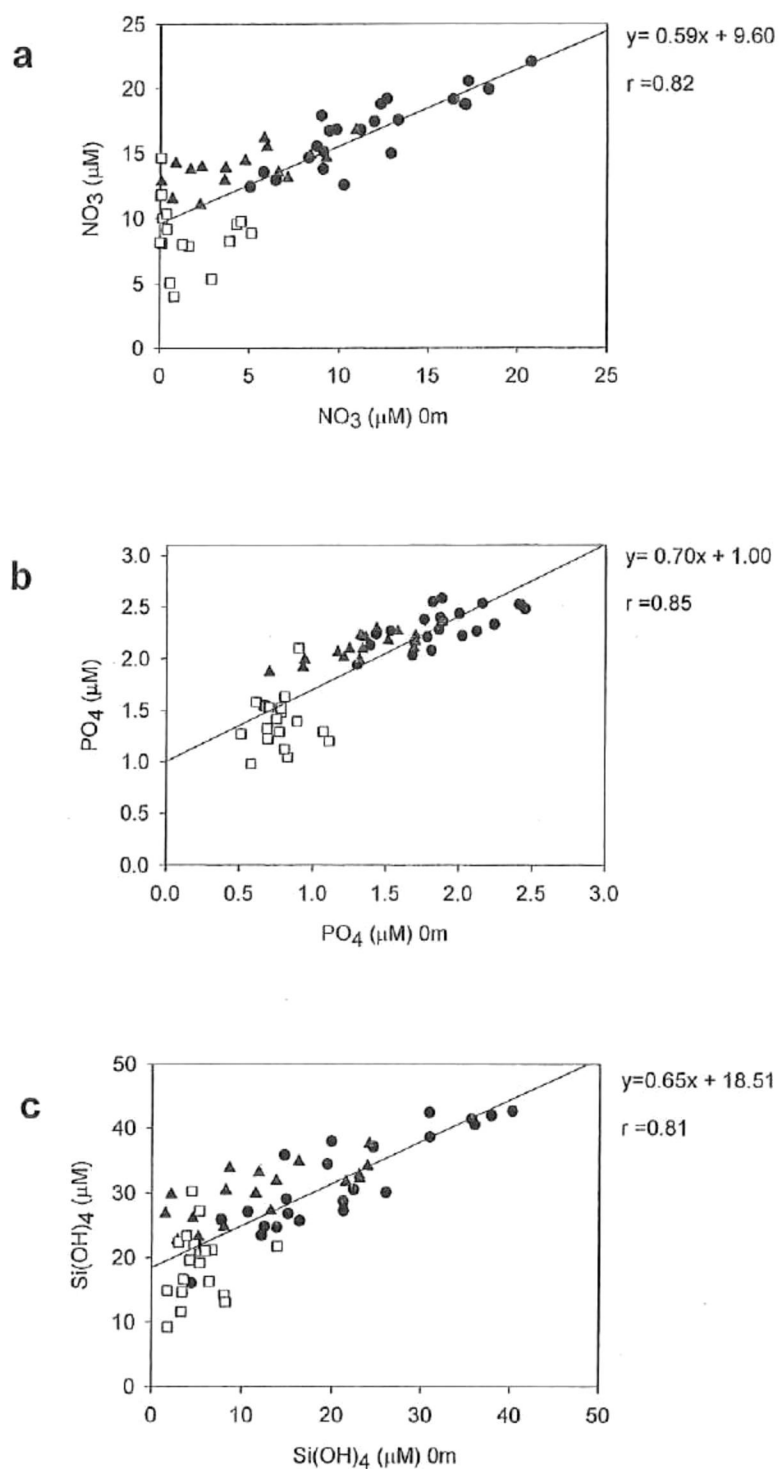


Figura 13. Correlación entre la concentración a 0 m y la concentración promedio integrada a 100 m de a) NO_3 , b) PO_4 y c) Si(OH)_4 para invierno (●), primavera (▲) y verano (□).

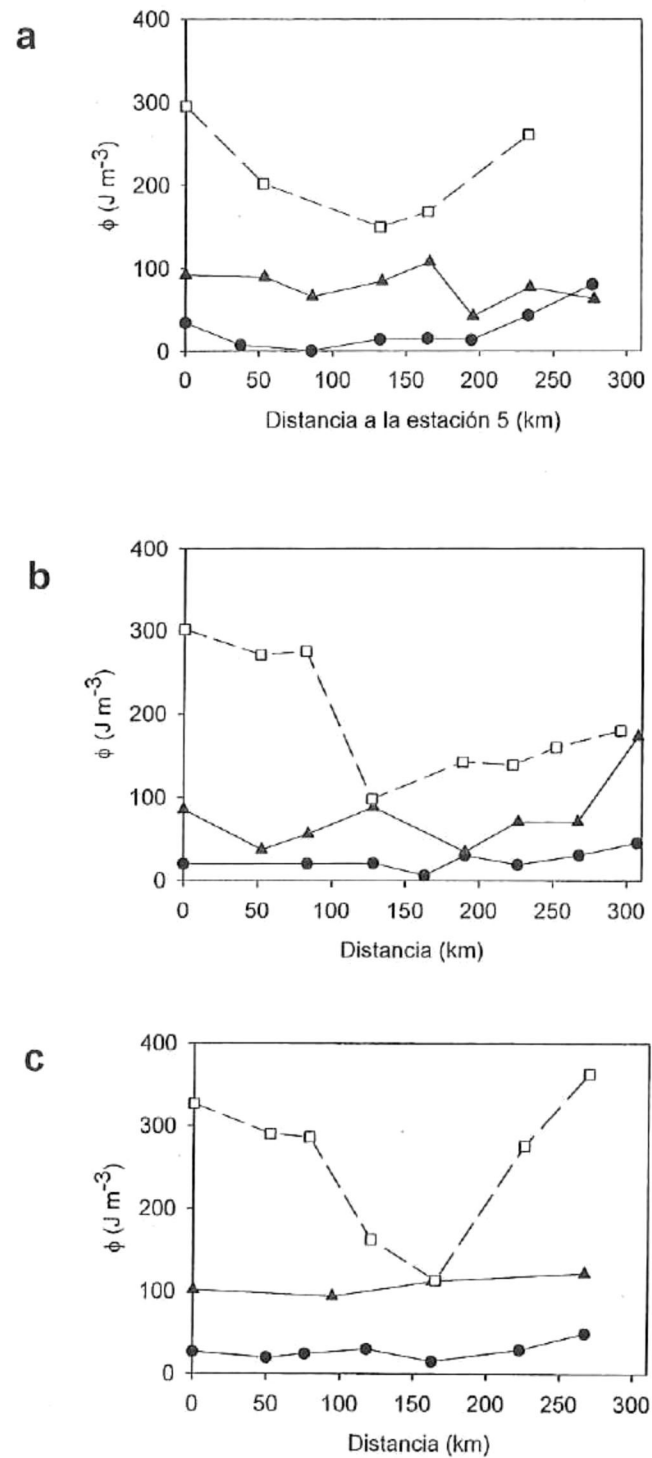


Figura 14. Parámetro de estratificación de la columna de agua (ϕ) contra la distancia. Transecto de a) la costa de Baja California, b) eje central y c) costa de Sonora para invierno (●), primavera (▲) y verano (□). En el cálculo de ϕ se consideró solo los primeros 100 m superficiales.

columna de agua se observó con menor mezcla con relación al invierno. En el CB y los umbrales, el valor del ϕ fue de 37 - 66 J m⁻³, mientras que para los extremos norte y sur, varió entre 92 y 170 J m⁻³. En contraste, durante el verano se presentó una mayor estratificación a lo largo de los tres transectos, con valores de ϕ de 99 - 168 J m⁻³ en el CB y los umbrales, mientras que en la zona norte y sur, el valor del ϕ varió entre 261 y 363 J m⁻³.

Los gradientes verticales de la concentración de NO₃, PO₄ y Si(OH)₄, calculados a partir de las diferencias entre la concentración de 0 y 100 m, fueron mas altos durante la primavera y el verano (Fig. 15). Este resultado estuvo asociado fuertemente a las menores concentraciones superficiales de nutrientes y a las condiciones de mayor estratificación de la columna de agua detectadas durante estas épocas. Por el contrario, durante el invierno, los valores bajos del gradiente de nutrientes se asociaron con condiciones de mezcla intensa (Fig. 15). Durante este periodo, en toda la RGI se registraron concentraciones superficiales mas altas y los perfiles de nutrientes se presentaron verticalmente más homogéneos. Estos resultados nos sugieren que un efecto de la mezcla vertical en la RGI es la modificación de la estructura vertical de la concentración de los nutrientes.

