

00344
9

General de Bibliotecas de la
... en formato electrónico e impreso el
... de mi trabajo ...
Nohemí Claudia
Saavedra Rojas
21/abril/2003
~~21/abril/2003~~ ~~Saavedra Rojas~~



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE CIENCIAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

*Estructura hidrográfica, nutrientes y pigmentos fotosintéticos
de la Bahía de La Paz, Golfo de California, en febrero y
noviembre del 2000*

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRA EN CIENCIAS
(BIOLOGÍA DE SISTEMAS Y RECURSOS ACUÁTICOS)**

P R E S E N T A

BIÓL. NOHEMÍ CLAUDIA SAAVEDRA ROJAS

**DIRECTORA DE TESIS: DRA. MARÍA ADELA MONREAL GÓMEZ
DIRECTOR DE TESIS: DR. MARTÍN MERINO IBARRA**

MÉXICO, D.F.

2003

**TESIS CON
TRAZA DE ORIGEN**

A



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Adela Monreal, por su paciente y acertada dirección y por darme una nueva oportunidad para volver a mi amado mar, cuando más distante parecía de él.

Al Dr. Martín Merino, por su dirección, por las facilidades que me otorgó en su laboratorio y cubículo, pero sobre todo por las charlas, que aunque breves, me mostraron que la seguridad es lo más importante.

Al Dr. Adolfo Molina, por formar parte del comité tutorial, sus invaluable comentarios y por la confianza que depositó en mí al haberme invitado a trabajar en la maravillosa Bahía de La Paz .

A los miembros del jurado, por las revisiones al trabajo y sus valiosas sugerencias:

Dr. David Salas de León

Dra. Gloria Vilaclara Fatjó

Al Dr. Juan Carlos Herguera García, mi agradecimiento profundo por su interés en mi trabajo demostrado por las horas de invaluable discusión, ideas, apoyo y gestión ante CONACYT. Sin embargo, lo más preciado han sido su amistad y el trato cordial.

A la Dra. Ma. Luisa Machaín Castillo, Secretaria Académica del ICMYL, por permitirme formar parte del personal científico en algunas de sus campañas oceanográficas y con ello obtener parte de las muestras para esta investigación.

Mi más profundo reconocimiento al Hidrobiól. Sergio Castillo por los análisis de nutrientes de las muestras de las campañas PACMEX II y PACMEX IV y por su presteza para colaborar en esta tesis. Gracias.

A Aimeé Rodríguez por ser la amiga que había buscado siempre, por sus palabras de aliento en los momentos cruciales de este proyecto, por todos los momentos e historias similares compartidos; por su independencia y las lecciones que aún sin saberlo me obsequió.

A mis amigos del laboratorio de Biogeoquímica Acuática del ICMYL: Sergio Castillo, la certeza de saberle cerca, siempre fue como llegar segura a puerto. Todos los momentos que nos han permitido estar cerca son un tesoro. Paty Gómez, por tolerar la ocupación progresiva del laboratorio, gracias. Luz López, mi agradecimiento por compartir el espacio en donde este sueño fue tornándose realidad.

A Javier Aldeco, por el manejo de algunos datos de clorofila en Fortran y por los asaltos que de vez en vez, dí a su biblioteca personal.

A los miembros de la tripulación de el B/O "El Puma", quienes en cada viaje, me han hecho sentir entre grandes amigos y con ello desear volver al "azul". Gracias por su valiosa colaboración durante las campañas PACMEX II y IV (y por muchas otras). Especialmente, mi reconocimiento al Cap. Héctor Gutiérrez Granja, Cap. Adrián Cantú, con quien tengo una vieja deuda, a Federico "Perico" Zamora, al Ing. Manuel Suárez, a Abel Méndiz, Laurencio Triana, y por supuesto sin olvidar al increíble Ernesto Soriano.

La parte final de la elaboración de esta tesis recibió el apoyo económico del CONACYT, a través del proyecto G35229, coordinado por el Dr. Juan Carlos Herguera García adscrito a CICESE.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

B

**... Padre mar, ya sabemos
cómo te llamas, todas
las gaviotas reparten
tu nombre en las arenas:
ahora, pórtate bien,
no sacudas tus crines,
no amenesces a nadie,
no rompas contra el cielo
tu bella dentadura,
déjate por un rato
de gloriosas historias,
danos a cada hombre,
a cada mujer y a cada niño,
un pez grande o pequeño
cada día...**

(Oda al mar , P. Neruda)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A mi mamá, Esther Rojas Murphy:

Me enseñaste que en la vida no perdemos, sólo crecemos. Tu confianza y aliento fueron lo más importante, cuando el tiempo transcurrió y las circunstancias fueron apabullantes. Parte de este nuevo logro lo debo a tu ejemplo y fortaleza.

A mi hermana, Luz Araceli Saavedra Rojas:

A través de los años he comprendido que los medios de cada persona para llegar a un mismo fin son diferentes. Admiro tu paciencia, tu diplomacia y la serenidad con las que afrontaste enormes problemas y responsabilidades. Es una bendición tenerte como hermana y amiga.

A Rafa:

Quien diga que el sueño y la sonrisa de un bebé no son las cosas más puras y maravillosas del mundo, es que no te conoce. Gracias por las horas de inesperada Mimimanía.

A Sergio:

Este trabajo también es un logro tuyo pues lo viviste desde el inicio, primero como colega, después como un maravilloso amigo y hoy como el compañero de mi vida. Nunca olvides que significas el amor y la esperanza que tengo en el mañana. Te amo.

A mi familia:

El cariño que me han demostrado en incontables ocasiones ha sido uno de los motores para continuar mi camino. Gracias, siempre.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	4
2. ÁREA DE ESTUDIO	6
3. MATERIAL Y MÉTODOS	9
3. 1. Estrategias de muestreo	9
3. 2. Datos de CTD: Masas de agua, frecuencia de Brunt-Väisälä (N^2) parámetro de estratificación (Φ) y circulación	9
3. 3. Determinaciones analíticas	12
3. 3.1. Determinación de oxígeno disuelto por el método Winkler	12
3. 3. 2. Determinación de nutrientes por métodos colorimétricos	13
3.3. 3. Determinación de pigmentos fotosintéticos por método espectrofotométrico	15
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
4. 1. Corrección de lecturas de oxígeno disuelto y salinidad	18
4. 2. Distribución vertical de temperatura, salinidad y $\sigma-t$	21
4. 3. Masas de agua	26
4. 4. Distribución vertical de las masas de agua	29
4. 5. Distribución vertical de la frecuencia de Brunt-Väisälä (N^2) y distribución horizontal del parámetro de estratificación (Φ)	32
4. 6. Topografía de las isotermas de 20 y 24 °C	37
4. 7. Distribución vertical de nitrato y fosfatos	43
4. 8. Distribución vertical de clorofila a	56
4. 9. Distribución horizontal de clorofila a : integrada y media vertical	63
5. CONCLUSIONES	73
6. LITERATURA CITADA	75

RESUMEN

Se efectuó un estudio de la estructura hidrográfica y su relación con la distribución de nutrientes (nitrato y fosfatos) y pigmentos fotosintéticos (clorofila *a* y feopigmentos) en la Bahía de La Paz, Golfo de California, México, a partir de muestras obtenidas en febrero y noviembre del 2000. El análisis de la distribución de masas de agua reveló la presencia de Agua del Golfo de California (AGC) y Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) en la bahía. En estaciones ubicadas en la región noreste de la bahía (Boca Grande), se registró, además, Agua Intermedia del Pacífico (AIP). En noviembre el AGC se observó en una capa de mayor espesor. En ambos muestreos fue evidente la presencia de una termoclina que fue más pronunciada y profunda en noviembre. La topografía de las isotermas de 20 y 24° C reveló circulación anticiclónica cerca de Bahía Coyote (oeste de la bahía) y circulación ciclónica en Boca Grande, tanto en febrero como en noviembre. La estratificación (ϕ) dentro de la Bahía de La Paz fue de 2 a 3 veces mayor que en el norte y centro del Golfo de California. La elevada estratificación causó disminución del oxígeno por debajo de la capa de mezcla en noviembre, lo que probablemente produjo denitrificación de acuerdo con la reducción de la razón $\text{NO}_3\text{-PO}_4$ (9:1). Un posible efecto adicional de la estratificación fue la limitación del flujo de nutrientes hacia la capa fótica, lo que podría explicar las bajas concentraciones de clorofila *a* (0.03 a 0.65 mg m^{-3}). Sin embargo, los valores (0.45-30.85 mg m^{-2}) de clorofila *a* integrada (0-100 m) estuvieron dentro del rango reportado para la boca del Golfo de California. Con base en los patrones de distribución vertical de la clorofila *a* se dividió a la bahía en tres zonas: zona de mezcla (región sur), zona de máximo asociado a la termoclina (región centro) y zona de máximo somero (región norte). Las distribuciones horizontales de clorofila *a* y de la razón feopigmentos: clorofila *a* mostraron que las zonas someras de la bahía, donde la mezcla es probablemente mayor fueron las que mayor biomasa viva presentaron, mientras que las zonas con mayor estratificación tuvieron mayor concentración de feopigmentos. Los procesos determinantes de la estructura vertical de la columna de agua parecen controlar a su vez los procesos de fertilización y productividad en la Bahía de La Paz. La mezcla promovió flujos de nutrientes desde la capa profunda y posiblemente un incremento de la biomasa fitoplanctónica. Las condiciones de estratificación, por el contrario, retardaron o inhibieron el flujo de nutrientes nuevos, por lo que la biomasa fitoplanctónica fue baja.

1. INTRODUCCIÓN

La distribución del fitoplancton en el océano se encuentra determinada en buena medida por procesos físicos que afectan el abastecimiento de nutrientes inorgánicos de la capa profunda a la capa fótica (Hayward y McGowan, 1985; Comeau *et al.*, 1995; Yacobi *et al.*, 1995). Los cambios interanuales y a largo plazo en la producción primaria y secundaria, en amplias áreas del océano se encuentran relacionados con eventos de efectos globales como El Niño, La Niña y la circulación termohalina (Turk *et al.*, 2001). A pequeña escala, las variaciones de la biomasa planctónica están estrechamente ligadas con cambios en las distribuciones verticales de nutrientes y con la estructura física de la columna de agua. Las respuestas biológicas de un ecosistema a las variaciones en el ambiente físico son un aspecto importante de la estructura del ecosistema, puesto que las modificaciones en su productividad primaria son perturbaciones potenciales que pueden afectar la proporción de especies y la energía disponible para los niveles tróficos superiores (Hayward y McGowan, 1985).

El fitoplancton tiene una distribución altamente heterogénea, tanto vertical como horizontalmente. Las agregaciones verticales más sobresalientes de los productores primarios son el máximo profundo de clorofila (DCM, por sus siglas en inglés), los agregados en la superficie de los sedimentos y de la superficie del agua, donde más del 90 % del total de la biomasa se encuentra concentrada en una capa relativamente delgada. Los DCM han sido observados tanto en lagos como en el océano (Cullen, 1982; Agustí y Duarte, 1999) y su grosor varía desde unos cuantos centímetros a algunas decenas de metros, dependiendo del grado de mezcla de la columna de agua (Coon *et al.*, 1987).

La heterogénea distribución vertical del fitoplancton usualmente está asociada a condiciones de escasa mezcla en la columna de agua, misma que obedece a la existencia de un gradiente de densidad o bien a que la energía cinética turbulenta (TKE, por sus siglas en inglés) es pequeña (Klausmeier y Litchman, 2001). Sin embargo, la condición de escasa mezcla no es suficiente por sí misma, para producir patrones verticales de distribución del fitoplancton, sino que también los ambientes contrastantes de luz y nutrientes juegan un papel importante (Cullen, 1982; Kirk, 1983).

Diferentes taxa de fitoplancton pueden formar distribuciones verticales heterogéneas. Existen especies que pueden regular su posición en la columna de agua: por natación como los flagelados; al ajustar su flotabilidad como las cianobacterias, o bien regulando su velocidad de sedimentación en aguas ricas en nutrientes, como lo hacen las diatomeas (Muggli *et al.*, 1996). A pesar de estas estrategias del fitoplancton para permanecer en condiciones más propicias para realizar la fotosíntesis son los procesos físicos los que determinan en buena medida su distribución.

Diversos procesos físicos como la advección, surgencias, mezcla turbulenta, ondas internas y giros han sido estudiados en diferentes aspectos: por su origen y estructura física (Huppert y Bryan, 1976; Emilsson y Alatorre, 1997; Monreal-Gómez *et al.*, 2001), por la distribución de comunidades fitoplanctónicas y de nutrientes en estos ambientes (Smith y Baker, 1985; Yilmaz y Tugrul, 1998) o bien por su efecto sobre la productividad primaria (Falkowski *et al.*, 1991; Dower *et al.*, 1992; McGillicuddy y Robinson, 1997). Otros sistemas de importancia son aquellos en los que la estratificación condiciona los procesos que se llevan a cabo. Los sistemas altamente estratificados son mucho menos productivos que aquellos con una mezcla eficiente (Menesguen y Hoch, 1997). Las características tropicales de México permiten que los sistemas estratificados se presenten de manera común, aunque prácticamente no existen trabajos que los describan (Gaxiola-Castro *et*

al., 1995) y menos aún que consideren la relación entre el ambiente físico y las respuestas biológicas.

En el Golfo de California se han realizado diversos estudios en los que se señaló que la productividad fitoplanctónica era elevada, particularmente en las regiones norte y centro, donde la mezcla por mareas y vientos mantenían elevada la concentración de nutrientes en la capa fótica (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Gaxiola-Castro et al., 1995). Algunos de esos trabajos también mostraron la existencia de un patrón general en la distribución del fitoplancton, observándose que tanto la biomasa como la riqueza de especies disminuyen hacia la boca del golfo (Round, 1967; Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991).

La región sur del Golfo de California es particularmente interesante, pues en ella confluyen diversas masas de agua que generan frentes y remolinos (Emilsson y Alatorre, 1997; Lavín et al., 1997). Estas condiciones pueden afectar la biomasa y productividad del fitoplancton, aunque desafortunadamente son temas escasamente estudiados en esta región.

Las zonas costeras del sur del Golfo de California no han sido estudiadas con profundidad en aspectos tales como estructura hidrográfica y circulación, biomasa fitoplanctónica, productividad primaria y ciclos biogeoquímicos. Estos campos de investigación son de gran relevancia para comprender el funcionamiento de un sistema acuático y sus variaciones en tiempo y espacio. La Bahía de La Paz es un ejemplo de los numerosos sistemas costeros que han recibido poca atención en dichos temas.

1. 1. Antecedentes

En la Bahía de La Paz se han realizado diversos trabajos como listados florísticos y planctónicos, pesquerías, mediciones de corrientes y mareas, circulación y estudios geológicos, entre otros (e.g. Amador, 1978; Signoret y Santoyo, 1980; Álvarez *et al.*, 1997; Jiménez-Illescas, 1996; Monreal-Gómez *et al.*, 2001; Molina-Cruz *et al.* 2002). Sin embargo, la mayoría se ha enfocado a áreas muy pequeñas o bien han sido restringidos a la Ensenada de La Paz. En algunos casos, los resultados se han generalizado a la totalidad de la bahía, sin considerar las variaciones que podrían derivarse de los procesos físicos que en ella operan, por lo que la Bahía de La Paz ha sido considerada como altamente productiva (e.g. González y Saldierna, 1997).

Los trabajos relacionados con la circulación dentro de la Bahía de La Paz también son escasos (e.g. Jiménez-Illescas 1996; Jiménez-Illescas *et al.*, 1997; Monreal-Gómez *et al.*, 2001) y hasta la fecha no existen estudios que integren información del ambiente físico y las respuestas químicas y/o biológicas dentro de la bahía.

A pesar de que se han llevado a cabo estudios en diversas disciplinas, existe escasez de información relacionada con la distribución de pigmentos fotosintéticos y de nutrientes y, aún más, de la relación que estos parámetros guardan con la estructura hidrográfica en la Bahía de La Paz.

Dentro de la literatura sobre la Bahía de La Paz sobresalen cuatro trabajos que fueron de gran importancia para plantear los objetivos de esta investigación: Nava-Sánchez (1997) reportó la existencia de un umbral batimétrico a 250 m de profundidad en la región de Boca Grande (región noreste de la Bahía de La Paz), lo que parece aislar parcialmente a la bahía del Golfo de California. Monreal-Gómez *et al.*, (2001) y Molina-Cruz *et al.* (2002) propusieron la existencia de una

marcada termoclina, que impide una ventilación eficiente promoviendo condiciones de anoxia en la capa profunda de Cuenca Alfonso (región norte de la Bahía de La Paz). Estos autores, evidenciaron también la existencia de un giro ciclónico en el noroeste de la bahía, en junio de 1998. Por otra parte, Pérez-Cruz (2000) estimó las tasas de sedimentación de la Bahía de La Paz, proponiendo que los bajos valores encontrados (0.3 mm año^{-1}) suponen una productividad primaria baja.

Estos estudios sugieren, por un lado, que dentro de la Bahía de La Paz es probable la existencia de características hidrológicas y biológicas diferentes del Golfo de California y, por otro, que debido a la existencia de una termoclina bien desarrollada de carácter permanente, es factible que la biomasa fitoplanctónica sea baja, debido a un flujo limitado de nutrientes hacia la capa fótica.

En este contexto el presente trabajo se planteó los siguientes objetivos:

- 1) Describir la estructura hidrológica e inferir la circulación en la bahía de La Paz en febrero y noviembre del 2000.
- 2) Describir y explicar la distribución de nutrientes y pigmentos fotosintéticos en las mismas fechas.
- 3) Discutir las posibles relaciones entre estos aspectos.

Para ello se analizaron las distribuciones verticales y horizontales de la salinidad, la temperatura, la densidad, el oxígeno disuelto, la concentración de nutrientes y de pigmentos fotosintéticos (clorofila *a* y feopigmentos), en dos meses del año, buscando identificar: a) la termoclina y las masas de agua; b) el tipo de circulación que se presenta en la bahía; y c) los procesos que posiblemente determinan la distribución de nutrientes y pigmentos fotosintéticos.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de La Paz está localizada en la costa este de la Península de Baja California, aproximadamente a 180 km al norte de la boca del Golfo de California, entre los 24.15 ° N; 110.30° W y los 24.97° N ; 110.75° W (Fig. 2.1). Es una de las bahías más grandes de México pues tiene una superficie de aproximadamente 2635 km². Es de forma ovalada y su eje menor mide 33 km, mientras que el eje mayor tiene 81 km y se orienta en dirección noroeste-sureste (Fig. 2.1).

La bahía está limitada hacia el norte por la Isla San José y hacia el este por las islas Roca Partida y Espíritu Santo. Su comunicación con el Golfo de California se da mediante dos bocas: en el noreste a través de Boca Grande, que abarca de Roca Partida a Punta Mechudo, y en el sureste a través del Canal de San Lorenzo, caracterizado por su poca profundidad (Jiménez-Illescas, 1996; Jiménez-Illescas *et al.*, 1997).

La porción norte de la Bahía de la Paz es la más profunda (alrededor de 400 m) y se encuentra parcialmente aislada del Golfo de California por un umbral batimétrico a una profundidad aproximada de 250 m y que atraviesa Boca Grande (Nava-Sánchez, 1997). La profundidad decrece gradualmente hacia el sur de la bahía, por lo que la mayor parte del intercambio con el Golfo de California se lleva a cabo a través de Boca Grande (Monreal-Gómez *et al.*, 2001).

La bahía presenta un régimen de mareas de tipo mixto semidiurno con una amplitud mayor a 1 m durante mareas vivas (Jiménez-Illescas, 1996). Las corrientes están determinadas principalmente por la marea y suelen ser intensas en las regiones someras del sur de la bahía y en el Canal de San Lorenzo. Durante el flujo y el reflujó de la marea, se han registrado velocidades máximas cercanas

a 1 m s^{-1} en el canal de San Lorenzo y en el canal de la Ensenada de La Paz (Obeso-Nieblas e Illescas-Jiménez, 1989).

Debido a que el campo de vientos está principalmente determinado por una desviación del Centro de Alta Presión del Pacífico y del Centro de Baja Presión del Desierto de Sonora (Roden, 1972), la circulación dentro de la bahía está influenciada por vientos del sureste durante el verano (intensidad media de 2 m s^{-1}) y por vientos del noroeste en invierno (intensidad media de 4 m s^{-1} ; Jiménez-Illescas *et al.*, 1997).