La figura 16 muestra la relación entre la concentración superficial y la intensidad de la mezcla vertical en la RGI para las tres estaciones del año. Los valores mas altos de la concentración superficial de los tres nutrientes se registraron durante el crucero de invierno asociados a niveles de mezcla

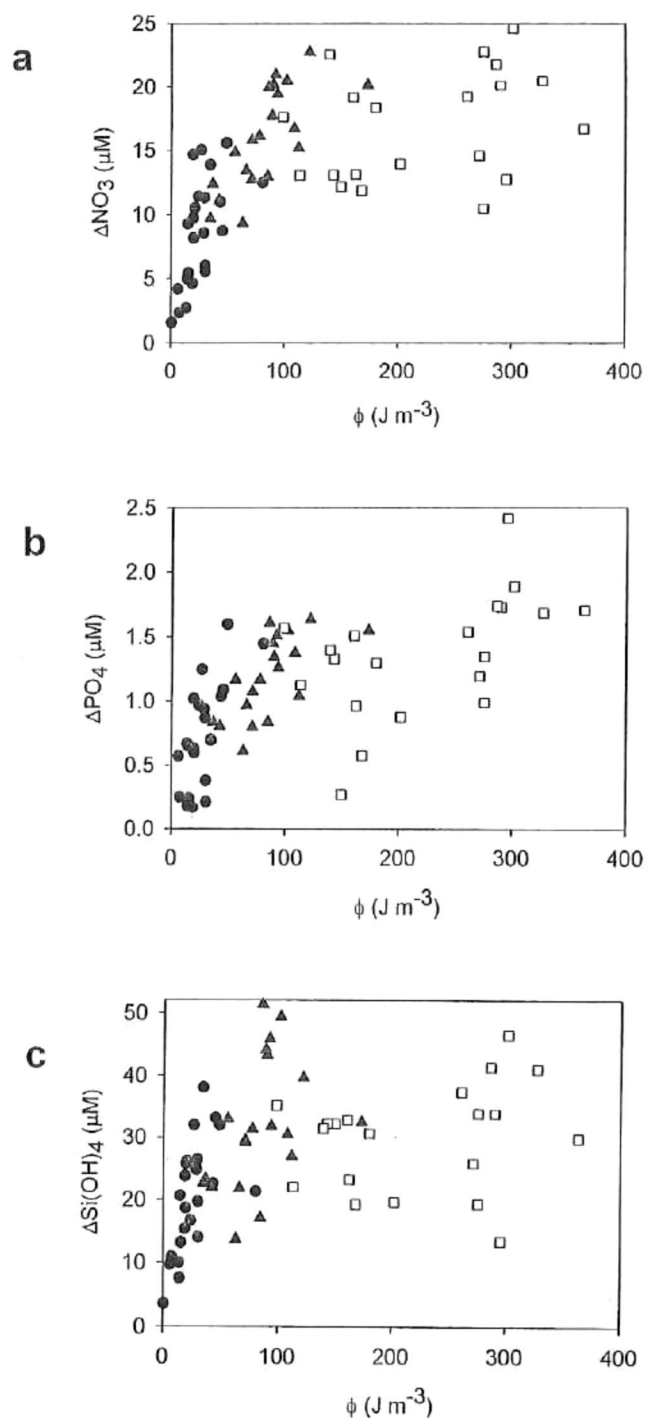


Figura 15. Gradiente vertical de la concentración de a) PO_4 , b) NO_3 y c) Si(OH)_4 y su relación con el parámetro de estratificación de la columna de agua para invierno (●), primavera (▲) y verano (□). El gradiente de concentración se calculó como la diferencia de concentración del nutriente entre 0 y 100 m de profundidad.

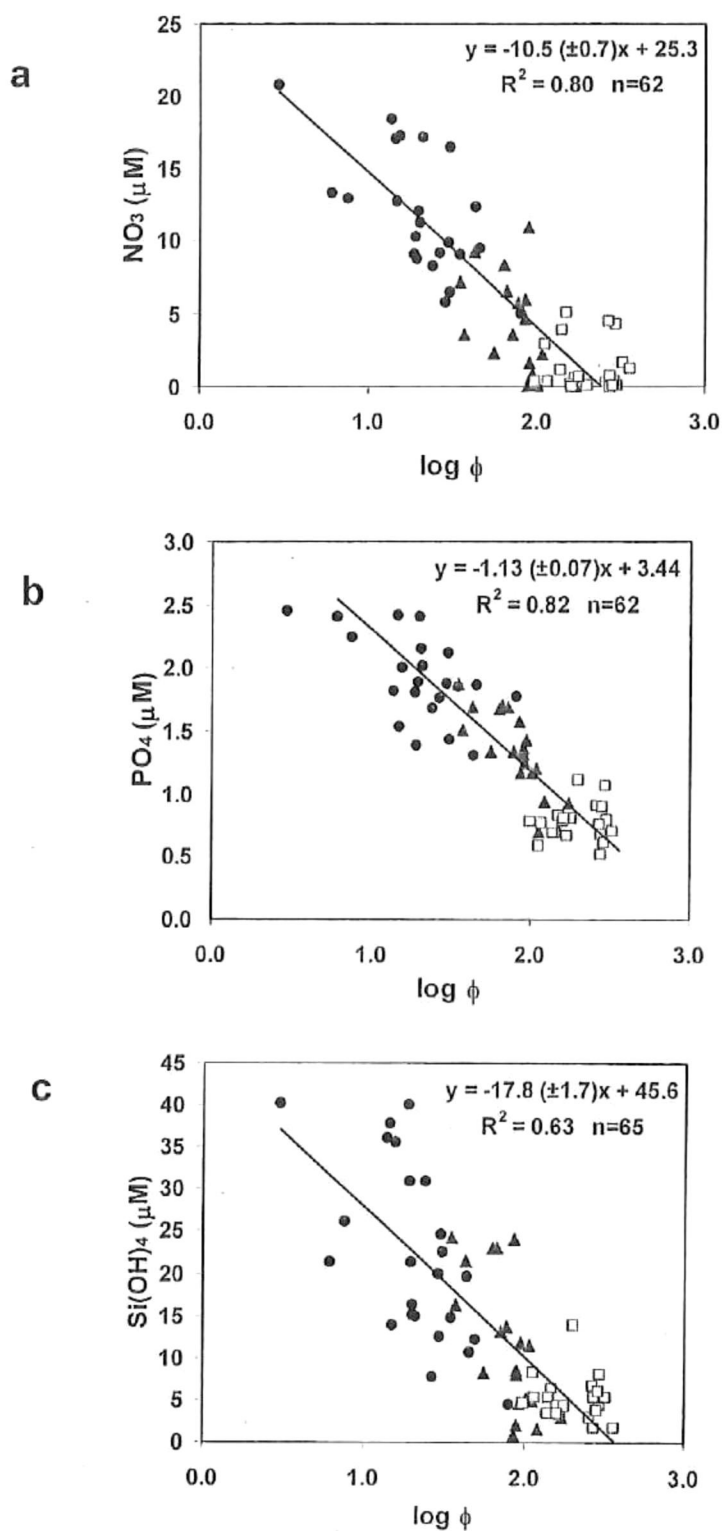


Figura 16. Concentración superficial de a) PO_4 , b) NO_3 y c) Si(OH)_4 y su relación con el parámetro de estratificación de la columna de agua bajo condiciones de invierno (●), primavera (▲) y verano (□).

intensa. En contraste, las concentraciones más bajas de los tres nutrientes se encontraron en el verano, bajo condiciones de una columna de agua muy estratificada. Así, esta figura nos sugiere que en la RGI, aproximadamente el 80% de la variabilidad temporal de la concentración de los nutrientes en la superficie se explica por la variabilidad temporal de la mezcla de la columna de agua en la RGI (Fig. 16). Estos resultados son importantes porque indican que la mezcla vertical juega un papel esencial en controlar los niveles y la variación temporal de la concentración superficial de los NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4 en la RGI.

6.4 Efecto de los procesos biológicos sobre la distribución de los nutrientes (captación y regeneración).

Aunque existen diversos procesos que afectan la concentración de los nutrientes en el océano, la remoción y adición de nutrientes en la columna de agua se debe básicamente a los procesos biológicos de fotosíntesis y degradación de la materia orgánica. La figura 16 de este trabajo muestra que aproximadamente el 80% de la variabilidad temporal de los tres nutrientes en la RGI se puede explicar por la variabilidad temporal de la mezcla vertical. Por lo tanto, los procesos biológicos deben contribuir a explicar la restante variabilidad temporal de los nutrientes que no se explica a través de los procesos físicos.

Una aproximación para estudiar el efecto de los procesos biológicos sobre la concentración de nutrientes en este estudio fue obtener las líneas de regresión entre los diferentes nutrientes y, a partir de las pendientes,

inferir la tasa de consumo y regeneración de los nutrientes. La figura 18 muestra las relaciones $\text{NO}_3\text{-PO}_4$, $\text{Si(OH)}_4\text{-PO}_4$, y $\text{NO}_3\text{-Si(OH)}_4$ registradas para las aguas de la RGI durante los cruceros de invierno del 2002, primavera de 2003 y verano de 2004. Altas concentraciones de un nutriente estuvieron asociadas a niveles altos del otro nutriente y viceversa. Así, considerando el conjunto de datos de las tres épocas de muestreo, las tasas de consumo y regeneración de $\text{NO}_3\text{:PO}_4$, $\text{Si(OH)}_4\text{:PO}_4$, y $\text{NO}_3\text{:Si(OH)}_4$ fueron de $(12.1 \pm 0.2)\text{:1}$, $(24.9 \pm 0.5)\text{:1}$ y $(2.01 \pm 0.03)\text{:1}$, respectivamente (Fig. 17). En general, la relación $\text{NO}_3\text{:PO}_4$ estuvo por debajo de las proporciones de Redfield esperadas de 16:1.

En particular, durante el invierno, la tasa de consumo y regeneración de $\text{NO}_3\text{:PO}_4$ fue de 13.4:1, mientras que las proporciones de $\text{Si(OH)}_4\text{:PO}_4$ y $\text{Si(OH)}_4\text{:NO}_3$ fueron de 34.0:1 y 2.4:1, respectivamente (Tabla IV). Las más altas concentraciones de nutrientes se encontraron en esta época del año y aunque la razón $\text{NO}_3\text{:PO}_4$ y la tendencia de la relación sugiere que el NO_3 parece ser el nutriente limitante para la producción primaria, las concentraciones superficiales mas bajas de este nutriente, no disminuyeron por debajo de $5 \mu\text{M}$ durante esta época del año. Por otro lado, la razón alta de $\text{Si(OH)}_4\text{:PO}_4$ y $\text{Si(OH)}_4\text{:NO}_3$, así como sus intercepto negativos sugieren un consumo preferencial del Si(OH)_4 por parte de los organismos fotosintéticos para ésta época del año.

Durante primavera, las proporciones $\text{NO}_3\text{:PO}_4$, $\text{Si(OH)}_4\text{:PO}_4$, y $\text{Si(OH)}_4\text{:NO}_3$ fueron de 15.3:1, 30.9:1 y 1.99:1, respectivamente. Además, la

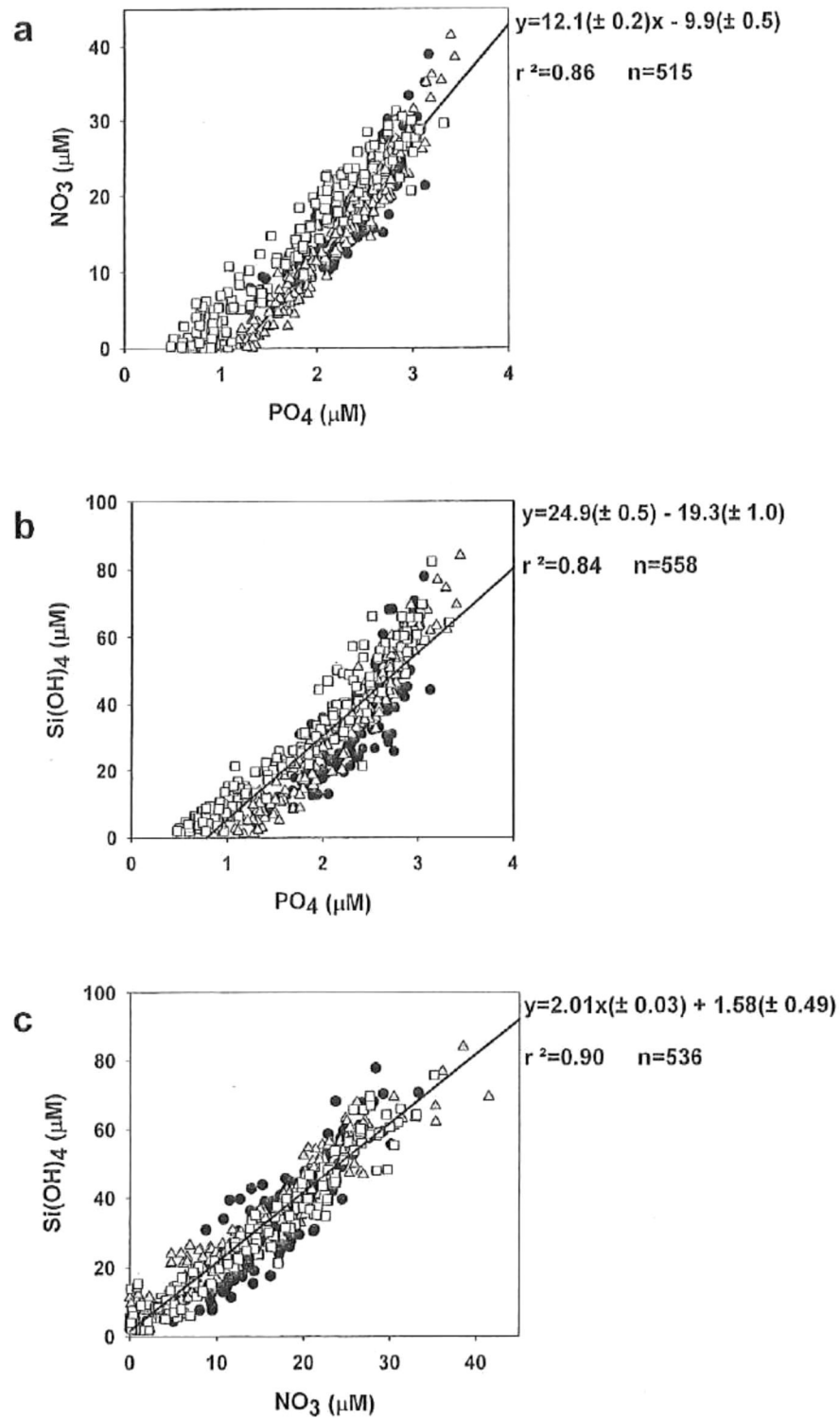


Figura 17. Razones a) $\text{NO}_3\text{-PO}_4$, b) $\text{Si(OH)}_4\text{-PO}_4$, y c) $\text{NO}_3\text{-Si(OH)}_4$ en la RGI durante invierno de 2002 (●), primavera de 2003 (▲) y verano de 2004 (□).

ordenada al origen fue negativa para $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ y $\text{Si(OH)}_4:\text{PO}_4$, lo que sugiere que durante esta época existió una alta demanda de NO_3 y Si(OH)_3 debido muy probablemente al consumo por las diatomeas.

Hacia el verano, las proporciones de $\text{NO}_3:\text{PO}_4$, $\text{Si(OH)}_4:\text{PO}_4$, y $\text{Si(OH)}_4:\text{NO}_3$ fueron menores en comparación a las estimadas en invierno y primavera, con valores de 12.2:1, 24.9:1 y 1.9:1, respectivamente. Adicionalmente, la ordenada al origen de la razón $\text{Si(OH)}_4:\text{NO}_3$ indica que durante esta época del año, ambos nutrientes tienden a agotarse casi al mismo tiempo. Sin embargo, el valor positivo de la ordenada al origen de la proporción $\text{Si(OH)}_4:\text{NO}_3$ indica que el NO_3 tiende a ser el principal nutriente limitante para esta época del año.

En general, la relación entre el $\text{NO}_3:\text{PO}_4$, $\text{Si(OH)}_4:\text{PO}_4$ y $\text{Si(OH)}_4:\text{NO}_3$ de la RGI (Fig. 17a, b y c) muestran que en relación al PO_4 1) el NO_3 y Si(OH)_4 se agotan de invierno a verano en las aguas superficiales, 2) que el Si(OH)_4 es el nutriente potencialmente limitante para la actividad fotosintética en invierno, mientras que 3) durante el verano, tanto el NO_3 como el Si(OH)_4 son limitantes para la producción primaria de la RGI.

Finalmente, las graficas de las razones $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ y $\text{Si(OH)}_4:\text{PO}_4$ de los tres cruceros muestran que al agotarse el NO_3 y el Si(OH)_4 , las aguas superficiales de la RGI presentaron un exceso de PO_4 de 0.6 μM en verano y hasta de 1.2 μM en invierno. Así, la disminución de aproximadamente 0.6 μM en el exceso de PO_4 durante el verano, podría ser el reflejo del desarrollo de la actividad fotosintética de los organismos fijadores de nitrógeno en la RGI.

Tabla IV. Razones $\text{NO}_3:\text{PO}_4$, $\text{Si(OH)}_4:\text{PO}_4$, y $\text{Si(OH)}_4:\text{NO}_3$ ($\pm$ error estándar) para invierno de 2002, primavera de 2003 y verano de 2004 en la RGI. m es la pendiente de regresión, b es la ordenada al origen y r^2 es el coeficiente de determinación.

		m	b	r^2
$\text{NO}_3:\text{PO}_4$	Invierno	13.4 ($\pm$ 0.6)	-13.9 ($\pm$ 1.4)	0.77
	Primavera	15.3 ($\pm$ 0.3)	-18.4 ($\pm$ 0.7)	0.93
	Verano	12.2 ($\pm$ 0.2)	-7.6 ($\pm$ 0.4)	0.94
$\text{Si(OH)}_4:\text{PO}_4$	Invierno	34.0 ($\pm$ 1.5)	-44.5 ($\pm$ 3.7)	0.75
	Primavera	30.9 ($\pm$ 0.6)	-33.6 ($\pm$ 1.4)	0.92
	Verano	24.9 ($\pm$ 0.5)	-14.2 ($\pm$ 0.8)	0.94
$\text{Si(OH)}_4:\text{NO}_3$	Invierno	2.43 ($\pm$ 0.09)	-7.57 ($\pm$ 1.66)	0.81
	Primavera	1.99 ($\pm$ 0.04)	3.77 ($\pm$ 0.64)	0.94
	Verano	1.93 ($\pm$ 0.04)	2.07 ($\pm$ 0.56)	0.95

7. Discusión.

7.1 Análisis hidrológico.

En las tres épocas del año, la temperatura y la salinidad superficiales presentaron valores bajos en el CB y la zona de los umbrales, mientras que en los extremos norte y sur los valores fueron altos (Fig. 3 y 4). En contraste, la densidad (σ_t) superficial, presentó valores máximos en el CB y zona de los umbrales, mientras que en las zonas norte y sur se observaron los valores mínimos (Fig. 6). Estas características hidrológicas superficiales de la RGI fueron diferentes a los que se pueden observar en la boca del GC (Fig. 19). Estos resultados sugieren que existen cambios en las variables hidrológicas superficiales hacia el interior de la RGI como ha sido mencionado anteriormente por diferentes autores (e.g. Roden, 1964; Lavín y Marinone, 2003). Además, durante las tres épocas del año se registró una diferencia de densidad entre el AGC que se presentó en la parte norte y el AGC de la parte sur del área de estudio. En el invierno, la densidad en la parte norte de RGI presentó una mayor densidad debido a un decremento en la temperatura de ~ 2 °C (Fig. 4a, b, c), probablemente como consecuencia del enfriamiento que se genera al norte de los umbrales durante esta época del año (Roden, 1964; Lavín y Organista, 1988; Lavín et al., 1995). El agua de mayor densidad de la zona norte al desplazarse hacia el sur a consecuencia de los vientos estacionales (Roden, 1964) sufre una mezcla lateral con agua más templada y de ligeramente menor salinidad (Paden et al., 1991). Esta mezcla lateral se debe a que en invierno, al sur de los umbrales, no se

presenta un alto flujo de calor en comparación a la zona norte (Castro et al., 1994).

En primavera, la diferencia en la densidad fue menos clara entre las zonas norte y sur del área de estudio, probablemente porque es una época de transición en donde el flujo de calor en la parte norte disminuye y aumenta hacia la parte sur (Paden et al., 1991). Hacia el verano, el aumento en la temperatura superficial fue mucho mayor en todas las estaciones de muestreo, lo que generó un decremento en la densidad en toda la RGI. Sin embargo, se observó una ligera diferencia en la densidad en la zona norte en relación a la densidad medida en la zona sur. La mayor densidad presente en la zona norte del USE probablemente se debe a que a lo largo de todo el año recibe agua fría en la zona de los umbrales generando una constantemente pérdida de calor (Marinone y Lavín, 2003).