El clima predominante en torno a la bahía es semidesértico con una humedad relativa promedio del 50% durante el día (Jiménez-Illescas, 1996). Existe una temporada bien diferenciada de lluvias, de julio a octubre (Salinas *et al.*, 1990), aunque éstas son escasas (43 a 60 mm mes^{-1}). La evaporación (300 mm año^{-1}) excede a la precipitación (180 mm año^{-1}) y la descarga de ríos es nula, por lo que la salinidad superficial de la Bahía de La Paz se incrementa en forma notable (Jiménez-Illescas *et al.*, 1997) respecto a la del Golfo de California.

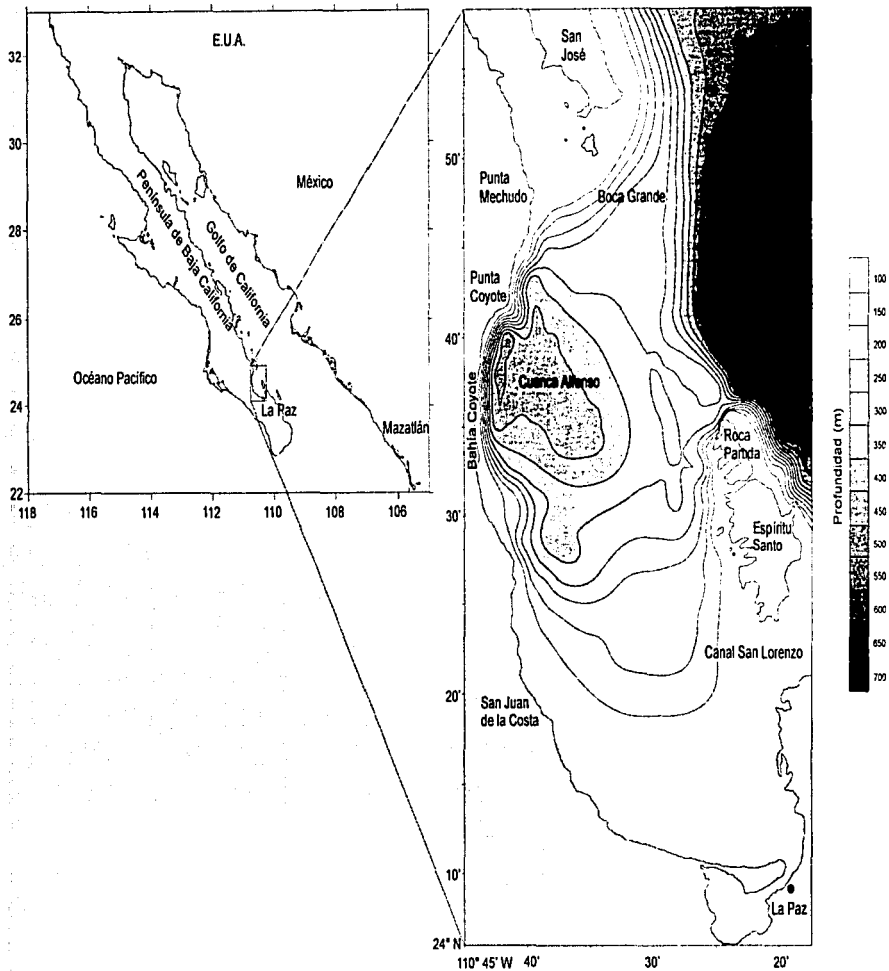


Figura 2.1. Ubicación y batimetría de la Bahía de La Paz, Golfo de California.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3. 1. Estrategias de muestreo

Durante las campañas oceanográficas PACMEX II y IV (febrero y noviembre de 2000), a bordo del B/O "El Puma" de la Universidad Nacional Autónoma de México, se obtuvieron registros de parámetros hidrográficos (conductividad, temperatura, presión y oxígeno disuelto) mediante un CTD Neil Brown en una red de aproximadamente 42 estaciones oceanográficas, cubriendo la totalidad de la bahía de La Paz (Fig. 3.1).

En las estaciones hidrográficas seleccionadas se tomaron muestras de agua empleando botellas Niskin y una rosette General Oceanics, para la determinación analítica de oxígeno disuelto, nutrientes, salinidad y pigmentos fotosintéticos. Las profundidades a las que se tomaron las muestras fueron 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150 y 200 m en febrero de 2000, mientras que en noviembre de 2000 fueron solamente a tres profundidades: 10 m, a la profundidad en que se encontró la termoclina y 10 m por debajo de dicha termoclina.

3. 2. Datos de CTD: Masas de agua, frecuencia de Brunt-Väisälä (N^2), parámetro de estratificación (Φ) y circulación

Los valores de salinidad y oxígeno obtenidos con el CTD fueron corregidos empleando sus determinaciones analíticas (salinómetro de inducción y método Winkler, respectivamente).

La salinidad y densidad potencial (σ_θ) se calcularon mediante los algoritmos de UNESCO (Fofonoff y Millard, 1983).

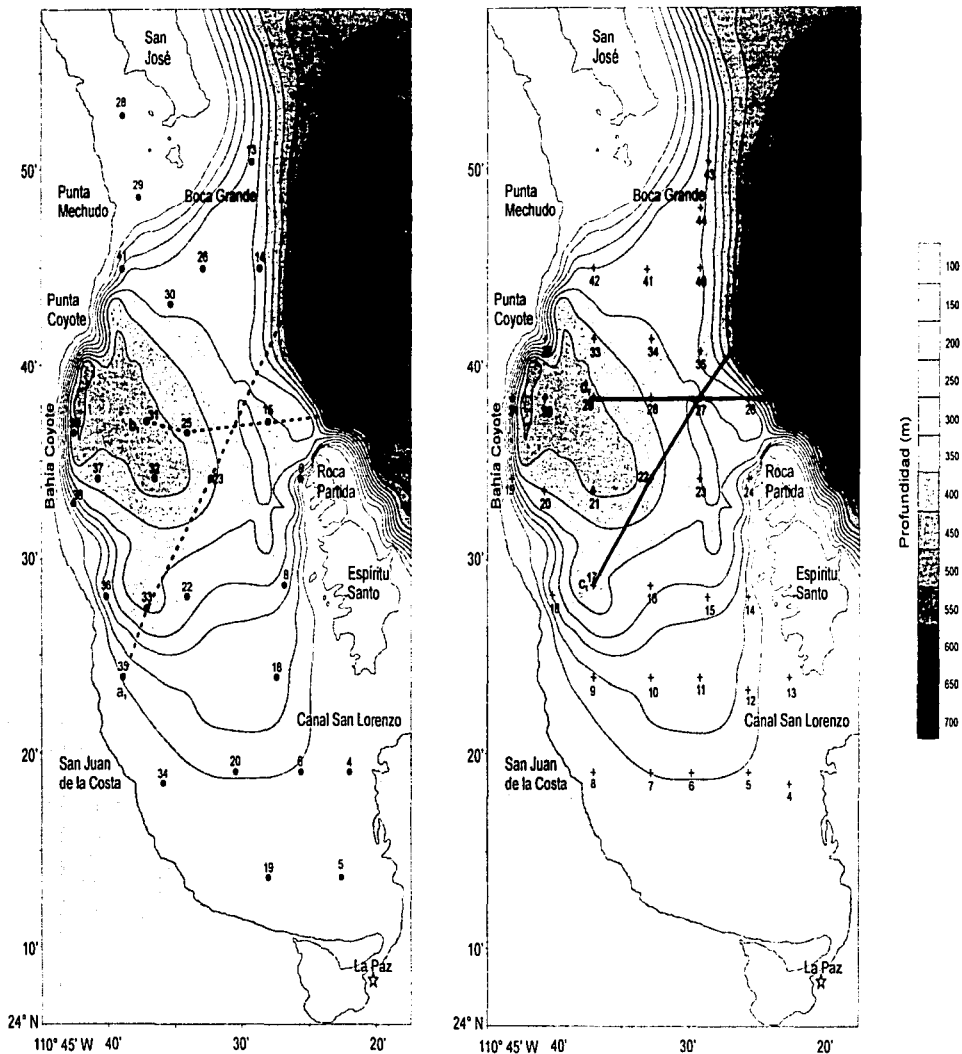


Figura 3.1. Batimetría de la Bahía de La Paz y ubicación de las estaciones de muestreo y transectos de las campañas oceanográficas a) PACMEX-II (febrero del 2000) y b) PACMEX-IV (noviembre del 2000).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La hidrografía regional se analizó mediante la distribución de temperatura, salinidad y densidad, la circulación se infirió por la topografía de las isotermas de los 20 y 24°C, seleccionadas de acuerdo a los criterios que se señalan en la sección 4. 4.

La identificación de masas de agua se logró mediante diagramas T-S y la clasificación propuesta por Torres-Orozco (1993). La distribución vertical de la salinidad y la temperatura se analizó en dos transectos para cada campaña oceanográfica (Figs. 3.1 a y b) y con estos parámetros se infirió la distribución vertical de las masas de agua. Con los transectos elegidos se cubrieron condiciones hidrográficas dentro y fuera de la bahía, así como el área más profunda de la bahía de La Paz (zona norte).

La frecuencia de Brunt-Väisälä (N^2), o frecuencia de estabilidad tiene un máximo en la termoclina, que en regiones oceánicas coincide con el máximo del gradiente de densidad. En este estudio se empleó como descriptor del máximo gradiente vertical de densidad y de la profundidad de la termoclina. La frecuencia de Brunt-Väisälä está dada por:

$$N^2(z) = -\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \quad (\text{III. 1})$$

o bien:

$$N^2 = gE \quad (\text{III. 2})$$

donde:

g = aceleración debida a la gravedad

ρ = densidad del agua

z = profundidad

E = estabilidad de la columna de agua

El parámetro de estratificación Φ (Simpson *et al.*, 1977) se calculó para evaluar la mezcla en la capa superior de 100 m, empleando las ecuaciones:

$$\Phi = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 (\rho - \bar{\rho}) g z dz \quad (\text{III. 3})$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \rho dz \quad (\text{III. 4})$$

donde:

ρ = densidad en cada microcapa considerada

$\bar{\rho}$ = densidad promedio en la capa

g = aceleración debida a la gravedad

h = profundidad de la capa considerada (100m)

z = profundidad en cada microcapa considerada

3. 3. Determinaciones analíticas

3. 3. 1. Determinación de oxígeno disuelto por el método Winkler

El procedimiento para la obtención y preservación de las muestras, así como la determinación de oxígeno disuelto en agua de mar, siguieron el método de Winkler, así como las recomendaciones de Strickland y Parsons (1972) y de Grasshoff (1983) para submuestras de volúmenes pequeños. Los reactivos empleados para estas determinaciones se prepararon de acuerdo a Strickland y Parsons (1972) usando en todos los casos sales de grado analítico.

Las muestras para la determinación de oxígeno disuelto en agua de mar siempre tuvieron prioridad sobre las demás, ya que es crucial que se fijen inmediatamente, puesto que la concentración de oxígeno se modifica con el intercambio gaseoso con la atmósfera.

Finalmente, la concentración de oxígeno disuelto se calculó usando las ecuaciones de Strickland y Parsons (1972):

$$mg-at O_2 l^{-1} = 0.1006 \times f \times V \quad (III.5)$$

$$O_2 (ml^{-1}) = 11.2 \times mg-at O_2 l^{-1} \quad (III.6)$$

donde:

f = factor del tiosulfato, que varía según la concentración.

V = volumen de tiosulfato gastado (ml)

3.3.2. Determinación de nutrientes por métodos colorimétricos

Las muestras para la determinación de nutrientes fueron filtradas a presión, a través de filtros *Millipore* HAWP de nitrocelulosa de 0.45 y 0.22 μ de tamaño de poro, puestos en serie, con la finalidad de eliminar totalmente el fitoplancton, las bacterias y la materia particulada que pudieran interferir en la determinación de los nutrientes. Una vez filtradas, las muestras se preservaron con 1 gota de cloroformo y se mantuvieron en congelación (-10 °C) hasta el momento de su análisis (Kirkwood, 1992), mismo que se realizó antes de 15 días.

Los nutrientes (nitratos y fosfatos) fueron determinados mediante las técnicas estandarizadas para agua de mar, utilizando un autoanalyzer de flujo segmentado Skalar San plus System, que cuenta con canales para la determinación simultánea de N-NO₂, N-NO₃, P-PO₄ y Si-SiO₄.

Los nitratos se determinan mediante la reducción de nitratos a nitritos, empleando el método modificado de Treguer y Le Corre (1974), usando como agente reductor una columna empacada con limaduras de cadmio recubiertas de cobre, acondicionada con cloruro de amonio.

El principio químico para la determinación de fosfatos se fundamenta en la formación del ácido 12-molibdofosfórico y su reducción a fosfomolibdeno azul con ácido ascórbico, sustituyendo la acción catalítica del antimonio por calentamiento a 70 °C.

Con los datos de NO_3 y PO_4 , se calculó el déficit de nitrato (ΔNO_3), de acuerdo con Broecker y Peng (1982), empleando la ecuación:

$$\Delta NO_3 = NO_3 \text{ in situ} - PO_4 \text{ in situ} \times 15 \quad (\text{III. 7})$$

donde:

$NO_3 \text{ in situ}$ = concentración de nitrato in situ

$PO_4 \text{ in situ}$ = concentración de fosfatos in situ

15 = razón estequiométrica de N:P, propuesta por Broecker y Peng (1982) para el Pacífico.

En este mismo contexto, una manera rápida de calcular valores esperados de nitrato (NO_3_{esperado}) es a partir de la concentración *in situ* de PO_4 multiplicados por 16 (Libes, 1992).

3.3.3. Determinación de pigmentos fotosintéticos por método espectrofotométrico

Los pigmentos fotosintéticos como clorofilas, carotenoides y biliproteínas, poseen espectros característicos de absorción de luz que dependen de su estructura molecular y propiedades químicas. La cuantificación de dichos pigmentos se basa en la lectura de la densidad óptica o absorbancia, a las longitudes de onda en las cuales la absorción de luz es máxima para cada pigmento. Estas lecturas se obtienen por medio de un espectrofotómetro que opere en longitudes de onda que van desde el ultravioleta (200 nm) hasta el infrarrojo (760 nm), amplitud espectral en la que absorben la mayoría de los pigmentos (Barreiro y Signoret, 1999).

Las muestras de agua para la cuantificación de biomasa a través de la concentración de pigmentos fotosintéticos se filtraron a través de filtros de nitrocelulosa *Millipore* HAWP de 0.45 μ de apertura de poro y 47 mm de diámetro, montados en un sistema de filtración *Millipore*, a una presión de vacío de 0.5 bar, según lo sugerido por Strickland y Parsons (1972). Con este tamaño de poro se aseguró la colecta del micro y nanofitoplancton.

El volumen de agua filtrado para este análisis siguió las recomendaciones de Merino (com. pers.) y de Falkowski y Raven (1997) para aguas oceánicas con concentraciones de clorofila *a* < 1.0 mg m⁻³. En el caso de la campaña PACMEX-II, el volumen de agua filtrado fue de alrededor de 2 l, mientras que en la campaña PACMEX-IV fue de 4 l.

Mientras se filtraban las muestras se trabajó a baja intensidad de luz con la finalidad de evitar la degradación de los pigmentos. Inmediatamente después de filtrar se procedió a extraer los pigmentos fotosintéticos con 10 ml de acetona al 90%, ya que en el fitoplancton marino predominan grupos con clorofilas *a*, *c1*, *c2* y carotenoides, que son mejor extraídos en este solvente (Rowan, 1989). En la campaña oceanográfica PACMEX-II no fue posible realizar la extracción a bordo

del barco, por lo que las muestras fueron conservadas en seco en papel aluminio y en congelación durante casi 2 semanas.

El tiempo de extracción de los pigmentos fue de 12 h en oscuridad y a 4 °C, de acuerdo con Strickland y Parsons (1972). Pasado ese tiempo, las muestras fueron centrifugadas durante 15 minutos a 4500 r.p.m para leer el sobrenadante en un espectrofotómetro Ely-2000 (Elyptica Instruments) con una resolución espectral de 0.5 nm, ancho de banda de 3.5 nm y precisión en color de 1 nm.

Se realizó una lectura de corrección a 750 nm, que es la longitud de onda a la que no absorben luz los pigmentos fotosintéticos. Esta lectura se sustrae a cada una de las lecturas realizadas en las longitudes de onda seleccionadas. En este trabajo se empleó el método tricromático, que permite determinar clorofila a, b, c1 y c2 y se aplicaron las ecuaciones de Jeffrey y Humphrey (1975):

$$Cl\ a\ (mg\ m^{-3}) = \frac{11.8A_{664} - 1.54A_{647} - 0.08A_{630} \times v}{V \times l} \quad (III. 8)$$

$$Cl\ b\ (mg\ m^{-3}) = \frac{-5.43A_{664} + 21.03A_{647} - 2.66A_{630} \times v}{V \times l} \quad (III. 9)$$

$$Cl\ c1\ y\ c2\ (mg\ m^{-3}) = \frac{-1.67A_{664} - 7.60A_{647} + 24.52A_{630} \times v}{V \times l} \quad (III.10)$$

donde:

A = absorbancia a la longitud de onda indicada como subíndice

v = volumen del solvente (ml)

V = volumen de agua filtrado (l)

l = paso óptico de la celda del espectrofotómetro (cm)

Para determinar la concentración de feopigmentos se hicieron lecturas de absorbancia a 750 y 665 nm antes y después de acidificar la muestra con HCl 0.3 M. Se cuidó que el pH final de las muestras fuera entre 2.6 y 2.8, de acuerdo a lo sugerido por Barreiro y Signoret (1999). En el cálculo final de la concentración de feopigmentos, se empleó la ecuación de Lorenzen (1967):

$$\text{Feopigmentos (mg m}^{-3}\text{)} = \frac{26.7(1.7A_{665a} - A_{665na}) \times v}{V \times l} \quad (\text{III.11})$$

donde:

A_{665a} = absorbancia a 665 nm después de acidificar

A_{665na} = absorbancia a 665 nm sin acidificar

v = volumen del solvente (ml)

V = volumen de agua filtrado (l)

l = paso del haz de luz que atraviesa la celda del espectrofotómetro (cm)

El límite de detección de ésta técnica es de 0.02 mg m⁻³, cuando los volúmenes filtrados son cercanos a 10 l. En los casos en los que éstos sean menores, la sensibilidad decrece aunque no ha sido cuantificada su reducción (Strickland y Parsons, 1972).

Los datos de pigmentos fueron empleados para conocer las distribuciones vertical y horizontal y su relación con diversos parámetros.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. 1. Corrección de lecturas de oxígeno disuelto y salinidad

Debido a que los sensores del CTD derivan como consecuencia de su uso continuo, es necesario realizar medidas analíticas que permitan calibrar los valores que este instrumento proporciona.