Debajo de los 150 m de profundidad, la distribución vertical de salinidad y temperatura presentó un ligero incremento de invierno a verano, mientras que los valores de σ_t disminuyeron hacia el verano. Las temperaturas y las salinidades registradas en la zona sur de los umbrales (E38) durante las campañas de verano e invierno de este estudio (Fig. 18a, b), fueron similares a las reportadas previamente en el verano de 1996 e invierno de 1997 en el mismo sitio (E10 en Delgadillo-Hinojosa et al., 2006). La distribución de estas variables físicas también fue muy similar a la distribución vertical reportada en la boca del GC por estos autores en las mismas épocas del año (Fig. 18a, b). De esta forma, los datos anteriores sugieren que el agua que se encuentra por debajo de los 150 m de

profundidad entra al GC hasta la zona sur de la RGI sin cambios significativos en sus características de temperatura, salinidad y densidad (Fig.18).

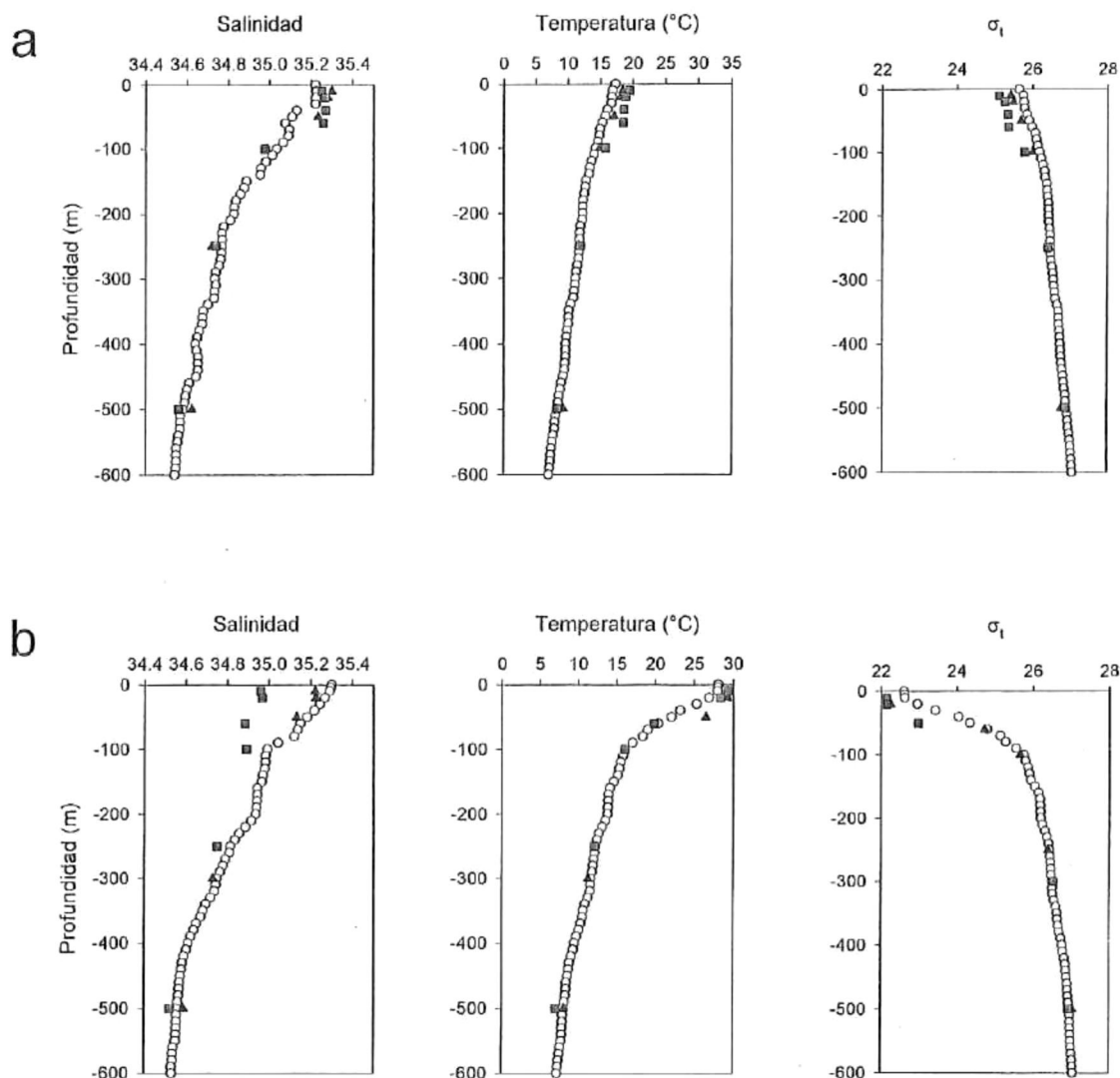


Figura 18. Perfiles verticales de salinidad, temperatura y σ_t registrados en la E38 (○) durante las campañas de a) invierno y b) verano de este estudio, comparados con los perfiles reportados para un sitio cercano a la E38 (▲) y la boca del GC (■) para el verano de 1996 e invierno de 1997 (Delgadillo-Hinojosa et al., 2006).

7.1.1 Variabilidad espacial y temporal de la mezcla vertical en la RGI.

En este trabajo, el parámetro de estratificación (ϕ) se utilizó como una medida de la intensidad de la mezcla vertical. El valor del ϕ no distingue cual es el forzamiento responsable de producir la mezcla de la columna de agua, solo indica la cantidad de energía que necesita la columna de agua para mezclarse completamente (Simpson et al., 1994). Tampoco existe una clasificación de la intensidad de la mezcla basada en los valores del ϕ , por lo que se convierte en una escala relativa dependiendo de los procesos físicos que actúen en la región de estudio (Delgadillo-Hinojosa, 2000).

Primero, considerando la escala espacial, la distribución horizontal del ϕ a lo largo de la RGI, mostró de manera sistemática que las zonas con condiciones de mezcla intensa se presentaron en el UNCB, el USL, USE, CSPM y CT, mientras que las de mayor estratificación se presentaron en los extremos norte y sur del área de estudio (Fig. 14). En estos sitios, la interacción de la onda de marea con la compleja topografía de la RGI promueve que persista, de manera semipermanente, condiciones de intensa mezcla a lo largo de la columna de agua (Argote et al., 1995; Marinone y Lavín, 2003).

Segundo, considerando la escala temporal, en invierno, la columna de agua permaneció altamente mezclada a lo largo de toda la zona de estudio, sugiriendo la intensificación de la mezcla vertical a una escala regional durante esta época del año. Estos resultados son consistentes con el trabajo de Martínez-de-León et al. (2006), quienes estudiaron durante un año la

variación estacional de la temperatura superficial del mar a lo largo del CB y reportaron la presencia continua de agua fría en las aguas superficiales del canal durante el invierno. Ellos atribuyeron esta conducta de la temperatura en invierno, al efecto combinado de la cuasi-permanente mezcla vertical inducida por la marea que caracteriza a la región de las islas (Argote et al., 1995) y a la mezcla invernal (Lavín et al., 1995; Torres-Valdés, 2000). Durante esta época del año, la mezcla invernal se produce por la pérdida de calor superficial en todo el golfo, lo cual provoca también que la capa de mezcla varíe entre 10 y 70 m en invierno y verano, respectivamente (Martínez-Sepúlveda, 1994). Además, a este efecto se añade que los vientos que vienen del noroeste se presentan con mayor intensidad ($8 - 12 \text{ ms}^{-1}$; Badán-Dangon et al., 1991), lo cual provoca que la columna de agua de la zona costera de la RGI, se encuentre muy mezclada ($3 - 10 \text{ Jm}^{-3}$; Delgadillo-Hinojosa et al., 1997).

Durante la primavera, el valor del ϕ se incrementó (Fig. 14) debido a que en esta época las aguas superficiales de la RGI ganan calor, generando una termoclina más estable (Castro et al., 1994). Al llegar el verano, el ϕ alcanzó sus valores máximos, indicando la presencia de una fuerte condición de estratificación, a pesar de que la mezcla por mareas es similar a la que se presenta en invierno (Marinone y Lavín, 2003). Así, en verano, la columna de agua está más estratificada debido a la combinación de varias circunstancias como son la ganancia de calor desde la atmósfera (Castro et al., 1994), la velocidad de los vientos decrece ($> 5 \text{ ms}^{-1}$; Badán-Dangón et al., 1991), la mezcla invernal desaparece (Martínez-Sepúlveda, 1994) y el

AGC aumenta su volumen hacia esta región (Delgadillo-Hinojosa, 2000). Esta situación favorece la formación de una termoclina muy fuerte, limitando de este modo el transporte de nutrientes hacia la capa superficial y, en consecuencia, influenciando un menor desarrollo del fitoplancton durante esta época del año (Santamaría del Ángel et al., 1999; Cortez-Lara et al., 1999).

7.2 Efecto de la mezcla vertical sobre la distribución de los nutrientes.

En general, los resultados de este trabajo demuestran que el efecto que tienen los procesos físicos sobre la distribución de los nutrientes se ve reflejado en 1) la forma de los perfiles y 2) en el enriquecimiento de la capa superficial con nutrientes de esta zona tan importante del GC.

7.2.1 Efecto sobre la forma del perfil.

Independientemente de cual sea el proceso responsable de generar la mezcla vertical, una implicación importante de este proceso físico es que promueve que los nutrientes regenerados en las capas profundas sean transportados nuevamente hacia la superficie incrementando su concentración superficial (Torres-Valdés, 2000).

Las distribuciones verticales de los nutrientes en el CB (E7, E8, E9) y la zona de los umbrales (E23, E24, E28, E30) fueron verticalmente más homogéneas, mientras que en las zonas norte y sur se observó una distribución vertical más pronunciada, tipo nutriente (Fig. 7 y 8). La

homogeneidad vertical de los perfiles de invierno y primavera fue más marcada que en el verano. La forma del perfil puede expresarse de manera cuantitativa a través del gradiente vertical del nutriente (ΔN). Los perfiles muy homogéneos darán valores de ΔN tendiendo a cero mientras que los valores de ΔN serán mayores a medida que el perfil sea más marcado. La figura 15 muestra que los valores bajos del gradiente de nutrientes estuvieron relacionados a condiciones de mezcla intensa, lo cual se ve más acentuados durante invierno y primavera. Mientras que los valores altos estuvieron asociados a una mayor estratificación lo que se observó claramente durante el verano. Estos resultados indican que la mezcla vertical ejerce un control sobre la forma de los perfiles de los nutrientes en la RGI.

7.2.2. Efecto sobre el enriquecimiento superficial.

En general, los valores superficiales de NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4 , medidos en la RGI (Fig. 7, 8, 9, 10 y 11) fueron mayores a los reportados para las aguas superficiales del Océano Pacífico adyacente al GC (Fig. 19; Fiedler y Talley, 2006). En particular, las concentraciones superficiales máximas de los tres nutrientes se registraron durante el invierno en el CB y la zona de los umbrales (Fig.12), mientras que las concentraciones mínimas se registraron durante el verano.

La figura 16 muestra que aproximadamente el 80% de la variabilidad temporal de la concentración superficial de los tres nutrientes se explica por la variabilidad temporal de la mezcla vertical, lo cual sugiere que la agitación

de la columna agua afecta la disponibilidad de los nutrientes en la capa superficial de la RGI. Esta interpretación es consistente con otros trabajos realizados para estudiar la composición química de las aguas superficiales de la RGI. Por ejemplo, Domínguez-Rosas (2008) estudio la distribución vertical del Cd durante los cruceros Umbrales I, II y III y reportó una fuerte correlación entre la intensidad de la mezcla vertical y la concentración superficial de Cd en la RGI. Igualmente, Camiro-Vargas (2004) y Hernández-Ayón et al. (2007), quienes utilizaron datos del crucero Umbral I, sugirieron que la variabilidad de la mezcla vertical fue muy importante para explicar la variación espacial de las variables del sistema del CO₂ (pCO₂, Carbono inorgánico total, pH y Alcalinidad total). De manera similar a la distribución de los nutrientes, los valores mas altos de Carbono inorgánico disuelto y las mayores pCO₂ fueron medidos en la zona de los umbrales y el CB (Camiro-Vargas, 2004; Hernández-Ayón et al., 2007).

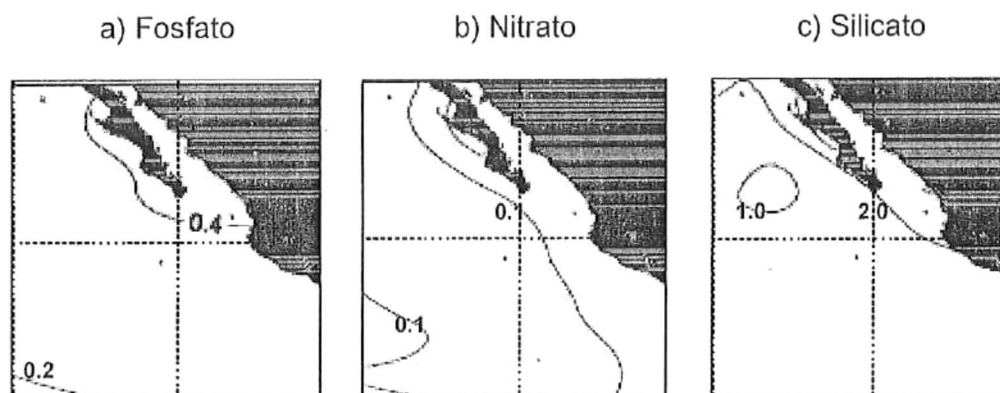


Figura 19. Concentración superficial ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) de a) PO_4 , b) NO_3 y c) Si(OH)_4 en el Océano Pacífico adyacente al GC (Figura tomada de Fiedler y Talley, 2006).

De igual forma que las concentraciones superficiales de nutrientes, las más altas concentraciones promedio de nutrientes integradas en los primeros 100 m, se detectaron durante el invierno en el CB y la región de los umbrales ($18.9 \pm 0.5 \mu\text{M}$ de NO_3 , $2.43 \pm 0.07 \mu\text{M}$ de PO_4 , $37.7 \pm 1.3 \mu\text{M}$ de Si(OH)_4), mientras que las mas bajas se encontraron durante el verano en la parte norte y sur ($9.3 \pm 0.6 \mu\text{M}$ de NO_3 , $1.37 \pm 0.08 \mu\text{M}$ de PO_4 , $18.1 \pm 1.6 \mu\text{M}$ de Si(OH)_4) del área de estudio (Tabla IV). La figura 13 presenta la correlación entre las concentraciones superficiales y las concentraciones promedio de nutrientes integrada en los primeros 100 m. Aunque el grado de asociación entre la concentración superficial y la integrada a 100m fue más alto para los cruceros de invierno y primavera, los coeficientes de correlación (r) para el conjunto total de los datos, variaron entre 0.81 para los silicatos y 0.85 para los fosfatos. Por lo tanto, este análisis sugiere que el impacto de la mezcla vertical en la generación del enriquecimiento superficial de nutrientes en la RGI no solo se manifiesta en la superficie, sino que también en los primeros 100 m de la capa superficial de la RGI.

Además del flujo vertical promovido por la mezcla de la columna de agua, existen otros mecanismos que pudieran explicar las altas concentraciones de nutrientes en las aguas superficiales de la RGI, como podrían ser los aportes por ríos, la advección horizontal en la superficie y la circulación estacional del GC. Sin embargo, en el caso de la RGI, entre estos posibles mecanismos podemos descartar los aportes por ríos ya que no existen descargas de ríos que lleguen a esta zona de manera notable. Los principales ríos que desembocan al norte de la RGI (Río Colorado), así como

aquellos que desembocan al sur (Ríos Yaqui, Mayo, Fuerte, Piaxtla, Presidio, Baluarte, Culiacán y Río Grande de Santiago), han sido represados (Roden, 1964). Por otra parte, la advección horizontal en la superficie no parecen ser una mecanismo que contribuya a elevar los niveles de nutrientes en la capa superficial de la RGI, porque las aguas superficiales de las zonas norte y sur de las islas presentan menores concentraciones de nutrientes (Fig. 7, 8, 9, 10) que las registradas en la zona de los umbrales y el CB.

La advección vertical podría representar una fuente de nutrientes hacia la capa superficial, la cual parece reflejarse a través de las isolíneas de temperatura, salinidad y nutrientes (Figuras 3, 4, 9, 10 y 11). Sin embargo, este proceso también puede descartarse debido a que estudios previos en la zona de la RGI, han establecido que los flujos en esta área son multidireccionales por el efecto de la mezcla vertical (Simpson et al., 1994)

7.3 Influencia del ASsSt sobre la distribución de los nutrientes en la RGI.

En condiciones de invierno, el transporte horizontal del ASsSt hacia la RGI se intensifica (Torres-Orozco, 1993) lo cual provoca un mayor flujo subsuperficial de agua rica en nutrientes hacia esta región. En contraste, durante el verano, el flujo horizontal del ASsSt disminuye llevando una menor proporción de agua rica en nutrientes hacia la RGI. Por lo tanto, la circulación estacional es uno de los mecanismos encargados de la variabilidad temporal de los nutrientes en esta región.

Por otro lado, las distribuciones verticales de temperatura y salinidad (Fig. 3 y 4) sugieren que el enriquecimiento con nutrientes de la capa superficial ocurre por un transporte vertical de ASsSt hacia la capa superficial en la RGI. Como primera aproximación para estudiar el enriquecimiento superficial a causa del ASsSt, se calculó el factor de enriquecimiento (FE) tomando como referencia la concentración de los nutrientes presente en el núcleo del ASsSt (Tabla V).

Tabla V. Concentración promedio de NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4 en el núcleo del ASsSt. Este valor se obtuvo utilizando todos los datos registrados entre 200 y 300 m de profundidad para esta masa de agua durante los tres cruces realizados en este estudio.

	NO_3 (μM)	PO_4 (μM)	Si(OH)_4 (μM)
Promedio	21.81	2.47	42.25
Desviación estándar	2.51	0.18	4.82
Error estándar	0.63	0.04	1.24
% de variabilidad	2.87	1.81	2.95

En general, la tabla VI muestra que el FE fue mayor durante el invierno y disminuyó sustancialmente hacia el verano. De manera particular, durante el invierno, los FE fueron mas altos en el UNCB y la zona del USL y USE, muy probablemente asociado a un fuerte flujo de ASsSt y, a la intensa mezcla vertical de la columna de agua que ocurre en invierno.

Tabla VI. Factor de Enriquecimiento (FE) de las aguas superficiales de la RGI. $FE = ([N]_{sup} / [N]_{ASST}) \times 100$. Donde $[N]_{ASST}$ es la concentración promedio de PO_4 , NO_3 y/o $Si(OH)_4$ medidas en el núcleo del ASsSt. $[N]_{sup}$ = concentración promedio de PO_4 , NO_3 y/o $Si(OH)_4$ integrada a 100 m para cada una de las estaciones de la RGI. El FE es una medida referente a la concentración de PO_4 , NO_3 y/o $Si(OH)_4$ en el ASsSt, ya que un número cercano a 100, sugiere una mayor similitud con ella.

A) INVIERNO			
	NO_3	PO_4	$Si(OH)_4$
Norte	79.6 ± 1.6	90.6 ± 0.8	69.1 ± 7.9
CB	85.4 ± 9.4	97.3 ± 2.5	90.6 ± 9.6
Umbrales	86.5 ± 2.3	98.4 ± 3.0	89.3 ± 3.0
Sur	59.0 ± 1.1	87.0 ± 3.1	57.6 ± 7.3
b) primavera			
	NO_3	PO_4	$Si(OH)_4$
Norte	50.5 ± 1.2	84.2 ± 0.4	58.1 ± 2.0
CB	63.6 ± 1.2	90.2 ± 0.7	79.5 ± 0.9
Umbrales	69.5 ± 3.8	88.1 ± 2.5	76.0 ± 5.0
Sur	62.7 ± 2.3	81.7 ± 2.3	63.0 ± 4.8
c) verano			
	NO_3	PO_4	$Si(OH)_4$
Norte	49.0 ± 9.3	67.9 ± 9.4	56.7 ± 11.6
CB	38.9 ± 1.7	50.3 ± 1.9	45.1 ± 6.4
Umbrales	41.4 ± 5.9	54.8 ± 4.1	44.4 ± 5.3
Sur	42.6 ± 2.9	55.5 ± 3.1	42.7 ± 3.8

En primavera, la intensidad de la mezcla disminuyó promoviendo un ligero incremento de la estratificación, lo cual pudo ocasionar que los nutrientes permanecieran atrapados en la capa superficial, quedando de este modo disponibles para el consumo del fitoplancton y promoviendo el desarrollo del afloramiento fitoplanctónico más importante del GC durante esta época (Thunell et al., 1996). Además, el flujo de entrada del ASsSt fue

ligeramente menos profunda, mientras que el AGC se incrementó en comparación al invierno, lo cual también pudo ocasionar una menor disponibilidad de nutriente en la capa subsuperficial que pueda ser llevado hacia la superficie.