Para corregir los valores de oxígeno obtenido en forma continua mediante el CTD se graficaron contra los resultados de los análisis por método Winkler. En ambos cruceros, se observó una relación aproximadamente lineal (Fig. 4.1), descrita por las ecuaciones siguientes y con un grado significativo de correlación. Ésto permitió calibrar todos los valores del CTD a partir de los análisis químicos

PACMEX-II (febrero del 2000)

$$O_2 \text{ corregido} = 2.1687 \times O_2 \text{ CTD} + 0.6467$$

($r^2 = 0.8371$; $P < 0.05$; $n = 1500$)

PACMEX-IV (noviembre del 2000)

$$O_2 \text{ corregido} = 2.875 \times O_2 \text{ CTD} - 0.1874$$

($r^2 = 0.9012$; $P < 0.05$; $n = 950$)

De manera análoga al procedimiento seguido para el oxígeno disuelto, los valores de conductividad registrados mediante el CTD y que se transformaron a valores de salinidad, fueron graficados contra los resultados obtenidos mediante un salinómetro de inducción. También en este caso se observó una relación de tipo lineal con los siguientes parámetros de la ecuación:

PACMEX-II (febrero del 2000)

$$S_{\text{corregida}} = 1.0156 \times S_{\text{observada}} - 0.4687$$

PACMEX-IV (noviembre del 2000)

$$S_{\text{corregida}} = 1.06 \times S_{\text{observada}} - 0.5487$$

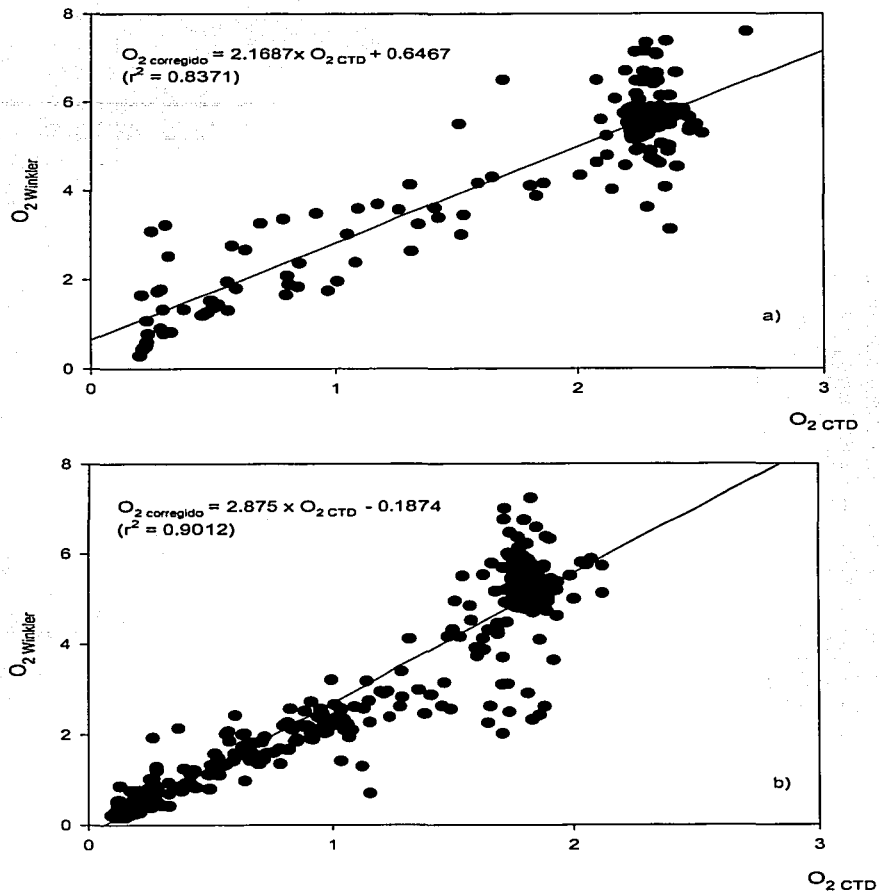


Figura 4. 1. Relación entre el oxígeno disuelto determinado por método Winkler (O_2 Winkler) y las lecturas obtenidas mediante CTD (O_2 CTD) en las estaciones de la bahía de La Paz. a) febrero de 2000; b) noviembre de 2000.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4. 2. Distribución vertical de la temperatura, salinidad y sigma-t

La distribución vertical de éstos parámetros se muestran en los transectos de la figura 3.1.

En febrero del 2000 (secciones a₁-a₂ y b₁-b₂) la distribución de temperatura en los 100 m superiores de la columna de agua presentó ligeros cambios entre 20 y 40 m de profundidad, que indicaron la posición de la termoclina (Fig. 4. 2 a y b).

En noviembre del 2000 los primeros 100 m de la columna de agua se dividieron claramente en una capa de temperatura homogénea (25 °C), comprendida desde la superficie hasta profundidades de 40-50 m; una capa con un cambio de las isotermas (3 °C en 5 m) localizada entre 50-55 m de profundidad y una capa de entre 21 y 18 °C comprendida entre 70 y 100 m (Figs. 4. 2 c y d).

A partir de estas distribuciones de temperatura se consideró que la isoterma que mejor definió a la termoclina en febrero fue la de 20 °C, mientras que en noviembre fue la de 24°C (Fig. 4. 2).

La distribución vertical de la salinidad (Fig. 4. 3) en febrero reveló que las isohalinas mayores a 35.0 ocuparon desde la superficie hasta aproximadamente 60 m de profundidad en la sección a₁-a₂ y hasta 70 m en el transecto b₁-b₂ (Fig. 4. 3). Ninguna de las dos secciones presentó gradientes verticales marcados en la distribución de las isohalinas.

En noviembre prácticamente toda la capa de 100 m presentó una salinidad mayor a 35.0, como se apreció en los transectos c₁-c₂ y d₁-d₂ (Figs. 4. 3 c y d). Además, fueron evidentes gradientes verticales de salinidad entre 50 y 70m de profundidad en la sección c₁-c₂ y entre 55 y 60 m en el transecto d₁-d₂ (Fig. 4. 3).

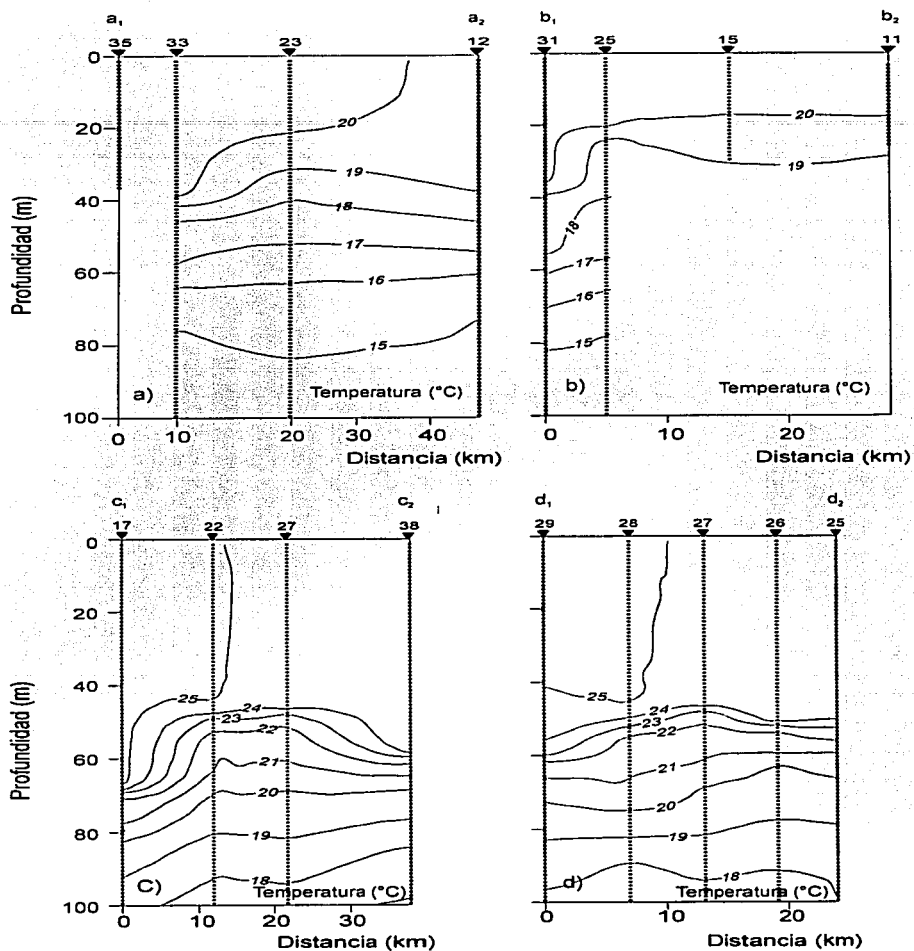


Figura 4. 2. Distribución vertical de la temperatura en la bahía de La Paz en dos muestreos del 2000. a) Transecto a₁-a₂, febrero; b) Transecto b₁-b₂, febrero; c) Transecto c₁-c₂, noviembre; d) Transecto d₁-d₂, noviembre. En la parte superior se indica con triángulos y números la ubicación de las estaciones de muestreo.

La elevación de la haloclina fue evidente en el transecto c_1 - c_2 , entre las estaciones 17 y 27, mientras que un hundimiento fue claro entre las estaciones 27 y 38 de la misma sección (Fig. 4. 3 c). En el transecto d_1 - d_2 se observó una ligera elevación de las isohalinas entre las estaciones 29 y 27 (Fig. 4. 3 d). En general, los patrones verticales de la salinidad coincidieron con los de temperatura, así como las elevaciones y hundimientos de las isolíneas (Fig. 4. 2).

La distribución de σ - t (Fig. 4. 4) siguió asimismo, los mismos patrones de la temperatura y la salinidad, con mayores gradientes verticales durante noviembre, que coincidieron con la profundidad de los gradientes de temperatura y salinidad (Figs. 4. 2, 4. 3 y 4. 4). También coincidieron las elevaciones de las isopicnas entre las estaciones 17 y 27 del transecto c_1 - c_2 y entre las estaciones 29 y 27 de la sección d_1 - d_2 (Fig. 4. 4).

La densidad aumenta con un incremento en la salinidad y una disminución en la temperatura. Con los datos obtenidos en este trabajo se advirtió que en la Bahía de La Paz, el efecto de la temperatura sobre la densidad del agua fue más importante que el de la salinidad.

Entre febrero y noviembre del 2000, la salinidad en los primeros 40 m prácticamente fue la misma (Fig. 4. 3). Sin embargo, la temperatura se modificó en 5 °C entre éstos meses (Fig. 4. 2). Dicha diferencia de temperatura se reflejó en la densidad; por ejemplo, en febrero con una temperatura de 20 °C y una salinidad de 35.4, el valor de σ - t fue alrededor de 25.0, en tanto que en noviembre con una salinidad prácticamente igual, y una temperatura de 25 °C, la densidad fue de 23.6, confirmandose el efecto de la temperatura sobre la densidad (Fig. 4. 4).

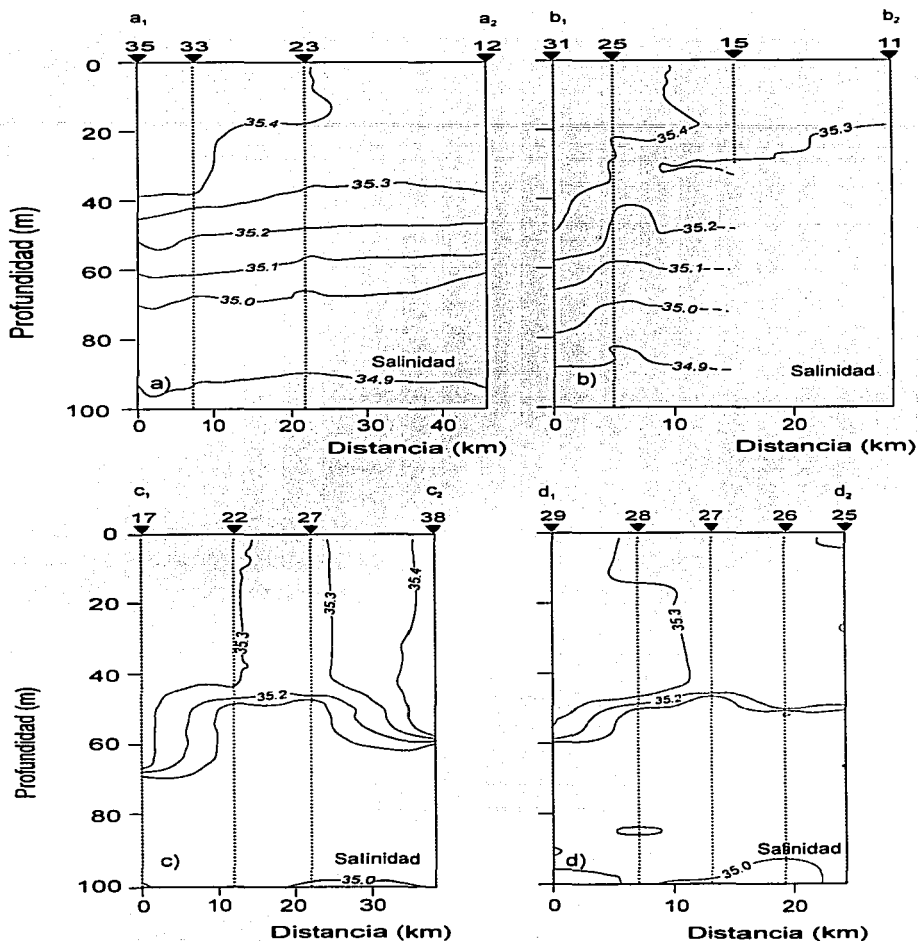


Figura 4. 3. Distribución vertical de la salinidad en la bahía de La Paz en transectos de dos muestreos del 2000. a) Transecto a₁-a₂, febrero; b) Transecto b₁-b₂, febrero; c) Transecto c₁-c₂, noviembre; d) Transecto d₁-d₂, noviembre. En la parte superior se indica con triángulos y números la ubicación de las estaciones de muestreo.

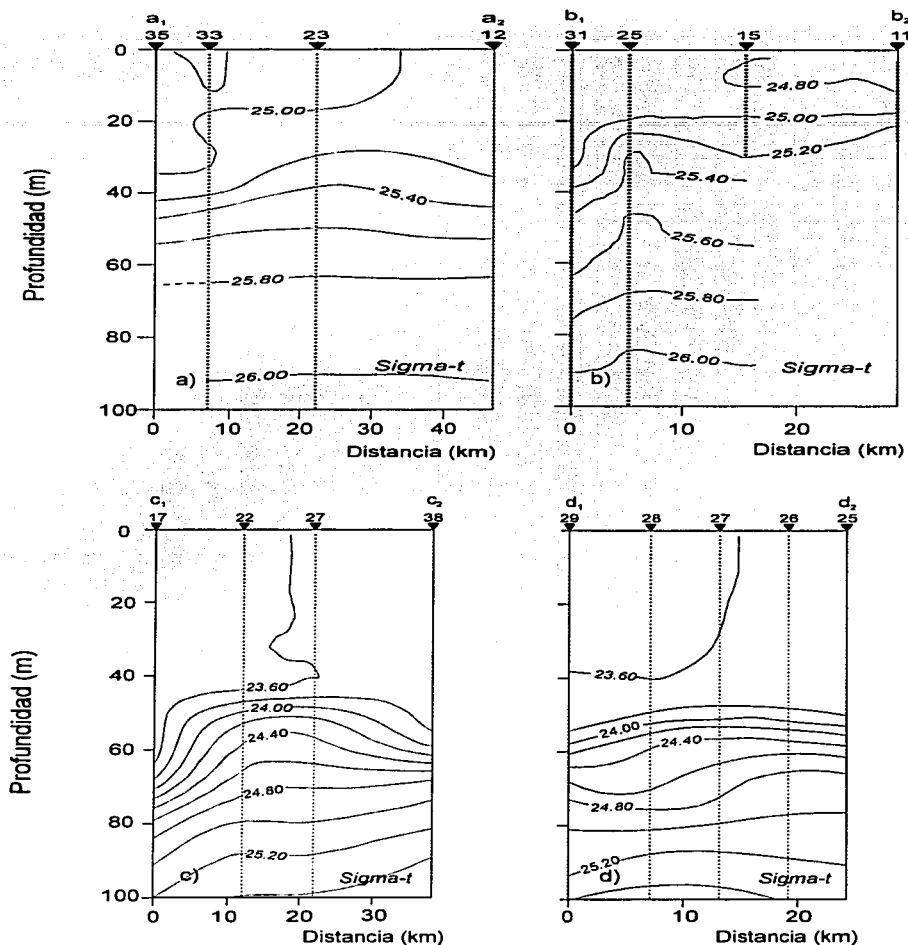


Figura 4. 4. Distribución vertical de sigma-t en la bahía de La Paz en transectos de dos muestreos del 2000. a) Transecto a₁-a₂, febrero; b) Transecto b₁-b₂, febrero; c) Transecto c₁-c₂, noviembre; d) Transecto d₁-d₂, noviembre. En la parte superior se indica con triángulos y números la ubicación de las estaciones de muestreo.

4. 3. Masas de agua

Los diagramas T-S (Fig. 4. 5) indicaron que, en la Bahía de La Paz, las masas de agua presentes, tanto en febrero como noviembre del 2000, fueron: Agua Subsuperficial Subtropical (AS_S, $34.5 < S < 35.0$; $9.0 < T < 18.0$ °C) y Agua del Golfo de California (AGC, $S \geq 35.0$; $T \geq 12.0$ °C). En las estaciones ubicadas en Boca Grande, se detectó además la presencia de Agua Intermedia del Pacífico, AIP, ($34.5 < S < 34.8$; $4.0 < T < 9.0$ °C).

Al comparar los diagramas T-S de febrero y noviembre del 2000 con un diagrama T-S de junio de 1998 (Monreal-Gómez et al., 2001), se apreció que el Agua Superficial Ecuatorial (ASE, $S < 35.00$; $T \geq 18.0$ °C) estuvo ausente en los dos muestreos del 2000 (Fig. 4. 5). Esta diferencia tiene su explicación en que la distribución del ASE y AGC, que se encuentran por encima de los 150 m en el Golfo de California, obedece al patrón de circulación (Badán, 1997). El ASE proviene de la región ecuatorial y su presencia en el interior del Golfo de California depende del patrón de vientos dominante, ya que en verano los vientos del sureste producen una máxima intrusión del ASE en el Golfo de California (Lavín et al., 1997; Castro et al., 2000) y es entonces cuando esta masa de agua puede ingresar en la bahía de La Paz. Mientras tanto, el AGC se localiza principalmente en la parte norte del Golfo. Es necesario tener en cuenta que la Bahía de La Paz ha sido propuesta como un sitio de formación de AGC, durante verano debido a la alta evaporación que predomina en este lugar (Monreal-Gómez et al., 2001).

En invierno, cuando los vientos dominantes son del noroeste, el ASE se retrae encontrándose solamente en la boca del Golfo de California; al mismo tiempo, el AGC se encuentra en todo el Golfo e incluso hay un flujo neto hacia afuera (Lavín et al., 1997; Castro et al., 2000). A esto se debe que no se encontró ASE en la bahía, durante febrero y noviembre del 2000, lo que indicó que la bahía de La

Paz se encuentra acoplada a los cambios en el patrón de circulación del Golfo de California.

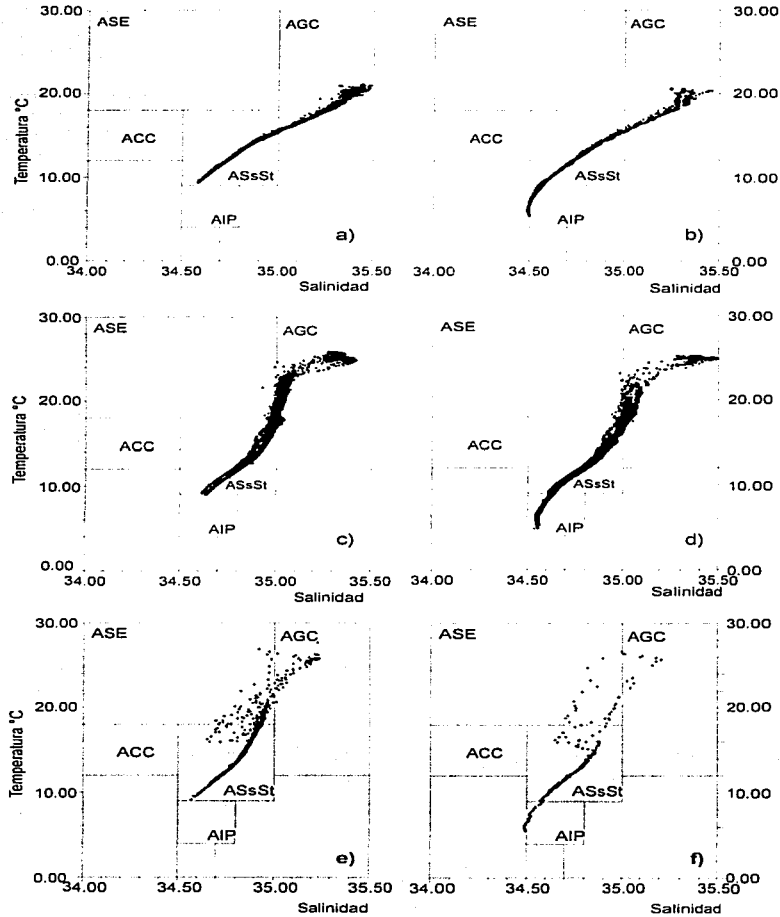


Figura 4. 5. Diagramas T-S en la bahía de La Paz. a) noviembre del 2000, estaciones dentro de la bahía; b) noviembre del 2000, estaciones en Boca Grande; c) febrero del 2000, estaciones dentro de la bahía; d) febrero del 2000, estaciones en Boca Grande; e) junio de 1998, estaciones dentro de la bahía; f) junio de 1998, estaciones en Boca Grande; éstos dos últimos según Monreal-Gómez *et al.* (2001).

4. 4. Distribución vertical de las masas de agua

La distribución vertical de la salinidad (Fig. 4. 6) permitió conocer la distribución de las masas de agua en los mismos transectos tratados en la sección anterior. La isoterma de los 18.0 °C (superpuesta en la figura 4. 6) y la isohalina de 35.0 se emplearon para delimitar las extensiones de las masas de agua, dado que corresponden a los máximos valores de temperatura y salinidad del ASsSt.