En verano, las bajas concentraciones de nutrientes estuvieron relacionadas a condiciones de menor turbulencia de la columna de agua por la presencia de vientos débiles (Badán-Dangon et al., 1991) y ganancia de calor desde la atmósfera (Castro et al., 1994). Así, la fuerte estratificación limitó el paso de nutrientes hacia la capa superficial y además se presentó una disminución de entrada de agua de fondo rica en nutriente hacia la RGI (Fig. 3, 4, 9, 10 y 11). Cabe señalar que durante las tres épocas de muestreo el contenido de nutriente en el ASsSt fue similar (Tabla V) por lo que el aporte de nutrientes hacia la superficie va a depender de la intensidad de la mezcla vertical y de la intensidad del flujo del ASsSt hacia la RGI (Fig. 3, 4, 9, 10 y 11).

7.4 Efecto de los procesos biológicos sobre la distribución de los nutrientes.

La distribución típica de los nutrientes como NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4 en el océano presenta concentraciones bajas en la superficie y aumenta con la profundidad (Chester, 2000; Millero, 2005). Las concentraciones bajas de nutrientes se deben a la remoción por parte de los organismos fotosintéticos en la capa superficial y las concentraciones altas de nutrientes se deben a que son liberados a través de la oxidación de la materia orgánica en la capa

profunda (Redfield et al., 1963). La contribución de los procesos biológicos sobre la distribución superficial de los nutrientes es difícil distinguir. En este estudio se intentaron varios enfoques diferentes con la intención de observar el efecto sobre la distribución espacial y la variabilidad temporal de los nutrientes.

En un primer intento de observar una influencia de los procesos biológicos sobre la disponibilidad de los nutrientes, se correlacionó la biomasa fitoplanctónica con la concentración de nutrientes en la capa superficial de la RGI. La biomasa fitoplanctónica, medida en este estudio como clorofila *a* (Cl *a*), se registró en todas las estaciones durante la primavera, mientras que en verano, solo se midió a lo largo del transecto central. Durante la primavera, se observó una correlación negativa entre la Cl *a* y la concentración de los nutrientes (Fig. 20), lo cual indica que valores altos de nutrientes estuvieron asociados a valores bajos de Cl *a* y viceversa. Durante el verano, se observó una ligera tendencia negativa, aunque no hubo una clara asociación entre la concentración de los tres nutrientes y la Cl *a*. Así, la alta variabilidad de la relación entre los nutrientes y la Cl *a* en la RGI, además del reducido número de muestras colectadas durante esta época, sugieren que esta aproximación no es buen indicador de la influencia de los procesos biológicos sobre la distribución de los nutrientes en la RGI.

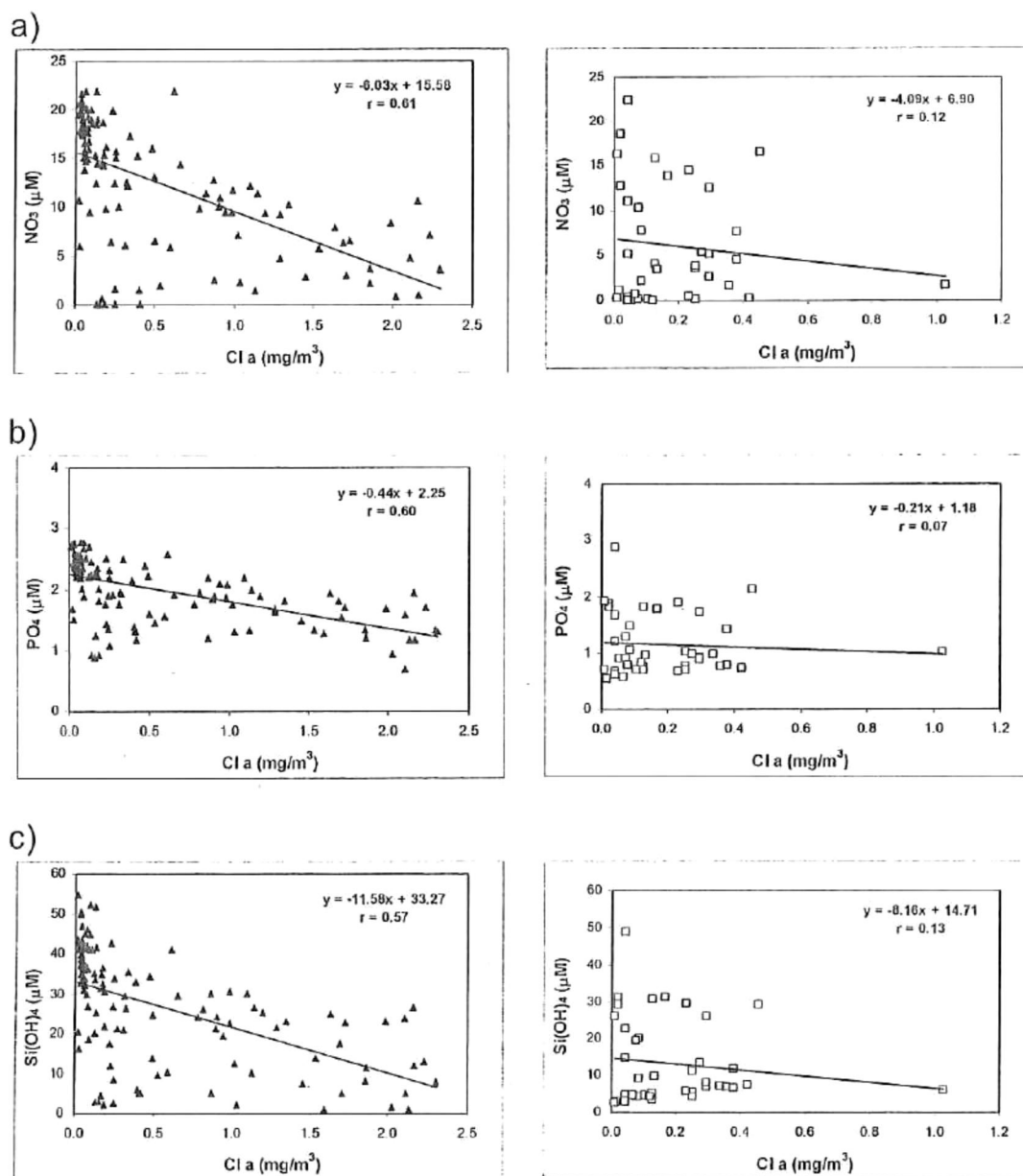


Figura 20. Relación entre la concentración de a) PO₄, b) NO₃ y c) Si(OH)₄ contra clorofila a de 0 - 100 m en primavera (▲) y de 0 - 75 m en verano (□).

Aunque no se obtuvieron mediciones de Cl_a durante el crucero de invierno, en la RGI se han reportado valores altos de Cl_a ($5.9 \pm 0.4 \text{ mg m}^{-3}$) en esta época (Hidalgo-González y Álvarez-Borrego, 2000; Flores-de-Santiago, 2007) en relación a otras estaciones del año. Por ejemplo, Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2000) reportaron valores de Cl_a de $1.3 \pm 0.2 \text{ mg m}^{-3}$ durante el verano. Además, independientemente de la época del año, los valores de Cl_a observados por estos autores, muestran que los valores más altos se han encontrado en sitios alrededor de los umbrales y no sobre ellos, muy probablemente porque sobre los umbrales la agitación de la columna de agua es intensa y, bajo esas condiciones, la luz es la variable que puede controlar la fotosíntesis (Delgadillo-Hinojosa et al., 1997).

La segunda manera de analizar la importancia de los procesos biológicos sobre la concentración de los nutrientes en la RGI, fue calcular la concentración de nutrientes en la superficie debido a los procesos físicos y sustraerla de la concentración medida, siguiendo el procedimiento de Delgadillo-Hinojosa (2000). Así, para calcular la concentración de nutrientes debido a la mezcla y advección fue necesario utilizar las fracciones de mezcla de las masas de agua presentes en el área de estudio. Como una primera aproximación, se utilizó el porcentaje de masas de agua para los primeros 50 m (invierno= 41% AGC y 59% ASsSt; verano= 52% AGC, 33% ASsSt y 15% ASE) reportados solo para la zona de los umbrales (Delgadillo-Hinojosa, 2000; Delgadillo-Hinojosa et al., 2008).

En la tabla VII se muestra la concentración de nutrientes medida y la concentración de nutrientes que se debe a los procesos de mezcla/advección para la zona de los umbrales. Durante el invierno, la concentración medida para NO_3 y Si(OH)_4 fue menor a la concentración por mezcla, lo cual indica que los nutrientes fueron removidos de capa superficial y la fotosíntesis es el proceso que controla la remoción de nutrientes en los primeros 50 m. Para PO_4 la concentración medida fue similar a la conservativa lo que sugiere que la concentración del PO_4 puede principalmente explicarse por los procesos de mezcla y advección.

En el verano, la concentración medida para todos los nutrientes fue menor que la concentración conservativa. En esta época del año fue mucho más marcado el efecto de los procesos biológicos sobre el efecto de la distribución de los nutrientes, lo que sugiere que existe una fuerte influencia de la fotosíntesis sobre la concentración de nutrientes en la capa superficial como se ha sugerido anteriormente (Santamaría-del-Ángel, et. al. 1994). Dado que se muestra que el efecto de los procesos físicos es muy fuerte durante el invierno, los perfiles se ven más homogéneos. Esto se ve reflejado en la relación entre la ΔN y el ϕ durante ese periodo (Figura 15). De esta manera se puede observar que la fotosíntesis es un proceso importante que actúa sobre la distribución de los nutrientes en la RGI y se puede observar principalmente durante el verano, mientras que en invierno no se distingue con claridad por la fuerza de los procesos físicos.