Analizando los primeros 100 m de la columna de agua, se observó que en febrero, desde la superficie hasta 70 m de profundidad, el agua tuvo una salinidad mayor a 35.0. La isoterma de 18.0 °C se localizó entre 45 y 55 m de profundidad (Fig. 4. 6 a y b). Ésto implicó que el AGC estaba ocupando los primeros 60-70 m y que el ASsSt llenaba una capa de entre 30 y 40 m de espesor, en los transectos a₁-a₂ y b₁-b₂.

En contraste, en noviembre los primeros 100 m fueron ocupados casi en su totalidad por agua con salinidad mayor a 35.0; la isoterma de 18°C se detectó entre 85 y 100 m de profundidad (Fig. 4. 6). Con ésto se determinó que el AGC fue la que ocupó esta capa y que un pequeño núcleo de ASsSt estuvo presente solamente entre las estaciones 27 y 38 a 95 m de profundidad (Secc. c₁-c₂). La sección d₁-d₂ fue muy similar a la sección c₁-c₂, con la diferencia de que el ASsSt ocupó una capa de mayor espesor (10 m) que se localizó entre los 90 y 100 m, a lo largo de casi todo el transecto (Fig. 4. 6 d). Es notorio que tanto en febrero como en noviembre del 2000 el AGC ocupó la capa superficial. Sin embargo, fue de mayor espesor en noviembre ya que se apreció una diferencia de 30 m (Fig. 4.6).

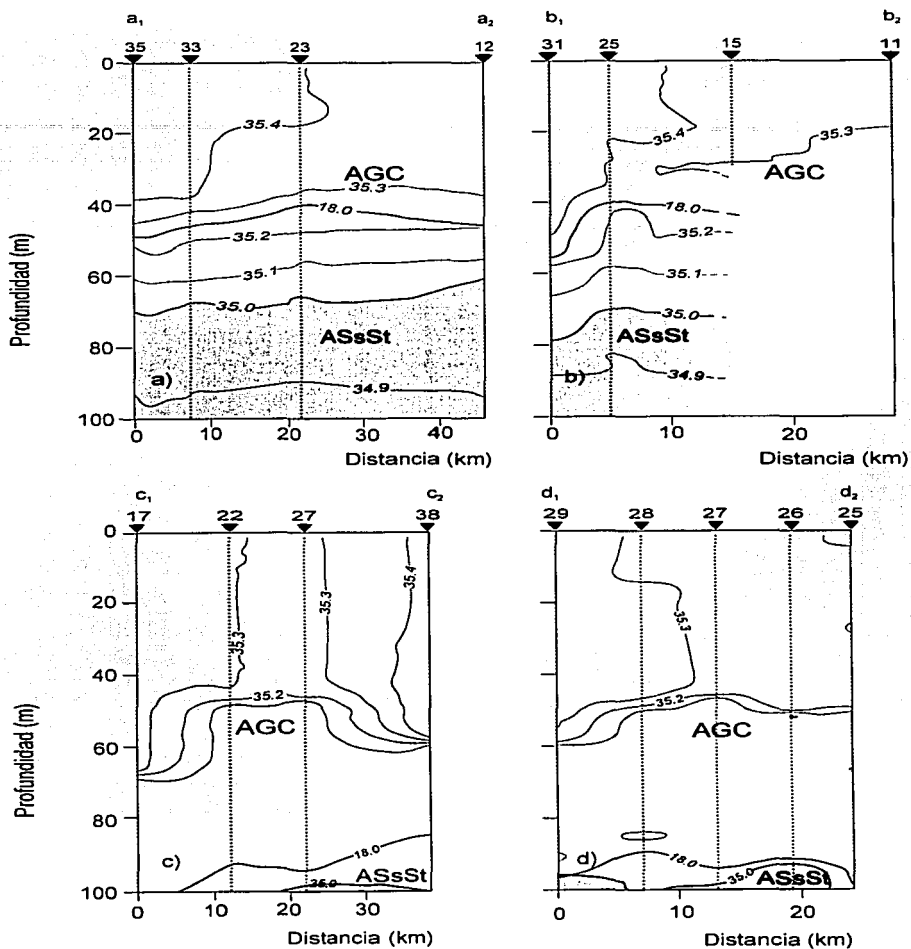


Figura 4. 6. Distribución vertical de las masas de agua en la bahía de La Paz en transectos de dos muestreos del 2000. a) Transecto a₁-a₂, febrero; b) Transecto b₁-b₂, febrero; c) Transecto c₁-c₂, noviembre; d) Transecto d₁-d₂, noviembre. En la parte superior se indica con triángulos y números la ubicación de las estaciones de muestreo. Las áreas sombreadas representan al Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt).

El Agua del Golfo de California se considera como agua de origen ecuatorial modificada en la superficie por evaporación, según el esquema propuesto por diversos autores (Bray, 1988; Torres Orozco 1993; Lavín *et al.*, 1995).

ASsSt + evaporación \Rightarrow AGC

La transformación puede ocurrir en todo el Golfo de California y durante todo el año (Lavín *et al.*, 1997). De hecho, la bahía de La Paz ha sido propuesta como un sitio de formación del AGC (Monreal-Gómez *et al.*, 2001).

4. 5. Distribución vertical de la frecuencia de Brunt-Väisälä (N^2) y distribución horizontal del parámetro de estratificación (Φ)

En todos los transectos se calcularon la ubicación de la termoclina y la estabilidad de la columna de agua. La forma cuantitativa para conocer ambas características fue a través de la frecuencia de Brunt-Väisälä (N^2) que muestra indirectamente la intensidad de la estratificación de la columna de agua y por tanto podemos suponer una relación cuasidirecta con la estabilidad de la misma. La profundidad a la que la frecuencia de Brunt-Väisälä es máxima, coincide con la profundidad a la que se encuentra la termoclina (Pickard y Emery, 1990; Agustí y Duarte, 1999; Planas *et al.*, 1999).

En febrero los valores máximos de la frecuencia de Brunt-Väisälä fueron de entre 200 y $400 \times 10^{-6} \text{ s}^{-2}$ en la sección a_1 - a_2 (Fig. 4. 7 a). Estos máximos se ubicaron entre 25 y 40 m de profundidad. La termoclina se elevó en la estación 23, en tanto que hacia las estaciones 12 y 33 hubo hundimiento. El transecto b_1 - b_2 mostró los valores máximos de la frecuencia de Brunt-Väisälä alrededor de los 18 m de profundidad en casi todo el transecto, a excepción de la estación 31, donde el valor máximo estuvo a los 40 m de profundidad (Fig. 4. 7 b).

En noviembre del 2000, en la sección c_1 - c_2 se observó que los valores máximos de la frecuencia de Brunt-Väisälä estuvieron entre 800 y $900 \times 10^{-6} \text{ s}^{-2}$ (Fig. 4. 7 c), situándose aproximadamente a los 50 m de profundidad. La termoclina se elevó entre las estaciones 22 y 27, mientras que en los extremos del transecto (estaciones 17 y 38) se hundió, alcanzando hasta 70 m de profundidad en la estación 17 (Fig. 4. 7 c). El transecto d_1 - d_2 (Fig. 4. 7 d) presentó un comportamiento parecido al de c_1 - c_2 . En el centro de la sección se percibió un levantamiento de la termoclina y hacia los extremos un hundimiento (estaciones 29 y 25). La profundidad de la termoclina en este transecto osciló entre 55 y 60 m. Los valores de la frecuencia de Brunt-Väisälä fueron muy similares a los del transecto c_1 - c_2 .

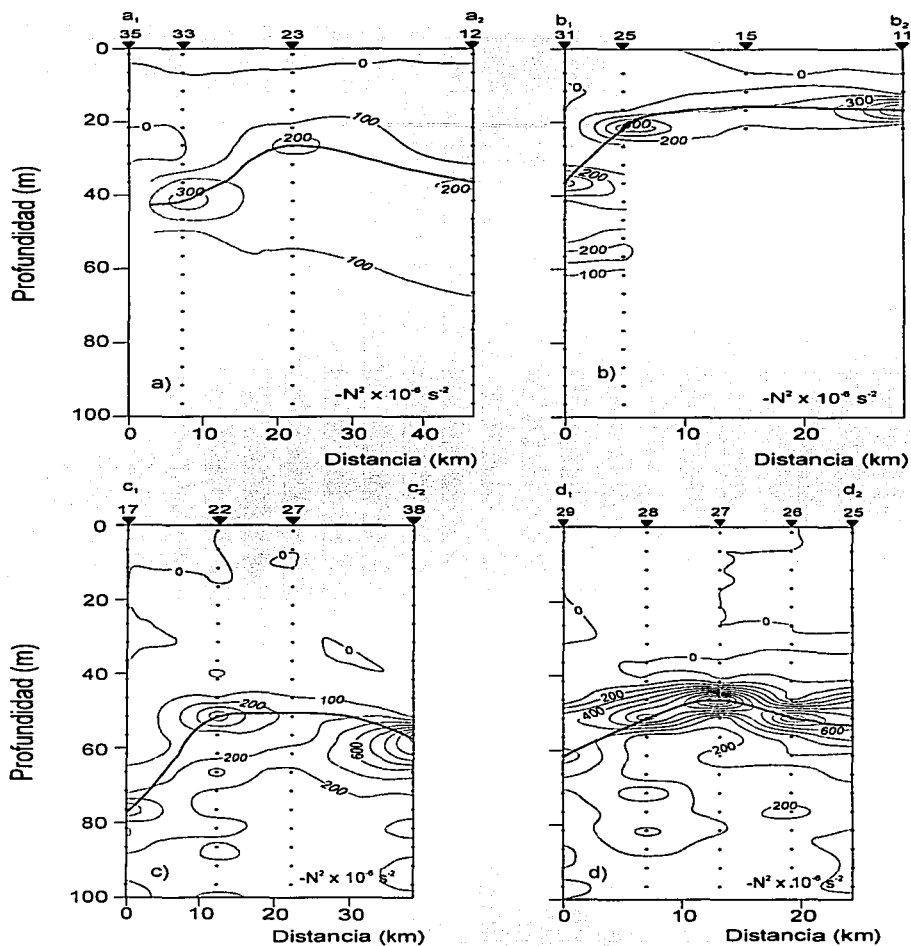


Figura 4. 7. Distribución vertical de la frecuencia de Brunt- Väisälä ($-N^2$) en la bahía de La Paz en transectos de dos muestreos del 2000. a) Transecto a_1 - a_2 , febrero; b) Transecto b_1 - b_2 , febrero; c) Transecto c_1 - c_2 , noviembre; d) Transecto d_1 - d_2 , noviembre. En la parte superior se indica con triángulos y números la ubicación de las estaciones de muestreo. La línea gruesa indica la posición de la termoclina.

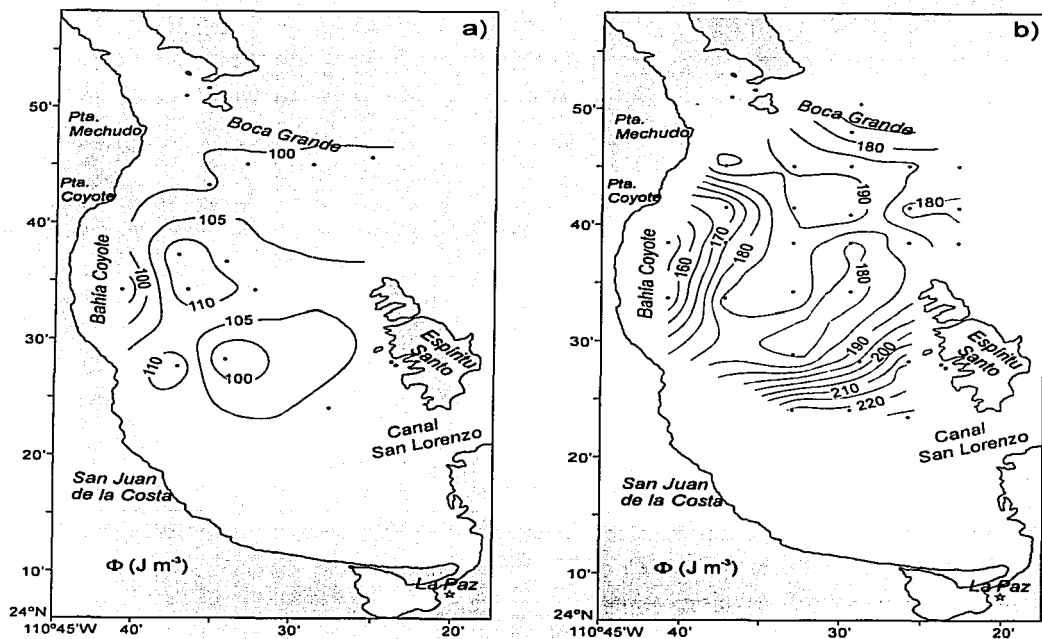
Las diferencias en la profundidad de la termoclina mostraron que el espesor de la capa de mezcla entre febrero y noviembre del 2000 varió en alrededor de 30 m. Los valores de la frecuencia de Brunt-Väisälä fueron casi del doble en noviembre respecto a febrero, lo cual indica la intensidad de la estratificación de la columna de agua en la bahía de La Paz entre éstos dos muestreos.

Para evaluar si el contraste en la profundidad de la capa mezclada entre febrero y noviembre implicaba que el trabajo realizado para mezclar la capa superior de 100 m era diferente, se calculó el parámetro de estratificación, Φ (Simpson *et al.*, 1977).

En febrero prácticamente no existió diferencia entre el interior de la bahía y Boca Grande, pues los valores del parámetro de estratificación fueron aproximadamente de 100 J m^{-3} en ambas áreas (Fig. 4.8 a).

La distribución horizontal del parámetro de estratificación mostró que en noviembre (Fig. 4.8 b), los valores fueron de 150 a 230 J m^{-3} , estando los más altos al suroeste de Espíritu Santo. En el área de Bahía Coyote, el valor del parámetro de estratificación fue el más pequeño, mientras que en Boca Grande, Φ osciló entre 170 y 180 J m^{-3} ; en Cuenca Alfonso los valores fueron de 190 J m^{-3} (Fig. 4.8 b).

Con éstos valores del parámetro de estratificación se observó que en febrero de 2000, la cantidad de trabajo efectuada para mezclar la columna de agua en la capa superior de 100 m fue sustancialmente menor (casi la mitad) que el realizado en noviembre del mismo año.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 4. 8. Distribución horizontal del parámetro de estratificación (Φ , $J m^{-3}$; 0-100 m) en la bahía de La Paz en dos muestreos del 2000. a) Febrero ; b) Noviembre.

Gaxiola-Castro *et al.*, (1995) obtuvieron valores de Φ , para la parte norte y centro del Golfo de California, en invierno, de entre 5 y 60 J m⁻³. Estos autores hicieron notar que la estratificación aumenta hacia la boca del Golfo, pues los valores más altos (50-60 J m⁻³) fueron registrados en Cuenca Carmen, mientras que los más pequeños se registraron en la parte norte del Golfo. Al comparar los resultados de este trabajo con esos valores, los de febrero son casi 2 veces más altos y los de noviembre son más de 3 veces que los reportados por esos investigadores.

Los valores altos de Φ en noviembre pueden ser explicados al considerar que durante verano, el océano recibe más calor de la atmósfera que en el invierno, provocando que las diferencias de temperatura entre la capa mezclada y la capa profunda sean grandes, conduciendo a un mayor grado de estratificación de la columna de agua. Esta situación se percibió aún durante otoño (noviembre). Durante el invierno, el flujo de calor se invierte, tal que es el océano el que cede calor a la atmósfera, lo que aunado con la acción de los vientos del norte (fríos y secos) que promueven mezcla y disminuyen considerablemente la temperatura superficial del océano, hacen que la diferencia de temperatura entre la capa mezclada y la profunda sea pequeña y por ello el valor de Φ se reduce. De este modo, el papel del viento en los procesos de mezcla y circulación en la bahía es importante, tal y como será discutido más ampliamente en el apartado siguiente.

4. 6. Topografía de las isotermas de 20 y 24°C

El delimitar la termoclina de cada campaña permitió elegir la isoterma, ubicada por debajo de la capa de mezcla, que definiera de mejor manera la circulación dentro de la Bahía de La Paz, por lo que para febrero se analizó la topografía de la isoterma de 20.0 °C, mientras que para noviembre se estudió la de 24.0 °C. Además, se obtuvieron las distribuciones de la temperatura por debajo de la capa de mezcla, empleándose la de 25 m en febrero y la de 50 m en noviembre.

En febrero, la topografía de la isoterma de los 20.0 °C mostró un núcleo frío y uno cálido, localizados cerca de Boca Grande y en la costa oeste (Bahía Coyote), respectivamente. El núcleo frío se extendió desde Cuenca Alfonso, hacia afuera de la Bahía de La Paz, pasando por Boca Grande. El núcleo cálido se encontraba compactado en la región de Bahía Coyote, en donde se observaron fuertes cambios en la profundidad a la que se hallaba la isoterma de 20.0 °C, sugiriendo una alta velocidad horizontal del agua en este núcleo cálido (Fig. 4. 9 a).

La circulación ciclónica y anticiclónica también se definieron mediante la distribución de la temperatura a 25 m de profundidad, donde la isoterma de 20.0°C separó las regiones frías localizadas en la parte este de la bahía, de la zona cálida ubicada al oeste (Fig. 4. 9 b). La temperatura en Boca Grande fue cercana a 20.0 °C, mientras que en el centro del giro ciclónico fue de 18.5 °C, a 25 m de profundidad; al mismo tiempo, la temperatura en el área de Bahía Coyote era de aproximadamente 20.5 °C, lo que confirmó una circulación anticiclónica (Fig. 4. 9 b).

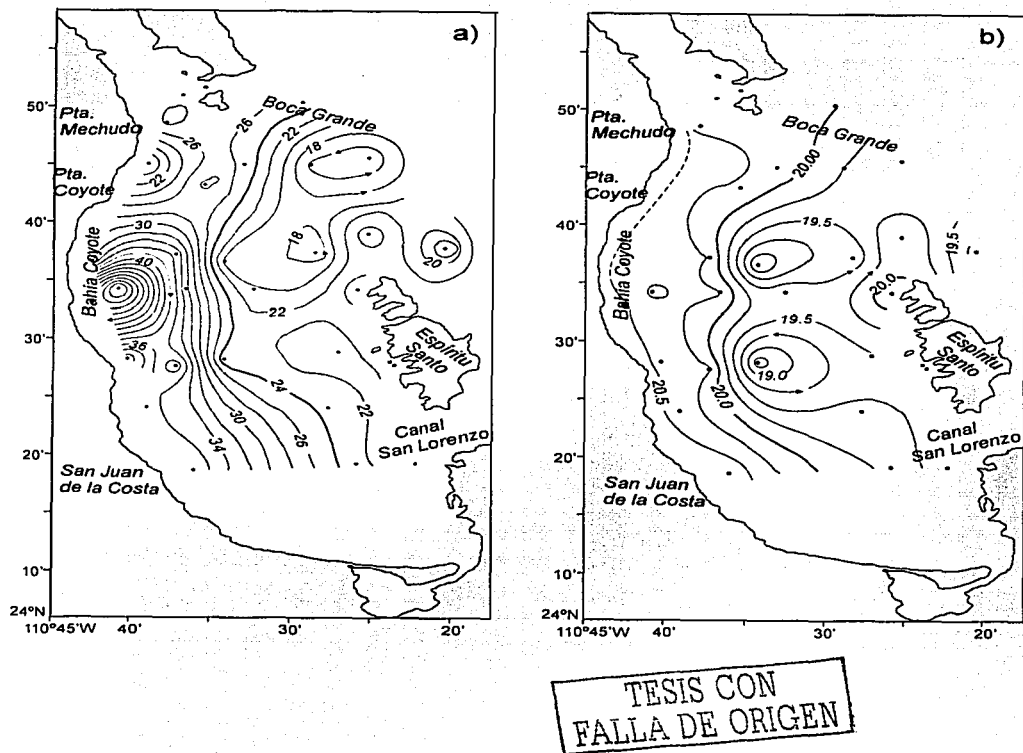


Figura 4. 9. a) Topografía (m) de la isoterma de 20.0 °C; b) Distribución de la temperatura (°C) a 25 m de profundidad, en la Bahía de La Paz en febrero del 2000. Las líneas gruesas indican 24 m de profundidad y la isoterma de 20.0 °C. Las flechas indican el sentido del giro.

La distribución de sigma-t (Fig. 4. 4) también respaldó las observaciones en torno a la circulación en la bahía. En ésta se apreció la elevación de las isopícnas entre las estaciones 23 y 12 (sección a₁-a₂) y entre las estaciones 31 y 25 (sección b₁-b₂); estas estaciones se ubicaron en el área ocupada por el núcleo frío. Por otra parte, se advirtió hundimiento de las isopícnas entre las estaciones 35 y 33 del transecto a₁-a₂ (Fig. 4. 4 a), mismas que se localizaron sobre el núcleo cálido (Fig. 4. 9).

En noviembre del 2000 la topografía de la isoterma de los 24.0 °C volvió a describir los núcleos cálido y frío (Fig. 4. 10 a). El primero se localizó, en la frontera oeste de la bahía, frente a Punta Coyote y al norte de San Juan de la Costa. En esta zona la isoterma de los 24.0 °C se encontró a más de 50 m de profundidad lo cual sugirió una circulación anticiclónica; este resultado estuvo apoyado también por la distribución de la temperatura a 50 m, que mostraba una temperatura 2 °C más elevada que el agua circundante (Fig. 4. 10 b).

El núcleo frío se encontró en la región próxima a Boca Grande, donde la isoterma de 24.0 °C estuvo más somera, aproximadamente a 50 m de profundidad (Fig. 4. 10 a); la temperatura en este núcleo fue 2 °C menor al núcleo cálido, según lo mostrado por la distribución de la temperatura a 50 m (Fig. 4. 10 b). Esta diferencia de temperatura se debió al ascenso de agua en el norte de la bahía.

En el mapa de la distribución de temperatura a 50 m de profundidad, la isoterma de 24.0 °C separó la región con circulación ciclónica de la zona con circulación anticiclónica en la Bahía de La Paz (Fig. 4.10 b).

Con la distribución de sigma-t se comprobó que en el transecto c₁-c₂ se presentó elevación de las isopícnas entre las estaciones 22 y 27 (Fig. 4. 4), cuya ubicación coincidió con la del núcleo frío (Fig. 4. 10). Por otra parte, se apreció un hundimiento de las isopícnas en los extremos del transecto (estaciones 17 y 38), lugar donde se detectó mayor temperatura. (Fig. 4. 10 b). En la sección d₁-d₂ se

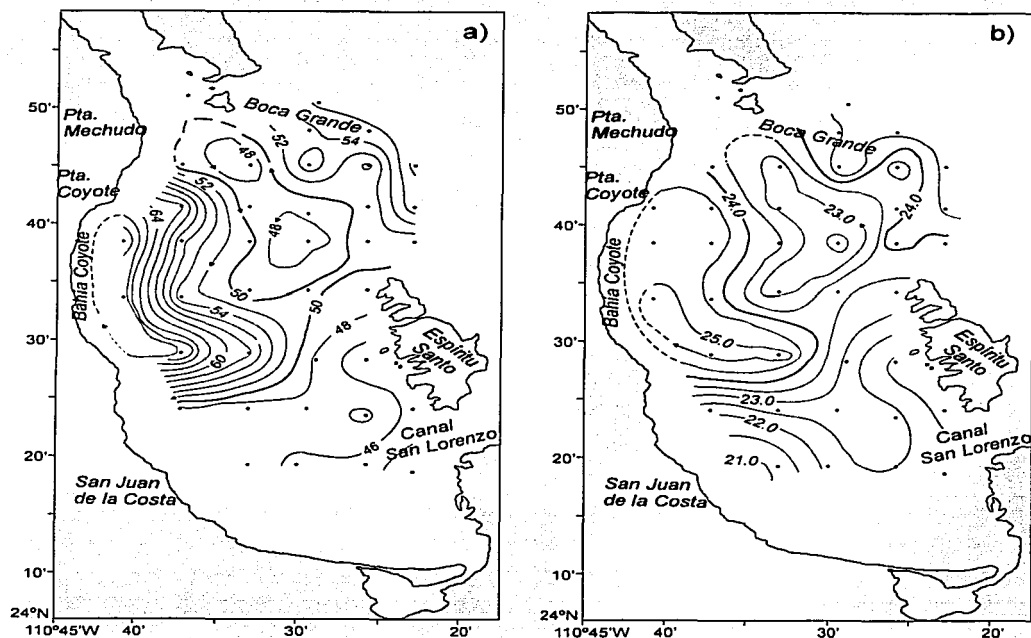


Figura 4. 10. a) Topografía (m) de la isoterma de 24.0 °C; b) Distribución de la temperatura (°C) a 50 m de profundidad, en la Bahía de La Paz en noviembre del 2000. Las líneas gruesas indican 50 m de profundidad y la isoterma de 24.0 °C. Las flechas indican el sentido del giro.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

observó hundimiento de las isopícnas en las estaciones 29 y 25 y elevación entre las estaciones 28 y 27 (Fig. 4. 4 d). La localización de ambos pares de estaciones coincidió con los núcleos cálido y frío, respectivamente (Fig. 4. 10).

Es interesante notar que tanto en febrero como en noviembre del 2000 se presentó un patrón de circulación similar: ciclónica en Boca Grande y anticiclónica en la costa oeste, en Bahía Coyote. Sin embargo, la extensión de cada núcleo varió ligeramente (Figs. 4. 9 y 4.10). Esta circulación, inferida a partir de parámetros hidrográficos, se presentó con vientos del norte en ambos casos. Estos vientos (Fig. 4.11) tuvieron una velocidad promedio de 13.0 m s^{-1} durante la campaña de febrero, mientras que en noviembre fue de 9.5 m s^{-1} .

Monreal-Gómez *et al.* (2001) describieron una circulación ciclónica en el área de Cuenca Alfonso con vientos del sur durante junio de 1998. Esta coincidencia en cuanto al área donde se localizaron los núcleos fríos entre los dos muestreos del 2000 y el verano de 1998, parece indicar que la circulación muy probablemente depende de otros factores como la forma de la cuenca y la entrada del agua a la bahía (Monreal-Gómez y Salas de León, 1990). De hecho, en varios trabajos se reporta a la topografía como responsable de la formación de giros en el océano (Huppert y Bryan, 1976; Aristegui *et al.*, 1997).

Los resultados aquí presentados respaldan la posibilidad de que la topografía sea responsable en buena medida de la circulación ciclónica y anticiclónica en la Bahía de La Paz, en tanto que el viento podría modificar la extensión de cada núcleo.

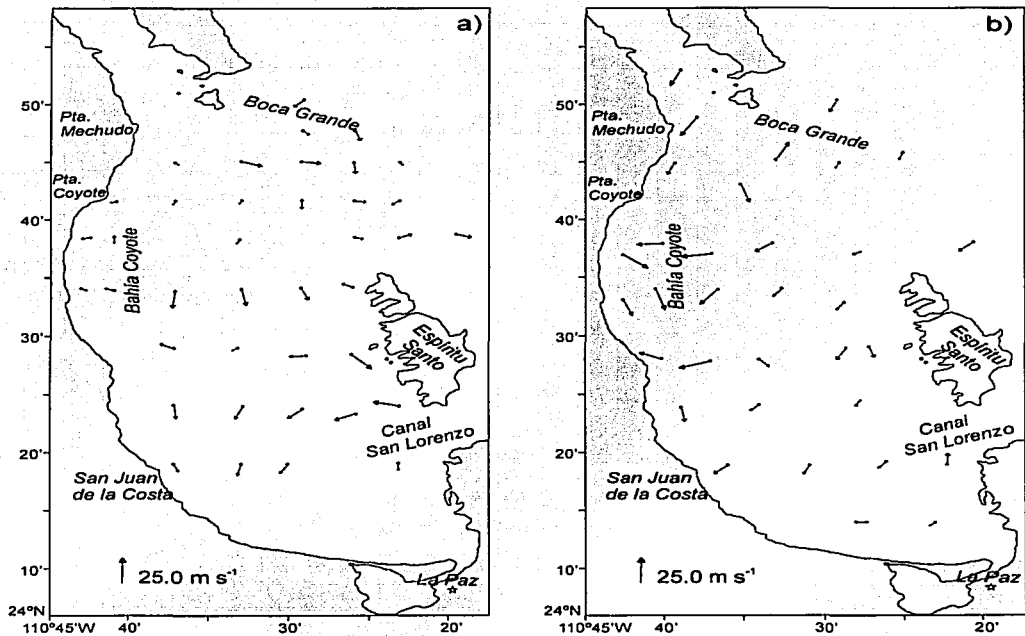


Figura 4. 11. Velocidad del viento medida a bordo de B/O "El Puma" en la Bahía de La Paz. a) Febrero del 2000; b) Noviembre del 2000.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4. 7. Distribución vertical de nitrato y fosfatos

La capa superficial del océano presenta concentraciones uniformemente bajas de nutrientes, debido a su consumo por el fitoplancton, mientras que la capa profunda presenta concentraciones máximas de éstos. Las diferencias observadas respecto a este patrón aportan indicios de los distintos procesos físicos, químicos y biológicos que están ocurriendo en los sistemas oceánicos.

Las concentraciones del nitrato y los fosfatos de ambas campañas se encontraron dentro del rango de valores conocidos para el océano. Los valores del nitrato oscilaron entre 0.01 y 33.95 μM en febrero del 2000 y entre 0.02 y 36.72 μM en noviembre del mismo año. En tanto, los valores que se obtuvieron de los fosfatos fueron de 0.16 a 4.64 μM para febrero y de 0.37 a 3.48 μM para noviembre. Estos intervalos se ubican dentro de los rangos de variación conocidos de éstos nutrientes en el Pacífico Tropical Oriental, región para la cual la base de datos con registros de más de 20 años de la NOAA incluye valores de entre 0.0 y 35.0 μM para el nitrato y entre 0.0 y 2.8 μM para los fosfatos (<http://www.nodc.noaa.gov>).

En general, las distribuciones verticales del nitrato (Fig. 4. 12) y de los fosfatos (Fig. 4. 13) siguieron una forma similar a las de la temperatura (Fig. 4. 2) y la densidad (Fig. 4. 4) en febrero y noviembre del 2000, indicando que estos parámetros condicionaron la distribución de los nutrientes. Para ambos casos se seleccionó la isonutria de 1.0 μM como indicadora de la nutriclina.

En la sección a_1 - a_2 la nutriclina se localizó aproximadamente a 25 m de profundidad, a excepción de la estación 12, donde se elevó hasta los 10 m (Fig. 4. 12 a). En el transecto b_1 - b_2 la nutriclina se encontró entre los 10 y 20 m de profundidad (Fig. 4. 12 b). De acuerdo a la ubicación de las estaciones se apreció

que aquellas que se encontraban hacia fuera de la bahía fueron las que presentaron la nutriclina más somera.

En noviembre del 2000 la nutriclina se encontró más profunda, entre 35 y 45 m de profundidad, con elevaciones entre las estaciones 27 y 38 del transecto c₁-c₂, sugiriendo un domo similar al observado en la distribución de sigma-t (Fig. 4. 4). Esta situación se repitió entre las estaciones 28 y 26 de la sección d₁-d₂ (Figs. 4. 12 c y d). La concentración del nutriente aumentó drásticamente por debajo de los 45 m, profundidad a la cual se ubicó la termoclina (Figs. 4. 2 y 4. 7).

Una diferencia muy importante entre febrero y noviembre fue la disminución en la concentración de nitrato por debajo de los 80 m, pues mientras en febrero era de entre 18.0 y 20.0 μM , para noviembre se había reducido a alrededor de 12.0 μM (Fig. 4. 12). Este empobrecimiento en nitrato dentro de la Bahía de La Paz apuntaba en dirección hacia la denitrificación, como un proceso importante, mismo que es discutido un poco más adelante.

La distribución de los fosfatos siguió un patrón de distribución muy parecido al del nitrato (Fig. 4. 13). La nutriclina de los transectos a₁-a₂ y b₁-b₂ se elevó en las estaciones ubicadas hacia afuera de la bahía, del mismo modo que lo observado para el nitrato (Figs. 4.12 y 4.13). La nutriclina se localizó entre 20 y 30 m de profundidad en el crucero de febrero.

Las secciones de noviembre (Fig. 4. 13) presentaron domos entre las estaciones 22 y 27 (c₁-c₂) y las estaciones 28 y 26 (d₁-d₂). La nutriclina se encontró entre 40 y 70 m de profundidad para esta campaña.

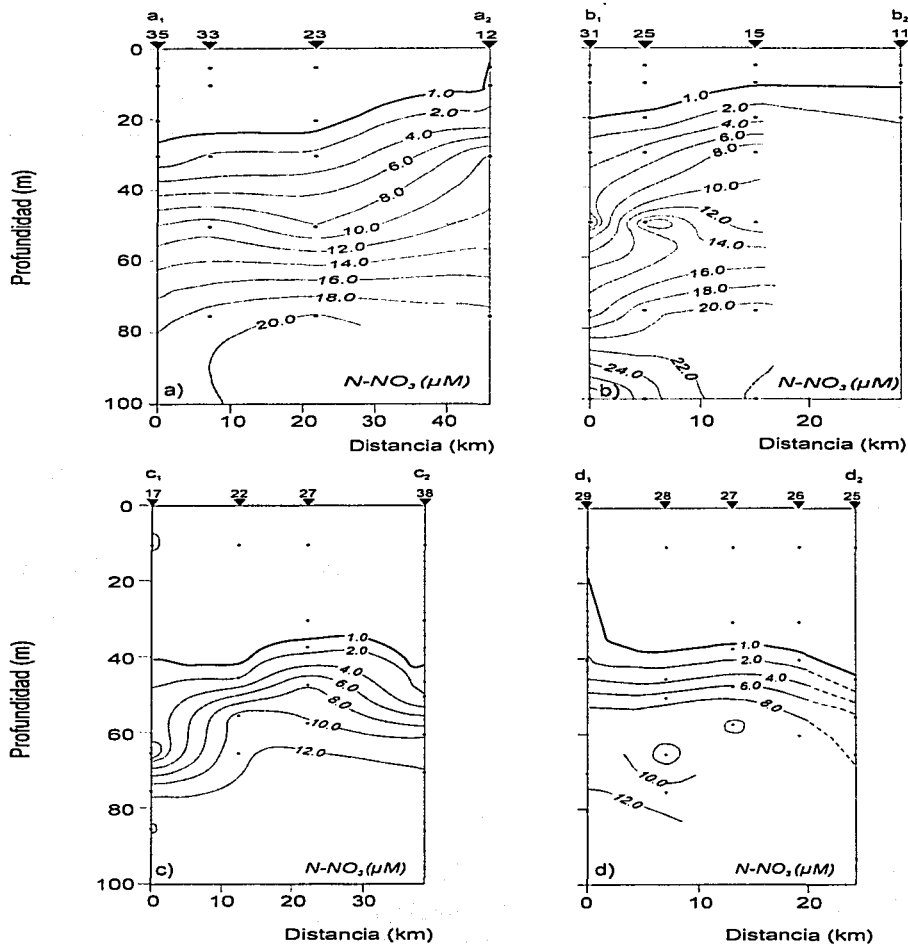


Figura 4. 12. Distribución vertical de la concentración de nitrato en la Bahía de La Paz en dos muestreos del 2000. a) Transecto a_1 - a_2 , febrero; b) Transecto b_1 - b_2 , febrero; c) Transecto c_1 - c_2 , noviembre; d) Transecto d_1 - d_2 , noviembre. En la parte superior se indica con triángulos y números la ubicación de las estaciones de muestreo. La línea gruesa indica la concentración de 1.0 μM , considerada aquí como la nutriclina.

En contraste con la reducción de nitrato que se observó entre febrero y noviembre por debajo de los 60 m, los fosfatos permanecieron con casi las mismas concentraciones (2.0 μM) hasta los 100 m de profundidad muestreados. A diferencia del nitrógeno, en el caso del fósforo no puede haber salidas del sistema por un mecanismo como la denitrificación, por lo que todo el fósforo es remineralizado por debajo de la zona de compensación y permanece como fosfatos.

Las elevaciones en las isolíneas del nitrato y de los fosfatos coincidieron tanto en febrero como en noviembre, con las elevaciones de las isopícnas; lo cual reveló que este patrón estuvo asociado con la presencia del núcleo frío descrito en el apartado 4.6 (Figs 4.9 y 4.10). De igual forma, el hundimiento en las isolíneas del nitrato siguió a las isopícnas que a su vez estuvieron relacionadas con el núcleo cálido localizado en la región de Bahía Coyote (Figs. 4.9 y 4.10).

El bombeo de nutrientes *vía* giros ciclónicos es uno de los mecanismos que ha sido propuesto ampliamente para proveer de nutrientes a la capa fótica, estimulando el aumento de la biomasa fitoplanctónica y la producción primaria (Falkowski *et al.*, 1991; McGillicuddy y Robinson, 1997). No obstante, es necesario señalar el hecho de que la concentración de NO_3 por encima de la termoclina fue en casi todos los casos, inferior a 1.0 $\mu\text{mol l}^{-1}$, que comparado con los valores de este nutriente en zonas de surgencia ($\text{NO}_3 > 1.0 \mu\text{mol l}^{-1}$; Merino, 1992), resultó claramente contrastante, lo cual indicó que el bombeo de nutrientes en éstos giros no tiene la intensidad de una surgencia. Sin embargo, los resultados aquí presentados sí permiten afirmar que éstos giros elevan la nutriclina varias decenas de metros respecto a las zonas aledañas, lo que implica una fertilización relativa que está respaldada por las distribuciones de clorofila *a* que se discuten en la siguiente sección.

Adicionalmente, parte de este efecto fertilizador puede no ser advertido, dado que las concentraciones de nutrientes no son solamente el producto del

bombeo desde la capa profunda sino que también son el resultado de consumo por actividad fotosintética, por lo que en la gran mayoría de los casos no es posible inferir la biomasa fitoplanctónica a partir de la concentración de nutrientes medida en la columna de agua (Frenette *et al.*, 1994).

En cualquier caso, la fuerte estratificación presente en la Bahía de La Paz, hace pensar que el reciclamiento juega un papel importante en la productividad de este sistema, pues se sabe que en este tipo de ambientes se establece una red microbiana (microbial web) que emplea de manera eficiente formas nitrogenadas recicladas como el amonio y la urea. Esta red comprende células autótrofas pequeñas (algas eucarióticas y cianobacterias), así como bacterias heterótrofas y protozoarios (Legendre y Rassoulzadegan, 1995). En éstos sistemas, los exudados del fitoplancton son aprovechados inmediatamente por las bacterias heterótrofas. La actividad de los consumidores (zooplancton) está acompañada de la excreción de amonio que es aprovechado por los autótrofos. En esta red microbiana muy poca materia se exporta (Hagström *et al.*, 1988; Michaels y Silver, 1988) por lo que el sistema se mantiene prácticamente en estado estacionario (Cushing, 1989). Este podría ser otro mecanismo que opere en la Bahía de La Paz para sustentar la biomasa del sistema sobre todo en los meses de alta estratificación de la columna de agua.

La distribución de nutrientes además de proporcionar información acerca de los procesos físicos y biológicos, también es un descriptor de los procesos biogeoquímicos que se llevan a cabo dentro de un sistema. Tal es el caso del nitrógeno que juega un papel esencial en la productividad biológica del océano. El ciclo de este elemento está involucrado en la formación de sedimentos biógenos, en retroalimentaciones que regulan el clima y en la concentración de compuestos nitrogenados en el océano (Libes, 1992).