Tabla VII. Concentración promedio de nutrientes por mezcla/advección [N(T,S)], concentración medida en la zona de los umbrales de la RGI (N_m) y debido a los procesos biológicos (N_B). Estos valores representan la concentración de nutriente integrados en los primeros 50 m de profundidad de la zona de los umbrales.

A) INVIERNO			
	NO_3	PO_4	$Si(OH)_4$
N(T,S)	19.7 ± 0.4	2.35 ± 0.04	36.4 ± 0.6
N_m	17.5 ± 0.7	2.30 ± 0.19	34.4 ± 1.6
N_B	-2.2	-0.05	-2.0
c) verano			
	NO_3	PO_4	$Si(OH)_4$
N(S,T)	11.7 ± 2.2	1.71 ± 0.26	25.6 ± 4.4
N_m	2.4 ± 1.6	0.84 ± 0.09	6.9 ± 3.1
N_B	-9.3	-0.87	-18.7

7.4.1 Razones nutriente-nutriente.

El estudio de la razón $NO_3:PO_4$ es de suma importancia debido a que el NO_3 y el PO_4 controlan la producción primaria en los océanos (Tyrrell, 1999). Redfield et al. (1963) demostraron que la proporción de $NO_3:PO_4$ que se encontraba en las aguas profundas del océano es similar a la que presenta el material orgánico de origen biogénico de la capa superficial. Por ello, determinaron que la proporción con la que se extraen los nutrientes de la columna de agua por los organismos fitoplanctónicos es la misma con la que son liberadas al degradarse la materia orgánica por las bacterias. Sin embargo, puede haber otros factores que alteren estas proporciones como la nitrificación o desnitrificación (Libes, 1992).

La razón $NO_3:PO_4$ en la RGI fue de 13.4 ± 0.6 en invierno, 15.3 ± 0.3 en primavera y 12.2 ± 0.2 en verano. Estos valores de la razón $NO_3:PO_4$ de

la RGI se encuentran en el intervalo de valores reportadas previamente para el GC. Por ejemplo, Álvarez-Borrego et al. (1978) reportaron una razón de 16 mientras que Torres-Valdés (2000) reportó razones que variaron de 12.7 en invierno a 9.3 en verano. De igual manera, los valores de la razón $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ en la RGI de invierno y verano son menores a la razón propuesta por Redfield.

En general, las proporciones $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ bajas se presentan en ambientes suboxicos, donde se favorecen las condiciones para que ocurra la desnitrificación (Libes, 1992) y/o, donde el grupo predominante del fitoplancton son las diatomeas (Arrigo et al., 2002). El proceso de desnitrificación ocurre en aguas con altos flujos de materia orgánica y altos tiempo de residencia, lo cual se presenta a partir de concentraciones de oxígeno disuelto menores de $22 \mu\text{M}$ (Tyrrell y Law, 1997; Tyrrell y Lucas, 2002).

Altabet et al. (1999) usó los isotopos del ^{15}N y Torres-Valdés (2000) la razón $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ para proponer que la desnitrificación ocurre en el GC desde la región sur del golfo hasta la zona de la Cuenca de Guaymas. Sin embargo, en la RGI, Torres-Delgado (2004) reportó concentraciones de NO_2 menores de $0.05 \mu\text{M}$ asociadas a concentraciones de oxígeno de $20 \mu\text{M}$, por lo que se considera que no hubo evidencia de desnitrificación para el invierno del 2002. Además, durante los tres cruceros en la RGI, se midieron concentraciones muy por encima de los $20 \mu\text{M}$ (Díaz-Rodríguez, 2008) y solo en las estaciones 34 y 38, por debajo de los 400 m, se encontraron las condiciones suboxicas requeridos para que ocurra la desnitrificación. La falta

de un claro máximo de NO_2 y los altos valores de oxígeno ($>30 \mu\text{M}$) en la columna de agua de la RGI, sugieren que difícilmente el proceso de desnitrificación pueda estar llevándose a cabo en esta región. Muy probablemente, en su viaje hacia la RGI, el ASsSt llega con una deficiencia de NO_3 , el cual ha sido utilizado en la región suboxica ubicada al sur del GC.

Por otro lado, como se ha mostrado en este trabajo, en la RGI existe un aporte continuo de nutrientes hacia la superficie a través de la mezcla vertical. Esta condición favorece que se desarrollen organismos capaces de soportar ambientes con fuerte agitación del agua (e.g. Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). En particular, las diatomeas son un grupo de fitoplancton oportunista, ya que sus tasas de división celular son rápidas y en cuanto hay un aumento de nutrientes se desarrollan intensamente, aún en aguas con fuerte agitación (Thunell, 1996). Estudios realizados sobre la razón $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ han mostrado que dependiendo de la especie que se encuentre en la zona determina la razón N:P (Arrigo et al., 1999). Por ejemplo, en el mar de Ross se observó que cuando hay un florecimiento de diatomeas la razón $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ es baja (promedio = 9.69 ± 0.33), mientras que con otra especie de fitoplancton, *Phaeocystis Antarctica*, la razón $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ es alta (promedio = 19.2 ± 0.6 ; Arrigo et al., 1999). Además, la RGI presentó una proporción de ~ 34 y $31/25$ de $\text{Si(OH)}_4:\text{PO}_4$ para invierno y primavera, respectivamente, proporciones que son característicos de zonas con dominancia de organismos silíceos por su uso principalmente en la formación de su esqueleto (Open University, 1989). Para el verano, la proporción de $\text{Si(OH)}_4:\text{PO}_4$ fue de 25, mientras que la de $\text{Si(OH)}_4:\text{NO}_3$ fue

de 1.93 lo que sugiere que la actividad de los organismos silíceos es menor en relación a los otros periodos de muestreo.

Así, tomando en cuenta que la RGI se caracteriza por una fuerte abundancia de diatomeas, la respuesta mas probable a la baja razón $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ y $\text{Si(OH)}_4:\text{NO}_3$ en la RGI es a la abundancia de las diatomeas y al transporte de agua desnitrificada desde la región sur del GC mas que a la presencia del proceso de desnitrificación en la RGI.

Finalmente, es interesante notar que en este estudio se encontró un exceso de PO_4 de alrededor de $1.2 \mu\text{M}$ en invierno y primavera, mientras que hacia el verano disminuyó aproximadamente a $0.6 \mu\text{M}$ (Fig. 18a). Dado que las tasas de depositación del material biogénico medidos en trampas de sedimentos son similares entre verano e invierno (Thunell, 1998) y que el NO_3 y Si(OH)_4 se agota de invierno a verano, esta diferencia entre verano e invierno de $0.5 \mu\text{M}$ en el exceso de PO_4 en las aguas superficiales de la RGI, podrían sugerir que el PO_4 disponible en las aguas superficiales durante el verano se utiliza por los organismos fijadores de nitrógeno para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis en la RGI, tal como ha sido observado para la zona de la Cuenca de Guaymas (White et al., 2007).

8. Conclusiones

Las masas de aguas presentes en la RGI son el AGC y el ASsSt, principalmente. Esta última masa de agua fluye hacia la superficie en la zona del UNCB, USL y USE e incrementa de verano a invierno.

En general, el efecto de la mezcla vertical se manifestó aumentando la concentración promedio de NO_3 , PO_4 y Si(OH)_4 en la capa superficial y formando perfiles verticalmente homogéneos.

El UNCB, USL y USE así como las Cuencas Tiburón y San Pedro Mártir fueron las zonas que presentaron una columna de agua con condiciones de mayor mezcla vertical.

Las concentraciones superficiales y la distribución vertical de los nutrientes sugieren que el CB y la zona de los umbrales funcionan como sitios de bombeo de nutrientes hacia la capa superficial de la RGI.

El enriquecimiento superficial puede ser explicado con la mezcla vertical de la columna de agua en conjunto con la circulación estacional. El ASsSt representa la fuente principal del enriquecimiento con nutrientes de la capa superficial de la RGI.

En invierno el enriquecimiento se acentúa por el mayor flujo vertical de ASsSt hacia la superficie de la RGI. En contraste, durante el verano el enriquecimiento disminuye por el menor flujo vertical del ASsSt hacia la RGI.

La intensidad de los procesos biológicos es poco visible en los perfiles verticales de nutrientes en las zonas de los umbrales y el CB por la predominancia de la mezcla vertical. En contraste, son más visibles en los perfiles verticales de las zonas norte y sur del área de estudio por un menor efecto de la mezcla vertical y un menor aporte de nutrientes hacia la capa superficial.

Las razones $\text{NO}_3:\text{PO}_4$, $\text{Si(OH)}_4:\text{PO}_4$ y $\text{Si(OH)}_4:\text{NO}_3$ estimadas en este estudio, sugieren que durante el verano, los nutrientes limitantes para la producción primaria de la RGI son el NO_3 y Si(OH)_4 .

Durante el verano, ocurre un marcado agotamiento de la concentración superficial de NO_3 y Si(OH)_4 , lo cual se combina con las altas concentraciones de PO_4 , para producir condiciones favorables para el desarrollo de los microorganismos fijadores de nitrógeno en la RGI.

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-SeaResearch*. **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.
- Bray, N., 1988. Thermohaline circulation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*. **93**(C5): 4993-5020.