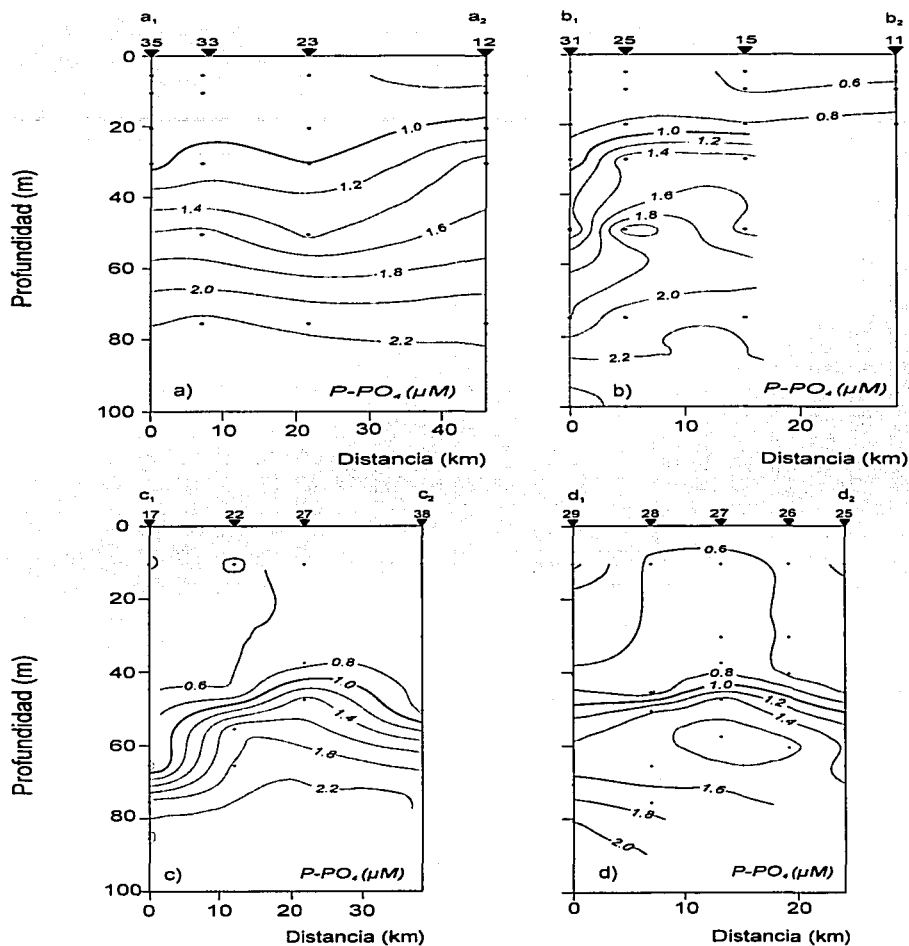


Figura 4. 13. Distribución vertical de la concentración de los fosfatos en la Bahía de La Paz en dos muestreos del 2000. a) Transecto a₁-a₂, febrero; b) Transecto b₁-b₂, febrero; c) Transecto c₁-c₂, noviembre; d) Transecto d₁-d₂, noviembre. En la parte superior se indica con triángulos y números la ubicación de las estaciones de muestreo. La línea gruesa indica la concentración de 1.0 μM, considerada aquí como la nutriclina.

En ambientes con bajas concentraciones de O_2 algunas especies de bacterias oxidan materia orgánica empleando nitrato como aceptor de electrones. Parte de este nitrato es reducido a nitrito y luego a N_2 sin que sea incorporado a la biomasa bacteriana. Este proceso en el que se pierde nitrógeno, se denomina denitrificación. Esta reducción del nitrógeno es inhibida por el oxígeno, por lo que solamente aquellas masas de agua y microzonas con bajas concentraciones de este gas son sitios potenciales para que ocurra este proceso, como es el caso del Pacífico Tropical Este (Gruber y Sarmiento, 1997; Tyrrel y Law, 1997).

Para comprobar si en la Bahía de La Paz se presentaba este proceso se emplearon varias herramientas: 1) perfiles verticales de la concentración de oxígeno disuelto; 2) relación NO_3-PO_4 por debajo de la capa de mezcla y 3) déficit de nitrato (ΔNO_3) por debajo de la capa de mezcla.

Los perfiles de oxígeno (Fig. 4.14) mostraron una oxiclina bien desarrollada en ambos cruceros, aunque fue más evidente durante noviembre de 2000. La profundidad de la oxiclina coincidió con la termoclina y la nitratoclina (Figs. 4. 2, 4. 12).

Las concentraciones de oxígeno disuelto en febrero no fueron suficientemente bajas para permitir la denitrificación en ese momento, pues la concentración de este gas a 200 m de profundidad, fue de alrededor de 1.5 ml l^{-1} (Fig. 4. 14 a). En esta situación es poco probable que se consuma nitrato para oxidar materia orgánica. Sin embargo, en noviembre (Fig. 4. 14 b) la concentración de O_2 por debajo de 150 m de profundidad fue inferior a 0.5 ml l^{-1} , y en estas circunstancias sí es factible que ocurra denitrificación con parte del nitrito reduciéndose a N_2O (Libes, 1992).

La relación NO_3-PO_4 (Fig. 4. 15) por debajo de la termoclina confirmó esta diferencia entre febrero y noviembre, dado que en el primer caso el valor de la

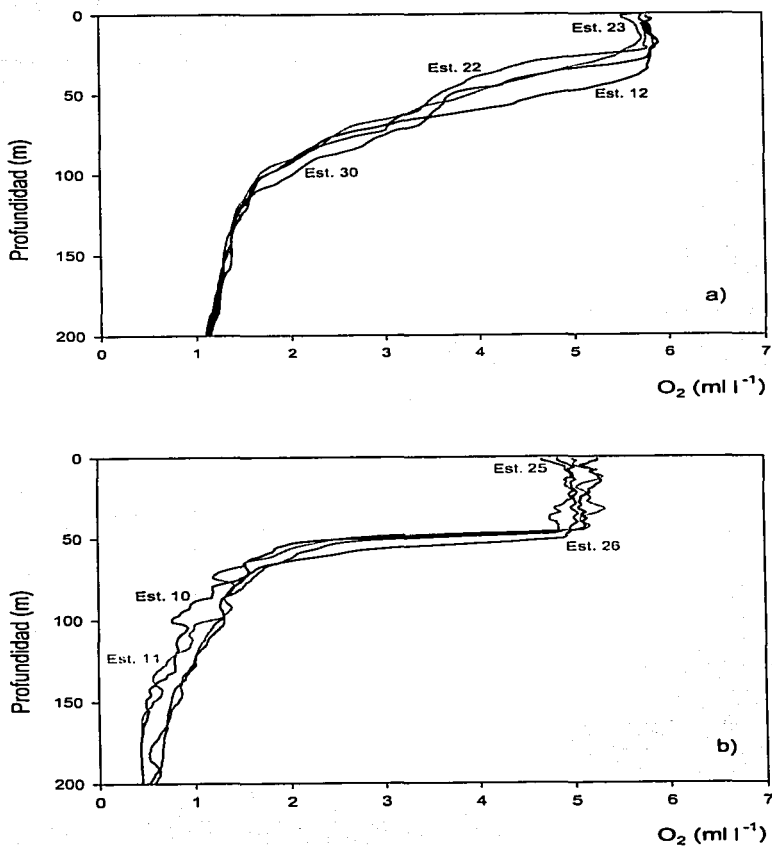


Figura 4. 14. Perfiles verticales de la concentración de oxígeno disuelto en algunas estaciones de la Bahía de La Paz en dos muestreos del 2000. a) Febrero ; b) Noviembre. Las estaciones se indican con números en cada curva.

pendiente (que corresponde al valor de nitrato de la razón de Redfield) fue de 15.86 ($r^2= 0.81$), mientras que en noviembre la pendiente de 9.68 ($r^2= 0.82$) señaló que la denitrificación fue un proceso muy importante en la Bahía de La Paz, durante esta campaña.

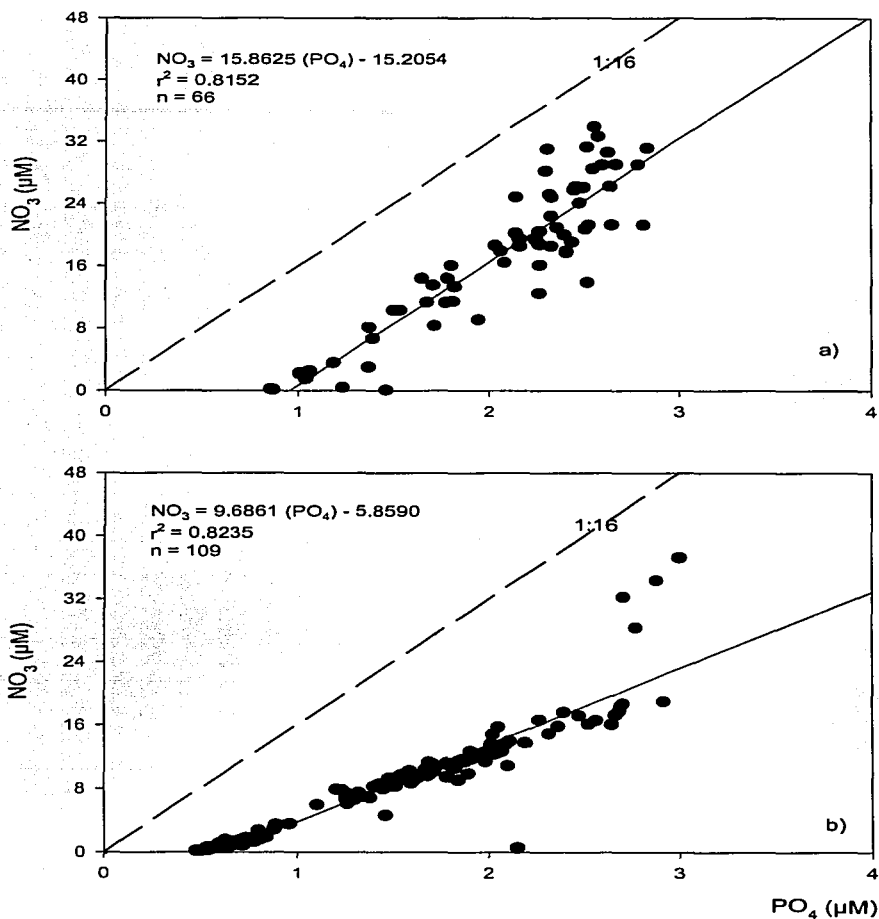


Figura 4. 15. Relación $\text{NO}_3\text{-PO}_4$ por debajo de la termoclina en las estaciones de la Bahía de La Paz. a) Febrero del 2000; b) Noviembre del 2000. La línea dibujada por encima de la recta de regresión corresponde a la proporción de Redfield de 1:16.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una manera de estimar el grado de denitrificación que ha tenido lugar en una masa de agua es el déficit de nitrato (ΔNO_3). Los valores tomados por este índice van de 0 (lo que indica que no hay déficit de nitrato), a valores negativos, (que revelan denitrificación).

Los valores del déficit de nitrato (ΔNO_3) indicaron una reducción relativa de este nutriente en las aguas por debajo de la capa de mezcla para ambas campañas. En febrero (Fig. 4. 16) el déficit fue de -6 a $-18 \mu\text{M}$ mientras que en noviembre fue de -12 a $-19 \mu\text{M}$. Esto indica que aunque las condiciones de microaerofilia necesarias para la denitrificación no estaban presentes durante la campaña de febrero, muy probablemente la denitrificación tuvo lugar en dichas aguas previamente, ya fuese dentro de la bahía o antes de que el agua ingresara a la misma.

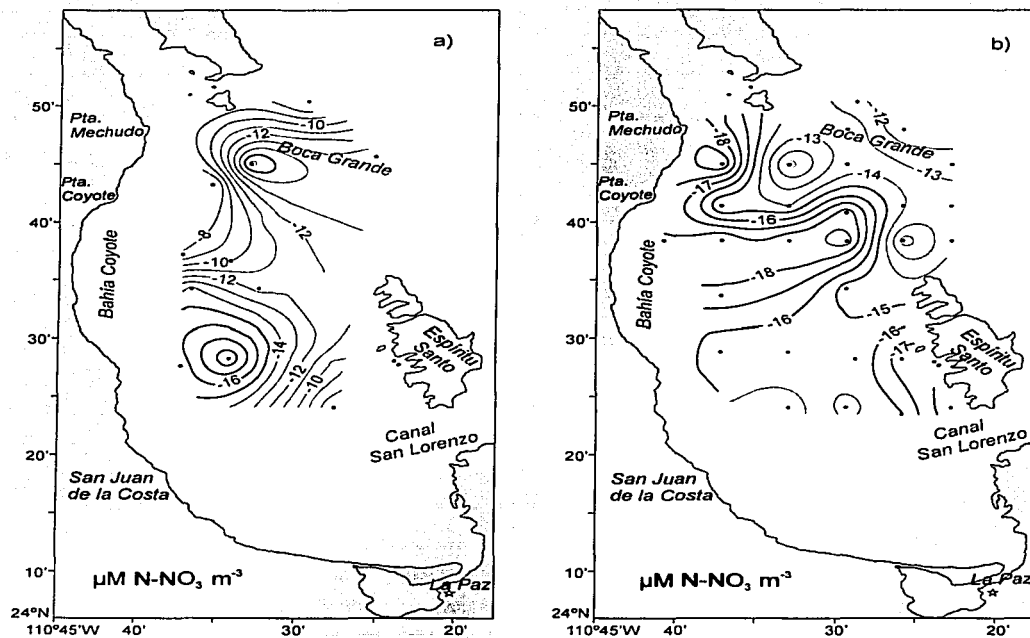
Este parámetro también permitió advertir patrones de distribución horizontal de la evidencia de denitrificación en las aguas subsuperficiales presentes en la bahía (Fig. 4. 16). En febrero se observaron dos núcleos importantes del déficit de nitrato, uno en el área de Boca Grande y otro al sur de Bahía Coyote. En contraste, en noviembre el déficit de nitrato se extendió ampliamente, ocupando la mayor parte de la bahía, con valores superiores a los $-14 \mu\text{M}$ y alcanzando los $-19 \mu\text{M}$, principalmente en el área de Bahía Coyote.

La posibilidad de que tenga lugar la denitrificación dentro de la bahía, depende del grado de disminución del oxígeno disuelto que se alcance en su interior (Fig. 4.14). Éste, a su vez, depende de 1) el grado de estratificación ya que ésta retarda de forma eficaz los flujos verticales tanto de nutrientes como de oxígeno disuelto (Falkowski y Raven, 1997); 2) el flujo de materia orgánica hacia el fondo y 3) la reducción de oxígeno preexistente en las aguas profundas de la bahía. La existencia de un mayor déficit de nitrato en noviembre, cuando la estratificación también es mayor (Figs. 4. 2, 4. 7 y 4. 8) es consistente con este razonamiento. Por otro lado, los valores del déficit de nitrato de este trabajo

coincidieron con los reportados en la literatura para la boca del Golfo de California ($-12.0 \mu\text{M}$). Estos valores están relacionados con la Zona de Mínimo Oxígeno del Pacífico Este y algunas regiones de la plataforma continental de la costa del Pacífico Mexicano donde ocurre denitrificación (Devol, 1991; Anderson y Sarmiento, 1994; Gruber y Sarmiento, 1997). En este sentido, el déficit de nitrato encontrado también puede deberse al ingreso de aguas previamente denitrificadas antes de su ingreso a la bahía.

La información aquí mostrada permite afirmar que en ambos cruces se presentaron evidencias de denitrificación en las aguas de la bahía. Las condiciones de oxígeno en noviembre habrían permitido que dicha denitrificación hubiese ocurrido o continuara haciéndolo, en el interior de la bahía. En cambio en febrero, la denitrificación ocurrió necesariamente con anterioridad al muestreo, ya fuese dentro o fuera de la bahía. De ocurrir la denitrificación en el interior de la bahía, es probable que sea de mayor duración durante el verano, cuando la estratificación alcance su máxima intensidad y el flujo vertical de materia orgánica también sea mayor. De ocurrir esto, la evidencia del proceso, como déficit de nitrato, podría subsistir el resto del año, siendo gradualmente reducida por los procesos de mezcla, lo cual sería consistente con lo observado en febrero y noviembre del 2000 en esta investigación.

La denitrificación es uno de los sumideros más importantes de NO_3 que contribuye a incrementar a nivel global el déficit de este importante nutriente (Gruber y Sarmiento, 1997). Se ha estimado que la magnitud de la denitrificación en la columna de agua, es capaz de disminuir en más de 60% el N:P de entrada con respecto al de salida en algunos sistemas (Shaffer y Rönner, 1984; Seitzinger, 1987; Seitzinger, 1988). Este proceso tiene consecuencias ecológicas y geoquímicas en los sistemas acuáticos pues la remoción del nitrógeno es importante para regular la magnitud de la productividad primaria en ellos. Por esto, será importante definir, en estudios posteriores, en que grado, y durante que fracción del año, tiene lugar dicho proceso en el interior de la Bahía de La Paz.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 4.16. Distribución horizontal del déficit de nitrato (ΔNO_3) en dos muestreos del 2000 en la Bahía de La Paz. a) febrero; b) noviembre. Las líneas gruesas corresponden a las zonas con déficit superior a $-14 \mu\text{M}$ de nitrato.

4. 8. Distribución vertical de clorofila a

Para evaluar la biomasa fitoplanctónica, su distribución, y los posibles efectos de fertilización se empleó la concentración de clorofila a. Durante la campaña de febrero este descriptor osciló entre 0.01 a 0.30 mg m⁻³, mientras que en noviembre varió en el rango de 0.03 a 0.65 mg m⁻³.

Los valores encontrados en noviembre en la bahía fueron similares a los reportados para el sur del Golfo de California (Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991) y menores a los obtenidos para la región central del Golfo de California (1.5 a 4.0 mg m⁻³; Gendrop-Funes *et al.*, 1978; Gaxiola-Castro *et al.*, 1995). No obstante, Lavaniegos y López (1997) reportaron valores de clorofila a de 1.5 a 3.0 mg m⁻³ en el Canal de San Lorenzo, entre noviembre y febrero. Esta discrepancia entre los valores de este trabajo y los reportados por estos últimos autores puede explicarse por la intensa mezcla, y la fertilización que de ella resulta, ocasionada por la poca profundidad del canal.

En contraste, los valores observados en la bahía en febrero fueron bajos comparados con los de la literatura y con los de noviembre. Debido a que los nutrientes tienen un carácter limitante en latitudes tropicales y subtropicales, sus distribuciones podrían explicar estos bajos valores de biomasa, si en febrero se hubiera presentado una baja disponibilidad de los mismos. Sin embargo, cuando se compararon las distribuciones correspondientes a las dos campañas (Figs. 4. 12 y 4.13) se encontró que sorprendentemente la disponibilidad de nutrientes en febrero fue mayor a la de noviembre. Por ejemplo, durante febrero, la nitratoclina (1 µM) se presentó a una profundidad de solamente entre 10 y 20 m mientras que en noviembre la nitratoclina estaba a 40 m de profundidad. Las distribuciones de fosfatos presentaron un patrón similar, en la cual la limitación por nutrientes se extendió a mayores profundidades en noviembre que en febrero.

Tampoco existen elementos para pensar que la limitación por luz fuese mayor en febrero que en noviembre, puesto que la bahía no tiene aportes significativos de terrígenos, y la reducción de la luz solamente sería función de la profundidad y de la abundancia misma del fitoplancton (autoshading). En virtud de lo anterior, no se identificó una posible explicación para estos bajos valores en función de los principales procesos conocidos como reguladores de la productividad primaria. Por ello, se considera como una posibilidad que estos valores de clorofila *a* se deban a una subestimación de las concentraciones como consecuencia de una degradación de las muestras durante el almacenaje previo a su análisis. Esta alteración podría deberse a que las muestras no se extrajeron inmediatamente y permanecieron en contacto con el aire (aunque congeladas, en sílica gel y en la oscuridad) durante 10 días antes de ser analizadas.

A pesar de ésta posibilidad de subestimación, se identificó que la variación relativa de los valores, sí permitió obtener información sobre los patrones de distribución de la biomasa fitoplanctónica en ese mes en particular (Fig. 4. 17). A lo largo del transecto a_1 - a_2 se observó la presencia de un máximo de clorofila *a* asociado a la termoclina, el cual también estaba presente en la parte este de la sección b_1 - b_2 , entre las secciones 25 y 11, donde la estratificación es mayor.

En noviembre se observó que los dos transectos fueron muy distintos entre sí. La sección c_1 - c_2 no presentó máximos tan evidentes y las concentraciones de clorofila *a* fueron un poco menores a las observadas en la sección d_1 - d_2 , en donde se apreciaron máximos superiores a 0.5 mg m^{-3} (Fig. 4. 17 c y d). En la estación 26 se apreciaron dos máximos: uno a los 30 m de profundidad y el otro a los 50 m (Fig. 4. 17 d). En éstos transectos se presentaron máximos asociados a la termoclina (estación 26; Fig. 4. 17), máximos superficiales (estación 28; Fig. 4. 17) o bien sin máximo evidente (estación 38; Fig. 4.17).

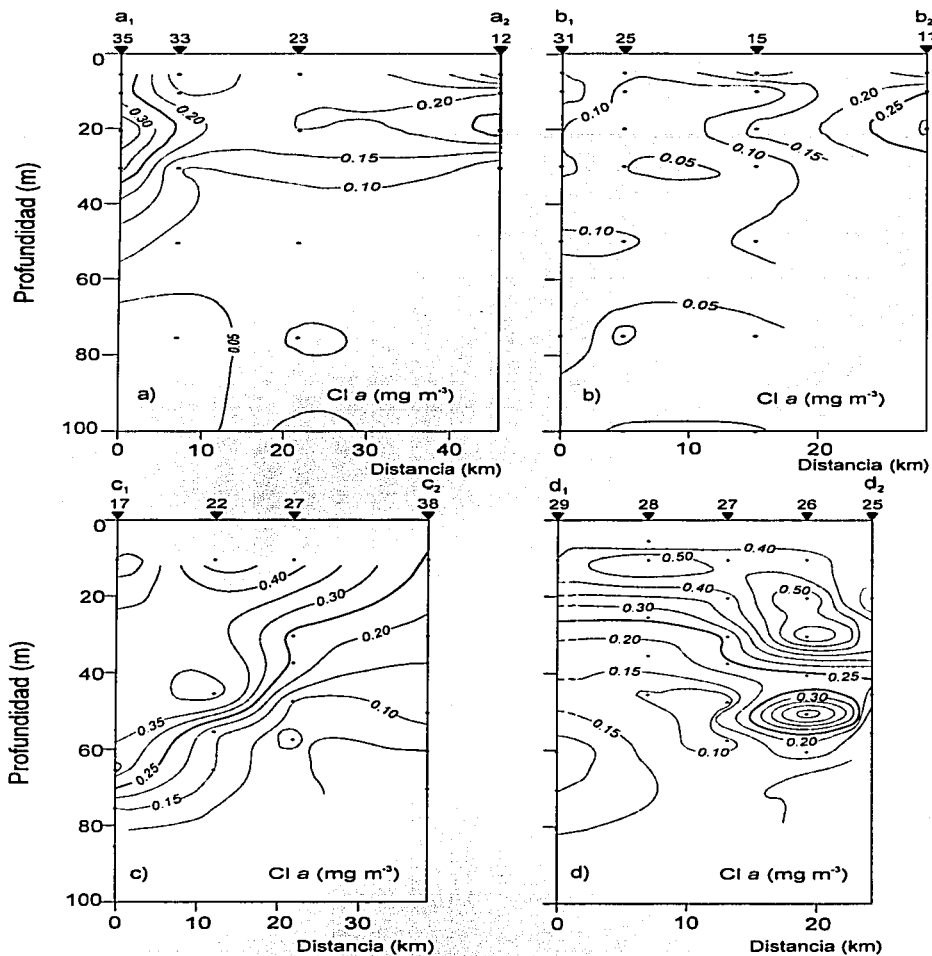


Figura 4. 17. Distribución vertical de la concentración de clorofila *a* en la Bahía de La Paz en 2 muestreos del 2000. a) Transecto a₁-a₂, febrero; b) Transecto b₁-b₂, febrero; c) Transecto c₁-c₂, noviembre; d) Transecto d₁-d₂, noviembre. En la parte superior se indica con triángulos y números la ubicación de las estaciones de muestreo. Las líneas gruesas corresponden a una concentración de 0.25 mg m⁻³.

En función de las características de la distribución vertical (perfiles) de la clorofila *a* en noviembre de 2000, la Bahía de La Paz se dividió en tres zonas que fueron denominadas como: *máximo somero*, *máximo asociado a la termoclina* y *zona de mezcla* (Fig. 4. 18).

El perfil de clorofila *a* representativo de la zona de *máximo somero* mostró que los valores máximos se presentaron alrededor de los 10 m de profundidad; por encima y por debajo de esta profundidad, la biomasa fue más baja. Como ya se había mencionado anteriormente, la capa con mayor concentración de nutrientes se encuentra cercana a la termoclina, por lo que una distribución con un máximo somero sugiere que el reciclamiento es el que permite que se desarrolle un máximo en la superficie, ya que en la capa de mezcla los nutrientes "nuevos" (v.g. nitrato) son incorporados inmediatamente por actividad fotosintética (Fig. 4. 18 a). En la región de Boca Grande predominaron las estaciones con un *máximo somero* de clorofila *a* (Fig. 4.19).

El perfil típico de la zona de *máximo asociado a la termoclina* fue aquel en el que la concentración más elevada de clorofila coincidió con la profundidad de la termoclina, lugar en el que se sabe que las concentraciones de nutrientes no son restrictivas, teniendo como consecuencia un incremento en la biomasa. Sin embargo, el factor que se torna limitante es la luz, particularmente cuando la termoclina es muy profunda (Fig. 4.18 b). La zona de máximo asociado a la termoclina se distribuyó generalmente en el centro de la Bahía de La Paz (Fig. 4. 19), región donde se presentaron los valores más altos del parámetro de estratificación (Φ), que es uno de los factores que han sido señalados como responsables de la formación de los máximos profundos de clorofila (DCM, en inglés). Estos DCMs también pueden formarse por la disminución de la tasa de sedimentación de las células del fitoplancton en la piconclina, por respuestas conductuales y por existencia de un balance entre el régimen de nutrientes y luz, entre otros. (Cullen, 1982; Holligan *et al.*, 1984; Welschmeyer y Lorenzen, 1985;

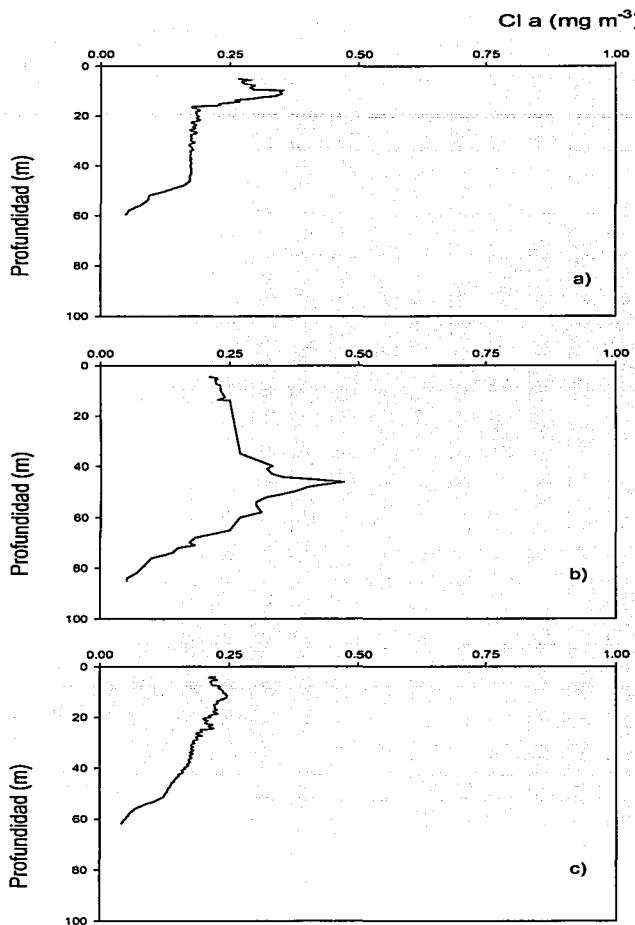


Figura 4. 18. Perfiles representativos de los diferentes tipos de distribución de la clorofila a en la Bahía de La Paz en noviembre del 2000. a) Máximo somero (estación 25); b) Máximo asociado a la termoclina (estación 17) y c) zona de mezcla. (estación 38).

Vandevelde *et al.*, 1987; Humborg, 1997; Tremblay *et al.*, 1997; Agustí y Duarte, 1999).

El perfil característico de la zona de mezcla fue aquel en el que la concentración de clorofila *a* se mantuvo más o menos uniforme en la columna de agua. Esto se debe a que la mezcla distribuye y homogeniza verticalmente tanto a los nutrientes como a la clorofila lo que trae como resultado un balance entre la cantidad de nutrientes y el régimen de luz. (Fig. 4. 18 c). La zona de mezcla se distribuyó en el sur que es una región somera que facilita la acción del oleaje y las mareas en la homogenización de la columna de agua (Fig. 4.19).

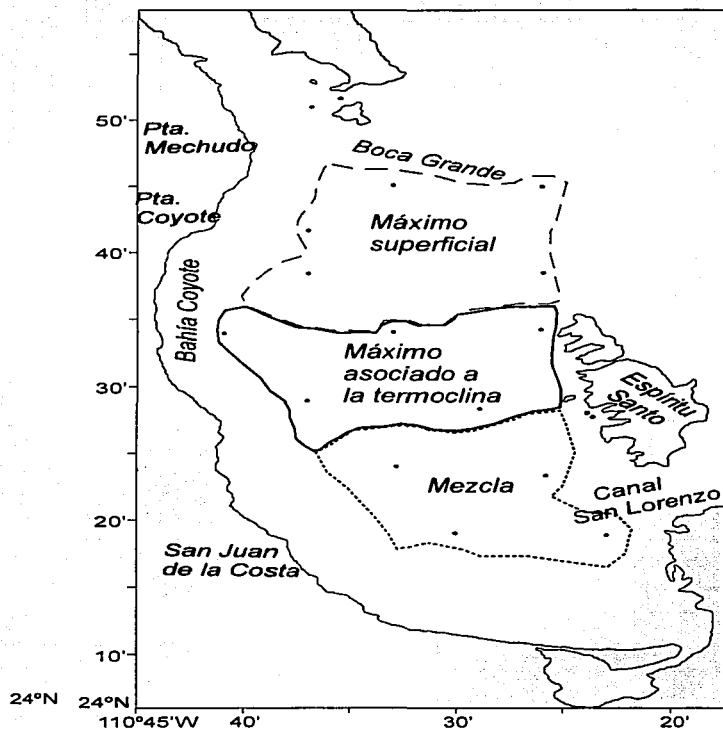


Figura 4. 19. Propuesta de regionalización de la Bahía de La Paz basada en la distribución vertical de la clorofila *a*.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4. 9. Distribución horizontal de la clorofila *a*: integrada y media vertical

Con el fin de observar las variaciones espaciales de la clorofila *a* en toda la Bahía de La Paz, se analizó la distribución horizontal de este pigmento. Para ello se calculó la clorofila integrada verticalmente que es un indicador de la biomasa disponible para sostener el resto de la red trófica. En esta distribución solamente se consideró el juego de datos del crucero de noviembre del 2000. Las integraciones verticales se hicieron entre 10 y 100 m de profundidad o hasta el fondo en estaciones más someras que 100 m.

Los valores de clorofila *a* integrada verticalmente tuvieron un rango de 10.0 a 30.0 mg m⁻². Los valores más altos se presentaron en Bahía Coyote y al noroeste de Espíritu Santo, mientras que los mínimos se presentaron en Boca Grande (Fig. 4. 20 a).

Los elevados valores del sur y oeste de la Bahía de La Paz probablemente se debieron a que se trataba de estaciones someras (50 m), con una mezcla eficiente, que permitieron un adecuado suministro de nutrientes para el fitoplancton.

Al noroeste de Espíritu Santo se presentó un valor elevado de clorofila *a* integrado verticalmente probablemente debido a un flujo ciclónico que se establece cuando el agua entra a la Bahía de La Paz. Los valores mayores a 10.0 mg m⁻² se presentaron sobre el núcleo frío (Figs. 4. 10 y 4. 20 a).

De manera similar a la distribución de clorofila *a* integrada verticalmente, la distribución de clorofila *a* media vertical de noviembre también separó tres zonas en la bahía; la primera hacia el sur y oeste con valores cercanos a 0.5 mg m⁻³; la segunda en el norte, hacia Boca Grande con valores de 0.2 mg m⁻³ y una tercera,

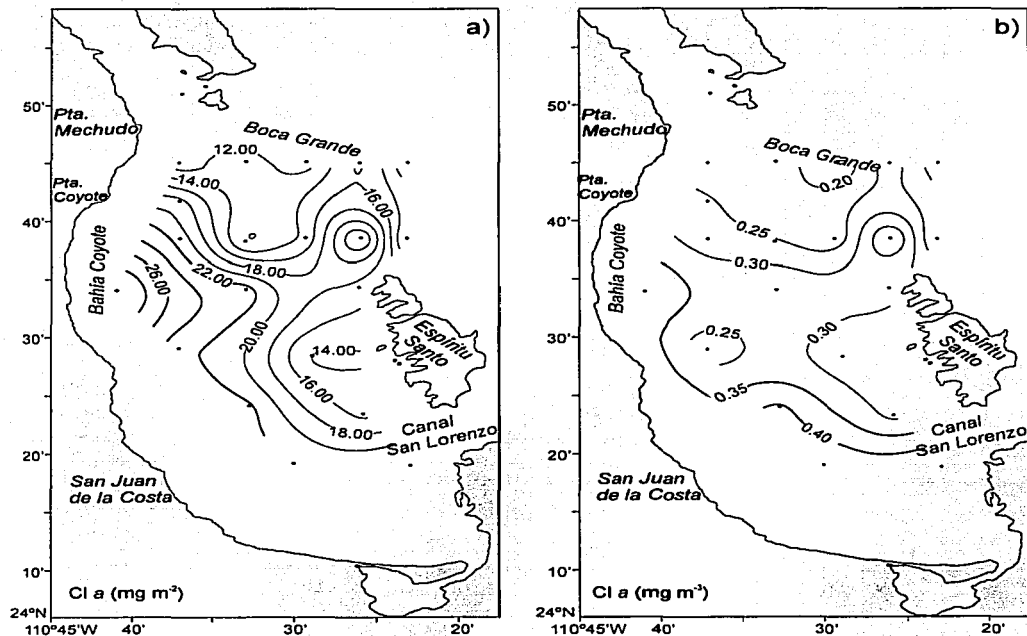


Figura 4. 20. Distribución horizontal de la clorofila *a* en la Bahía de La Paz, en noviembre de 2000. a) Integrada verticalmente (0-100 m); b) Media vertical (0-100 m). Las líneas gruesas indican concentraciones mayores a 20.00 mg m^{-2} y 0.30 mg m^{-3} , respectivamente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

con valores intermedios (0.2 a 0.3 mg m⁻³) que se distribuyeron al suroeste de Espíritu Santo y sobre Cuenca Alfonso (Fig. 4. 20 b). Con esto se observó que las estaciones con una mayor influencia del Golfo de California, presentaron una biomasa más baja.

Para la clorofila *a* integrada verticalmente se ha observado un intervalo de entre 50.0 y 150.0 mg m⁻² en las regiones norte y centro del Golfo de California entre noviembre y enero (Gaxiola-Castro *et al.*, 1995). Esto contrastó con el máximo valor de biomasa integrada verticalmente obtenido en este trabajo (30.0 mg m⁻²) ya que fue de entre la mitad y una quinta parte de lo reportado en la literatura.

En este sentido es importante recordar que las regiones norte y centro del Golfo de California se caracterizan por tener una eficiente mezcla por mareas lo que ocasiona que los nutrientes estén disponibles para el fitoplancton en la zona fótica y por tanto su biomasa aumente (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991); estas condiciones fueron contrarias a lo observado en el sistema estudiado, donde la estratificación fue determinante en la fertilización y biomasa del mismo. Un punto adicional es que Gaxiola-Castro *et al.* (1995) advirtieron un patrón de estratificación de la columna de agua que aumentaba hacia la boca del Golfo de California y que estaba inversamente relacionado con la concentración de clorofila *a*. Es decir, a mayor estratificación menor biomasa. Esto fue lo que observamos en la Bahía de La Paz en noviembre del 2000.

Por otra parte, una vez que se conoció la cantidad de biomasa, se quiso saber que fracción de ésta era funcional (organismos vivos) por lo que se analizó el cociente *feopigmentos: clorofila a*. Los cocientes de distintos pigmentos fotosintéticos y la clorofila *a* proporcionan información acerca de la concentración relativa de ambos tipos de pigmentos y señalan cambios cualitativos y cuantitativos en las comunidades fitoplanctónicas (Vernet y

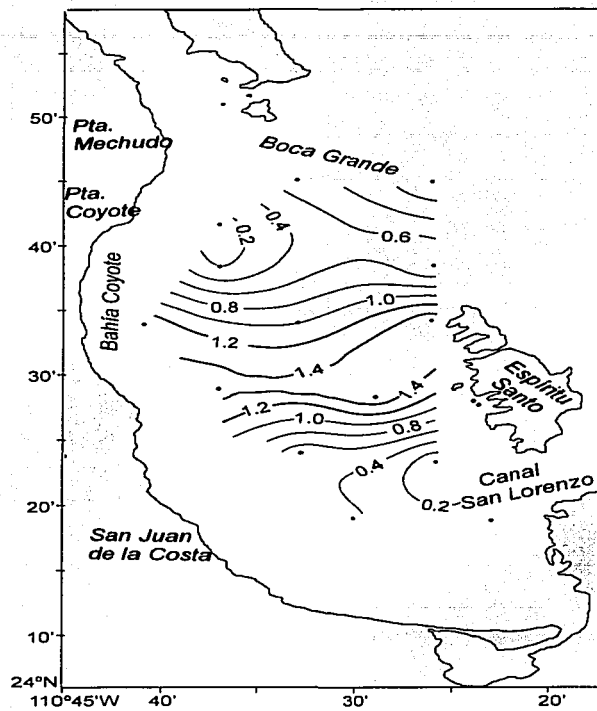
Lorenzen, 1987), así como el estado fisiológico de la comunidad (Wood, 1979; Welschmeyer y Lorenzen, 1985; Falkowski y Raven, 1997; Trees *et al.*, 2000).

La distribución horizontal del cociente feopigmentos: clorofila *a* también mostró que la Bahía de La Paz se encontraba dividida en 3 regiones, en donde la parte central presentó los valores más elevados del cociente, mientras que las regiones norte y sur tuvieron los más pequeños (Fig. 4. 21).

Los valores elevados de este cociente fueron el reflejo de un incremento importante de feopigmentos en la picnoclina, debido a la barrera física que representa el fuerte gradiente de densidad. Sin embargo, no se descarta que también este cociente elevado sea el resultado de células senescentes o bien de pastoreo (Welschmeyer y Lorenzen, 1985). Tomando en cuenta que en la zona centro de la bahía fue donde se registraron los valores más elevados de estratificación (Fig. 4. 8), es lógico que en esa zona el cociente feo: cl *a* hubiera sido máximo (Fig. 4. 21).

Los valores pequeños de la razón pueden deberse por una parte, a la existencia de mezcla eficiente lo que evita la acumulación de feopigmentos, tal parece ser el caso de la zona sur de la Bahía de La Paz. Por otro lado, cuando la concentración de clorofila *a* es mayor a la de feopigmentos, lo que hace que el cociente feo: cl *a* sea pequeño, es factible que se trate de poblaciones jóvenes de fitoplancton. Quizá esto sucedió en la región norte de la bahía (Fig. 4. 21).

Estudios de campo y laboratorio han revelado que las razones entre diversos pigmentos fotosintéticos (cl *b*, cl *1*, cl *2*, carotenoides, feopigmentos) y la clorofila *a* varían como función de la composición taxonómica y el estado fisiológico de las células, que a su vez está modulado por el régimen de nutrientes, temperatura, intensidad y composición espectral de la luz, así como el fotoperíodo (Bidigare *et al.*, 1990; Millie *et al.*, 1993; Bricaud *et al.*, 1995).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 4. 21. Distribución horizontal del cociente feopigmentos: chl a en la Bahía de La Paz, noviembre del 2000. Las líneas gruesas muestran valores del cociente mayores a 1.0.

Teniendo esto en consideración resulta probable que los cambios observados en la distribución del cociente *feopigmentos: chl a* en distintas áreas de la Bahía de La Paz fueron un reflejo de las variaciones tanto ambientales como fisiológicas del fitoplancton actuando a la vez. Sin embargo, las evidencias con que se cuentan en este trabajo tienen que ver solamente con el ambiente físico.

En virtud de los resultados de este trabajo, se sintetiza el funcionamiento propuesto de la Bahía de La Paz observado en los dos muestreos realizados, mediante el siguiente esquema (Fig. 4.22).

a) En febrero la acción del viento fue importante pues promovió mezcla de la capa superficial, aunque no se advirtió ruptura de la termoclina. Como consecuencia de la menor temperatura de la atmósfera respecto a la superficie del mar, la dirección del flujo de calor por conductividad fue del océano a la atmósfera. En este mes la estratificación fue débil y la termoclina se encontró a poca profundidad. La mezcla de la columna impulsó el flujo de nutrientes desde la capa subsuperficial, con lo que se esperaría un aumento en la biomasa. Esto no fue observado, pero puede deberse a la posibilidad de degradación de las muestras, tal y como se discutió anteriormente. La presencia del giro ciclónico tuvo cierto efecto fertilizador en las aguas superficiales, mientras que el giro anticiclónico produjo el resultado contrario. La concentración de oxígeno disuelto por debajo de la termoclina fue mayor a 1.5 ml l^{-1} por lo que no existieron las condiciones para que la denitrificación se llevara a cabo en la bahía en esta fecha.

b) En noviembre la menor intensidad y poca duración del viento produjeron poca mezcla en la capa superficial. La mayor temperatura de la atmósfera respecto a la superficie del mar implicó que la dirección del flujo de calor por conductividad se invirtiera respecto de febrero, por lo que iba de la atmósfera al océano. La estratificación fue intensa y la termoclina se encontraba muy

profunda. La condición de mayor estratificación restringió el flujo de nutrientes desde la capa profunda, por lo que la biomasa fue relativamente baja, con excepción de la zona de mezcla, donde fue un poco mayor. Al igual que en febrero, el giro ciclónico llevó nutrientes hacia la superficie, mientras que el giro anticiclónico los hundió. La estratificación favoreció la reducción del oxígeno disuelto, lo cual a su vez permitió que la denitrificación pudiera realizarse en la bahía.