- Bray, N. y J. M. Robles, 1991. Physical oceanography of the Gulf of California: En: *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. (Dauphin, J. P. & Simoneit, B. R., eds). *AAPG Memoir* **47**: 511-553.
- Camiro-Vargas, T. K. 2004. El sistema del carbono en la región de las grandes islas en el Golfo de California. Tesis de Maestría. FCM-UABC: 91 pp.
- Carvajal, N y J.O. Backhaus. 1997. Simulation of tides, residual flow and energy budget in the Gulf of California. *Oceanologica Acta*. **21**:429-444.
- Case, T. J. 1983. Island Biogeography in the Sea of Cortez. *University of California*. 508 pp.
- Castro, R., M. Lavín y P. Ripa, 1994. Seasonal heat balance in the Gulf of California. *Journal Geophysical Research*. **99**: 3249-3261.
- Chester, R. 2000. Marine Geochemistry. Second Edition. *Blackwell Science Ltd*. USA. 506 pp.
- Cortés-Lara, M. C., S. Álvarez-Borrego y A. D. Giles-Guzmán, 1999. Efecto de la mezcla vertical sobre la distribución de nutrientes y fitoplancton en dos regiones del Golfo de California, en verano. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*. **49**: 1-14.
- Delgadillo-Hinojosa, F., G. Gaxiola-Castro, J. A. Segovia-Zavala, A. Muñoz-Barbosa and M. V. Orozco-Borbón. 1997. The effect of vertical mixing on primary production in a bay of the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. **45**: 135-148.
- Delgadillo-Hinojosa, F. 2000. Biogeoquímica del cadmio y manganeso en el Golfo de California. Tesis de Doctorado. FCM-UABC: 181 pp.
- Delgadillo-Hinojosa, F., J. V. Macías-Zamora, J. A. Segovia-Zavala and S. Torres-Valdés. 2001. Cadmium enrichment in the Gulf of California. *Marine Chemistry*. **75**: 109-122.
- Delgadillo-Hinojosa, F., J. A. Segovia-Zavala, M.A. Huerta-Díaz y H. Atilano-Silva. 2006. Influence of geochemical and physical processes on the vertical distribution of manganese in Gulf of California waters. *Deep-sea Research I*. **53**: 1301-1319.
- Delgadillo-Hinojosa, F., J. A. Segovia-Zavala, J. M. Hernández-Ayón y M.A. Huerta-Díaz. 2008. Enriquecimiento invernal de Cd del agua superficial del Golfo de California. En: *Numero Especial del XIV Congreso Nacional de Oceanografía*. L. Silva-Iñiguez (ed), Facultad de Ciencias Marinas. Universidad de Colima: (En prensa).

- Díaz-Rodríguez, G. 2008. Estudio de la distribución vertical de manganeso y cobalto en la región de las grandes islas en el Golfo de California. Tesis de Maestría. FCM-UABC: 91 pp.
- Domínguez-Rosas, A. 2008. Distribución vertical y temporal del níquel y cadmio en el Golfo de California. Tesis de Maestría. FCM-UABC: 97 pp.
- Fiedler, P.C. y L.D. Talley. 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*. **69**:143-180.
- Gaxiola-Castro, G., J. García-Córdova, J. E. Valdéz-Holguín, y M Botello-Ruvalcaba, 1995. Spatial distribution of chlorophyll *a* and primary productivity in relation to winter physical structure in the Gulf of California. *Continental Shelf Research*. **15**(9): 1043-1059.
- Hernández-Ayón, J. M. 2000. Efectos de procesos físicos, químicos y biológicos sobre parámetros del sistema del CO₂ en dos regiones costeras: El Golfo de California y una región de la Antártica. FCM-UABC. Tesis Doctorado. 157 pp.
- Hernández-Ayón, J. M., A. Zirino-Weiss, F. Delgadillo-Hinojosa y S. Galindo-Bect. 2007a. Carbono inorgánico disuelto en el Golfo de California en condiciones de verano. En: Carbono en ecosistemas acuáticos de México. SEMARNAT-CICESE. p.45-57.
- Hernández-Ayón, J. M., F. Delgadillo-Hinojosa, T. Camiro-Vargas y M. López-Mariscal. 2007b. Estudio de las variables del CO₂ en la región de las grandes islas del Golfo de California en condiciones de invierno. En: Carbono en ecosistemas acuáticos de México. SEMARNAT-CICESE. p.59-73.
- Ketchum, B. H. 1983. Enclosed Seas. p. 209-218. In: Ketchum BH (ed). *Estuaries and Enclosed Seas*, Elsevier, Amsterdam. 500 pp.
- Lavín, M. y S. Organista, 1988. The surface heat flux in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* **93**: 1433-1445.
- Lavín, M.F., G. Gaxiola-Castro, J. M Robles y K. Richter, 1995. Winter water masses and nutrients in the norther Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*. **100**(5): 8587-8605.
- Lavín, M.F. y S.G. Marinone. 2003. An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. En: Velasco-Fuentes, O. U. et al. (Eds), *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Kluwer Academic Publisher, Netherlands, pp. 173-204.

- Libes, S. 1992. An Introduction to Marine Biogeochemistry. John Wiley & Sons, Inc. USA. 734 pp.
- López, M. y J. García. 2003. Moored observations in the northern Gulf of California: A strong bottom current. *Journal of Geophysical Research*. **108**:30-1/30-18
- López, M., J. Candela y M. L. Argote. 2006. Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in the Gulf of California?. *Geophysical Research Letters*. **33**:L11603, doi:10.1029/2006GL025908.
- López, M., J. Candela y J. García. 2008. Two overflows in the Northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*. doi:10.1029/2007JC004575.
- López-Vergara, A. T. 1993. Caracterización del fitoplancton y su relación con algunas variables físicas y químicas en la región de las Grandes Islas en el Golfo de California. Tesis de Licenciatura, FCM, UABC. 66 pp.
- Lluch-Cota, S.E. 1999. Coastal upwelling in the eastern Gulf of California. *Oceanologica Acta*. **23** – N° 6: 731-740.
- Marinone, S. G. y Lavín, M. F. 2003. Residual flux and mixing in the large slands region of the central gulf of California. En: Velasco-Fuentes, O. U. et al. (Eds), *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Kluwer Academic Publisher, Netherlands, pp. 213-236.
- Martínez-Díaz-de-León, A., I. Pacheco-Ruíz, F. Delgadillo-Hinojosa, J.A. Zertuche-González, A. Chee-Barragán, R. Blanco-Betancourt, J.M. Guzmán-Calderón y A. Gálvez-Telles. 2006. Spatial and temporal variability of the sea surface temperature in the Ballenas-Salsipuedes Channel (central Gulf of California). *Journal of Geophysical Research*. **111**: C02008/1-7.
- Martínez-Sepúlveda. 1994. Descripción de la profundidad de la capa mezclada superficial en el Golfo de California. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas - UABC, Ensenada, México. 48 pp.
- Mateos, E., S.G. Marinone y M.F. Lavín. 2006. Role of tides and mixing in the information of an anticyclonic gyre in San Pedro Mártir Basin, Gulf of California. *Deep Sea Research Part II*. **53**: 60-76.
- Millero, F. J. 2006. Chemical Oceanography. Taylor & Francis Group. 3ra. Ed. USA. 496 pp.

- Navarro-Olache, L.F., M.F. Lavín, L.G. Alvarez Sánchez y A. Zirino. 2004. Internal structure of SST features in the central Gulf of California. *Deep Sea Research Part II*. **51**: 673-687.
- Open University. 1989. Ocean Chemistry and deep-sea sediments. *Pergamon Press. Great Britain*. 134 pp.
- Paden, C.A., M.R. Abbott y C.D. Winant. 1991. Tidal and Atmospheric Forcing of the Upper Ocean in the Gulf of California. 1. Sea Surface Temperature Variability. *Journal of Geophysical Research*. **96**: 18337-18359.
- Parés-Sierra, A., A. Mascarenhas, S. G. Marinone y R. Castro. 2003. Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California. *Geophys. Res. Lett.* **30** (6): 1312.
- Redfield, A. C, B. H. Ketchum y F. A. Richards. 1963. The influence of organisms on the composition of sea-water. En: Hill, M. [Ed.] *The Sea*. Interscience, New York. p.26-77.
- Riley, J. P., R. Chester, 1989. Introducción a la química marina. *AGT Editor. México*. 459 pp.
- Roden, G.I., 1964. Oceanographic aspects of de Gulf of California, p. 30-58. En: Tj.H. Van Andel and G.G. Shor, Jr. (Eds.). *Marine Geology of the Gulf of California: a symposium. Am. Ass. Petr. Geol., Memoir 3*. 530 p.
- Santamaría-del-Ángel, 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.
- Santamaría-del-Ángel, E., S. Álvarez-Borrego, R. Millán-Núñez y F.E. Müller-Karger. 1999. Sobre el efecto débil de las surgencias de verano en la biomasa fitoplanctónica del Golfo de California. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.*, **49**:207-212.
- Simpson, J. H. y D. G. Bowers. 1981. Models of stratification and frontal movement. *Deep-Sea Research*. **28**:727-738.
- 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.
- Strickland, J. D and T. R. Parsons. 1972. A practical handbook of seawater analysis. *Bulletin Fisheries Research Board of Canada*. 2a.ed.167 p.

- Torres-Delgado, E.V., 2004. Distribución de nutrientes inorgánicos bajo condiciones de invierno en la Región de las Grandes Islas del Golfo de California. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas - UABC, Ensenada, México. 62 pp.
- 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. (1999) The relative influences of nitrogen and phosphorus on oceanic primary production. *Nature*. **400**:525–531.
- Tyrrell, T., Law, C.S., 1997. Low nitrate:phosphate ratios in the global ocean. *Nature*. **387**: 793–796.
- Tyrrell, T. y M. I. Lucas. 2002. Geochemical evidence of denitrification in the Benguela upwelling system. *Continental Shelf Research*. **22**:2497-2511.
- Valdéz-Holguín, J.E. y Lara-Lara, J.R. 1987. Productividad primaria en el Golfo de California. Efectos del evento el niño 1982-1983. *Ciencias Marinas*. **13**(2): 34-50.
- White, A.E., Prah, F.G., Letelier, R.M., Popp, B.N., 2007. Summer surface waters in the Gulf of California: prime habitat for biological N₂ fixation. *Global Biogeochemical Cycles*. **21** (GB2017).
- Wyrtki, K. 1966. Oceanography of the eastern equatorial Pacific Ocean. *Oceanogr. Mar. Biol.* **4**:33-68.
- Wyrtki, K. 1967. Circulation and water masses in the eastern equatorial Pacific Ocean. *Journal Oceanology and Limnology*. **1**(2):117-147.
- Zeitschel, B. 1969. Primary productivity in the Gulf of California. *Marine Biology* **3** (3): 201-318.