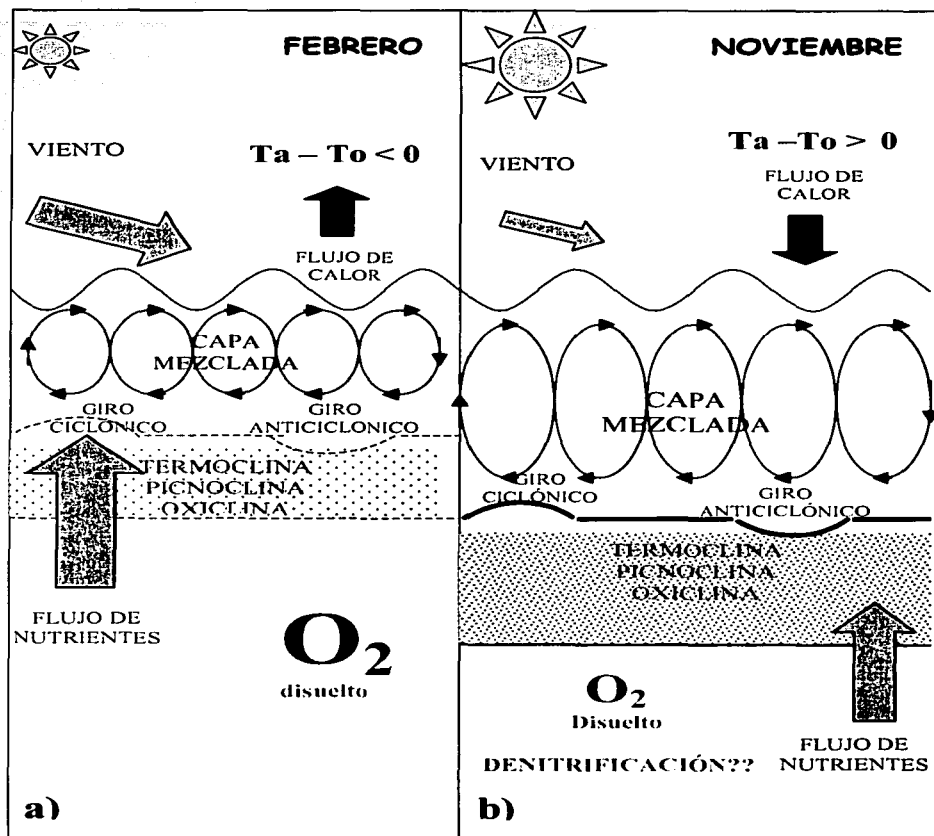


Fig. 4. 22. Esquema propuesto de los procesos que operan en la Bahía de La Paz de acuerdo con los resultados de este trabajo. T_a (temperatura del aire); T_o (temperatura superficial del océano).

Perspectivas a futuro

Si bien este trabajo ayuda a comprender algunos de los procesos que operan en la Bahía de La Paz, también ha permitido identificar la necesidad de estudiar al sistema en los siguientes aspectos:

- 1) La posibilidad de que la Bahía de La Paz sea un sitio de formación del Agua del Golfo de California (AGC). En caso afirmativo, evaluar su contribución al volumen total de AGC en el Golfo de California.
- 2) Evaluar la productividad primaria tomando en consideración la fracción del picoplancton pues en ambientes con una fuerte restricción de nutrientes suelen ser los que tienen mayor contribución.
- 3) Determinar en que medida la denitrificación evidenciada por el déficit de nitrato se lleva a cabo en la bahía o ha ocurrido previamente en el agua que ingresa a la Bahía de La Paz.

TRABAJO ORIGINAL
PÁGINA DE ORIGEN

5. CONCLUSIONES

- Las masas de agua en el interior de la bahía de La Paz, durante febrero y noviembre del 2000 fueron Agua del Golfo de California (AGC) y Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt). En noviembre el AGC ocupó una capa de mayor espesor que en febrero.
- La termoclina en febrero fue más somera que en noviembre, lo cual estuvo asociado al proceso de enfriamiento invernal. Este mismo proceso también explicaría la diferencia en la estratificación de la columna de agua entre febrero (débil estratificación) y noviembre (fuerte estratificación).
- En la bahía de La Paz, se observó un núcleo frío y uno cálido. La circulación ciclónica se presentó cerca de Boca Grande mientras que la anticiclónica se localizó en Bahía Coyote, tanto en febrero como en noviembre del 2000, con vientos predominantes del noroeste en ambos casos.
- La profundidad de la nutriclina y la oxiclina estuvieron asociadas con la profundidad de la termoclina tanto en febrero como en noviembre.
- Las mayores concentraciones de nutrientes en la capa de mezcla coincidieron con los centros de los núcleos fríos, mientras que concentraciones más bajas concordaron con los núcleos cálidos en ambas campañas.
- En noviembre se observó agotamiento del oxígeno disuelto por debajo de la capa mezclada, condición favorable a la denitrificación, que fue consecuencia de la estratificación. El déficit de nitrato encontrado en el agua subsuperficial respaldó esta posibilidad, en ambos muestreos.

- Las concentraciones de clorofila *a* dentro de la bahía de La Paz fueron menores a las reportadas en la Ensenada de La Paz y las porciones norte y centro del Golfo de California. Los datos aquí presentados sugieren que la productividad primaria en la Bahía de La Paz quizá sea menor a lo que se ha reportado.
- La distribución vertical de clorofila *a* en noviembre del 2000 permitió identificar tres zonas dentro de la bahía de La Paz: máximo somero (región norte), máximo asociado a la termoclina (zona centro) y mezcla (sur de la bahía).
- Las distribuciones horizontales de clorofila *a* y de la razón *feopigmentos: clorofila a* también permitieron dividir en tres regiones a la bahía de La Paz, siendo la región sur (mayor mezcla), la de más clorofila *a*, mientras que la zona centro (alta estratificación) tuvo mayor concentración de *feopigmentos*; la zona norte presentó valores intermedios de dicho cociente.
- La estructura vertical de la columna de agua y los procesos que la determinan juegan un papel importante en los procesos de fertilización y productividad en la bahía de La Paz. La mezcla promovió flujos de nutrientes desde la capa profunda y posiblemente un incremento de la biomasa fitoplanctónica. Condiciones de estratificación, por el contrario, retardaron o evitaron el flujo de nutrientes nuevos por lo que la biomasa fitoplanctónica fue baja. La estratificación también favorecería la desnitrificación, en caso de que ésta ocurra en la bahía.

6. LITERATURA CITADA

- Agusí S. y C. Duarte. 1999. Phytoplankton chlorophyll *a* distribution and water column stability in the central Atlantic Ocean. *Oceanol. Acta*, 22(2): 193-203.
- Álvarez, A., H. Rojas y J. Prieto. 1997. Geología de la Bahía de La Paz y áreas adyacentes. In: R. Urban y M. Ramírez (Eds). *La Bahía de La Paz, investigación y conservación*. 13-29.
- Álvarez-Borrego, S. y J. Lara-Lara. 1991. The physical environment of primary productivity of the Gulf of California. In: J. Dauphin y B. Simoneit (Eds). *The Gulf of California and peninsular province of the Californias*. Am. Assoc. Petr. Geol., *Memoir* 47: 555-567.
- Amador, B. 1978. Cultivo experimental de la almeja catarina *Argopecten circularis* en La Ensenada de La Paz, B.C. S., México. Tesis profesional. Esc. Sup. Cienc. Mar. UABC. 26 p.
- Anderson, L. y J. Sarmiento. 1994. Redfield ratios of remineralization determined by nutrient data analysis. *Global Biogeochem. Cycles*, 8: 65-80.
- Arístegui, J., P. Tett, A. Hernández-Guerra, G. Basterreitea, M. Montero, K. Wild, P. Sangra, S. Hernández-León, M. Canton, J. García-Braun, M. Pacheco, M y E. Barton. 1997. The influence of island-generated eddies on chlorophyll distribution: A study of mesoscale variation around Gran Canaria. *Deep-Sea Res.* (1 *Oceanogr. Res. Pap.*), 44(1): 71-96.
- Badán, A. 1997. La Corriente Costera de Costa Rica en el Pacífico Mexicano. In: M. F. Lavín (Ed.). *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*. Monografía No. 3, Unión Geofísica Mexicana. 99-112.
- Barreiro, G. T. y M. Signoret. 1999. *Productividad primaria en sistemas acuáticos costeros*. UAM-Xochimilco. 81 p.
- Bidigare, R., J. Marra, T. Dickey, R. Iturriaga, K. Baker, R. Smith y H. Pak. 1990. Evidence for plankton succession and chromatic adaptation in the Sargasso Sea during spring 1985. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 60: 113-122.
- Bray, N. 1988. Termohaline circulation in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 93: 4993-5020.
- Bricaud, A., M. Babin, A. Morel y H. Claustre. 1995. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parametrization. *J. Geophys. Res.*, 100: 13237-13254.
- Broecker, W. y T. Peng. 1982. *Tracers in the sea*. Eldigio, Lamont-Doherty Geol. Obs. Palisades, New York.
- Castro, R., A. Mascarenhas, R. Durazo y C. Collins. 2000. Variación estacional de la temperatura y salinidad en la entrada del Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 26(4): 561-583.
- Comeau, L., A. Vezina, M. Bourgeois y K. Juniper. 1995. Relationship between phytoplankton production and the physical structure of the water column near Cobb Seamount, northeast Pacific. *Deep-Sea Res.* 1, 42(6): 993-1005.
- Coon, T., M. Lopez, P. Richerson, T. Powell y C. Goldman. 1987. Summer dynamics of the deep chlorophyll maximum in Lake Tahoe. *J. Plankton. Res.*, 11:1185-1189.

- Cullen, J. 1982. The deep chlorophyll maximum: Comparing vertical profiles of chlorophyll a. *Can. Fish. Aquat. Sci.*, 39: 791-803.
- Cushing, D. 1989. A difference in structure between ecosystems in strongly stratified waters and in those that are only weakly stratified. *J. Plankton Res.*, 11: 1-13.
- Devol, A. 1991. Direct measurements of nitrogen gas fluxes from continental shelf sediments. *Nature*, 349: 319-321.
- Dower, J., H. Freeland y K. Juniper. 1992. A strong biological response to oceanic flow past Cobb seamount. *Deep-Sea Res.*, 39: 1139-1145.
- Emlisson, I. Y M. A. Alatorre. 1997. Evidencias de un remolino ciclónico de mesoescala en la parte sur del Golfo de California. Contribuciones a la Oceanografía Física en México. Monografía 3. Unión Geofísica Mexicana. 173-182.
- Falkowski, P. G., D. Ziemann, Z. Kolber y P. Bienfang. 1991. Role of eddy pumping in enhancing primary production in the ocean. *Nature*, 352: 55-58.
- Falkowski, P.G. y J.A. Raven. 1997. *Aquatic photosynthesis*. Blackwell, Sci., USA. 375 p.
- Fofonoff, N. y R. Millard. 1983. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. *UNESCO Technical Papers in Marine Science No. 44*, 53 p.
- Frenette, J., S. Demers, L. Legendre, M. Boulé y J. Dodson. 1994. Mixing, stratification, and the fate of primary production in an oligotrophic multibasin lake system (Quebec, Canada). *J. Plankton Res.*, 18(1): 45-61.
- Gaxiola-Castro, G., J. García-Córdova, J. Valdéz-Holguín, M. Batello-Ruvalcaba. 1995. Spatial distribution of chlorophyll a and primary production in relation to winter physical structure in the Gulf of California. *Cont. Shelf Res.*, 15(9): 1043-1059.
- Gendrop-Funes, V., M. Acosta-Ruiz y R. Schwartzlose. 1978. Distribución horizontal de clorofila a durante primavera en la parte norte del Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 5: 71-89.
- González, E. y R. Saldierna. 1997. Zooplankton de la Bahía de La Paz, B.C.S. (1990-1991). In: R. Urbán y M. Ramírez (Eds.). *La Bahía de La Paz, investigación y conservación*. UABCS-CICIMAR-SCRIPPS. 43-57.
- Grasshoff, K. 1983. Determination of oxygen. In: K. Grasshoff, M. Ehrhardt y K. Kremling (Eds.). *Methods of seawater analysis*. Pub. Verlag Chemie, Germany. 61-72.
- Gruber, N. y J. Sarmiento. 1997. Global patterns of marine fixation and denitrification. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 11(2): 235-266.
- Hagström, A., F. Azam, A. Andersson, J. Wikner y F. Rassoulzadegan. 1988. Microbial loop in an oligotrophic pelagic marine ecosystem: possible roles of cyanobacteria and nanoflagellates in the organic fluxes. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 49: 171-178.
- Hayward, T., J. McGowan. 1985. Spatial patterns of chlorophyll, primary production, macrozooplankton biomass, and physical structure in the central North Pacific Ocean. *J. Plankton Res.*, 7(2): 147-167.
- Holligan, P., W. Balch y C. Yentsch. 1984. The significance of subsurface chlorophyll, nitrite and ammonium maxima in relation to nitrogen for phytoplankton growth in stratified waters of Gulf of Maine. *J. Mar. Res.*, 42: 1051-1073.

- Humborg, C. 1997. Primary productivity regime and nutrient removal in the Danube estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 45: 579-589.
- Huppert, H. y K. Bryan. 1976. Topographically generated eddies. *Deep-Sea Res.*, 23: 655-679.
- Jeffrey, S. y G. Humphrey. 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 y c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochem. Physiol. Pflanz*, 167: 191-194.
- Jiménez-Illescas, A. 1996. Análisis de procesos barotrópicos y baroclínicos en la Bahía de La Paz. B.C.S. Tesis doctoral, UNAM, ICMYL. 193 p.
- Jiménez-Illescas, A., M. Obeso-Nieblas y D. Salas-de León. 1997. Oceanografía física de la Bahía de La Paz. B. C. S. In: R. Urbán y M. Ramírez. (Eds.). *La Bahía de La Paz, investigación y conservación*. UABCS-CICIMAR-SCRIPPS. 31-41.
- Kirk, J. 1983. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 401 p.
- Kirkwood, D. S. 1992. Stability of solutions of nutrient salts during storage. *Mar. Chem.*, 38: 151-164.
- Klausmeier, C. y E. Litchman. 2001. Algal games: The vertical distribution of phytoplankton in poorly mixed water columns. *Limnol. Oceanogr.*, 46: 1998-2007.
- Lavaniegos, B. y D. López-Cortés. 1997. Fatty acid composition and community structure of plankton from the San Lorenzo Channel, Gulf of California. *Estuar., Coast. Shelf Sci.*, 45: 845-854.
- Lavín, A. F., G. Gaxiola-Castro, J. Robles y K. Richter. 1995. Winter water masses and nutrients in the northern Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 100: 8587-8605.
- Lavín, A. F., E. Beier y A. Badan. 1997. Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. In: M. F. Lavín (Ed.). *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*. Monografía No. 3, Unión Geofísica Mexicana. 141-171.
- Legendre, L. y F. Rassoulzadegan. 1995. Plankton and nutrients dynamics in marine waters. *Ophelia*, 41: 153-172.
- Libes, S. 1992. *An introduction to marine biogeochemistry*. John Wiley y Sons, Inc., New York. 734 p.
- Lorenzen, C. J. 1967. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.*, 12: 343-346.
- McGillicuddy, D. y A. Robinson. 1997. Eddy-induced nutrient supply and new production in the Sargasso Sea. *Deep-Sea Res.*, 44(8): 1427-1450.
- Menesguen, A. y T. Hoch. 1997. Modelling the biogeochemical cycles of elements limiting primary production in the English Channel. 1. Role of thermohaline stratification. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 146: 173-188.
- Merino, M. 1992. Afloramiento en la plataforma de Yucatán: Estructura y fertilización. Tesis doctoral. UNAM, ICMYL, UACPyP. 255 p.
- Michaels, A. y M. Silver. 1988. Primary production, sinking fluxes and the microbial food web. *Deep-Sea Res.*, 35: 473-490.

- Millie, D., H. Paerl y J. Hurley. 1993. Microalgal pigment assessments using high performance liquid chromatography: A synopsis of organismal and ecological applications. *Can J. Fish. Aquat. Sci.*, 50: 2513-2527.
- Molina-Cruz, A., L. Pérez-Cruz y A. Monreal-Gómez. 2002. Laminated sediments in the Bay of La Paz, Gulf of California: A depositional cycle regulated by pluvial flux. *Sedimentology*, 49: 1401-1410.
- Monreal-Gómez, M. A. y D. Salas-de León. 1990. Simulación de la circulación en la Bahía de Campeche. *Geof. Inter.*, 29(2): 101-111.
- Monreal-Gómez, M. A., A. Molina-Cruz y D. Salas-de León. 2001. Water masses and cyclonic circulation in bay of La Paz, Gulf of California, during June 1998. *J. Mar. Syst.*, 30(3-4): 305-315.
- Muggli, D., M. Lecourt y P. Harrison. 1996. Effects of iron and nitrogen source on the sinking rate, physiology and metal composition of an oceanic diatom from the subarctic Pacific. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 132: 215-227.
- Nava-Sánchez, E. 1997. Modern fan delta of the west coast of the Gulf of California, Mexico. Ph. D. University Southern California.
- Obeso-Nieblas, M. y A. Illescas-Jiménez. 1989. Propagación de la constituyente M₂ de la marea en la bahía de La Paz, B.C.S., México, mediante un modelo bidimensional hidrodinámico numérico. *Inv. Mar. CICIMAR*, 4(2): 13-32.
- Pérez-Cruz, L. 2000. Estudio paleoceanográfico y sedimentológico holocénico de la Bahía de La Paz, Golfo de California. Tesis Doctoral. UNAM, CCH-UACPyP. 168 p.
- Pickard, G. y W. Emery. 1990. Descriptive physical oceanography. An introduction. Pergamon Press. Oxford, England. 320 p.
- Planas, D., S. Agustí, C. Duarte, T. Granata y M. Merino. 1999. Nitrate uptake and diffusive nitrate supply in the Central Atlantic. *Limnol. Oceanogr.*, 116-126.
- Roden, G. 1972. Thermohaline structure and baroclinic flow across the Gulf of California entrance end in the Revillagigedo Islands region. *J. Phys. Oceanogr.*, 2: 177-183.
- Round, F. E. 1967. The phytoplankton of the Gulf of California. Part I. Its composition, distribution and contribution to the sediments. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, 1: 76-97.
- Rowan, K.S. 1989. *Photosynthetic pigments of algae*. Cambridge University Press. 334 p.
- Salinas, Z., A. Leyva, D. Lluch y E. Díaz. 1990. Distribución geográfica y variabilidad climática de los regímenes pluviométricos en Baja California Sur, México. *Atmósfera*, 3: 217-237.
- Seitzinger, S. 1987. Nitrogen biogeochemistry in an unpolluted estuary: The importance of benthic denitrification. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 37: 65-73.
- Seitzinger, S. 1988. Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystems: Ecological and geochemical significance. *Limnol. Oceanogr.*, 702-724.
- Shaffer, G. y U. Rønner. 1984. Denitrification in the Baltic proper deep water. *Deep-Sea Res.*, 31: 197-220.
- Simpson, J., D. Hughes y N. Morris. 1977. The relation of seasonal stratification to tidal mixing on the continental shelf. *Deep-Sea Res.*, 24(suppl.): 327-340.

- Signoret, M. y H. Santoyo. 1980. Aspectos ecológicos del plancton de la Bahía de La Paz, Baja California. *An. Centro Cienc. del Mar y Limnol.*, 7(2): 217-248.
- Smith, R. y K. Baker. 1985. Spatial and temporal patterns in pigment biomass in Gulf Stream warm core ring 82B and its environs. *J. Geophys. Res.*, 104: 13359-13379.
- Strickland, J. D. y T. R. Parsons. 1972. A practical handbook of seawater analysis. *Fish. Res. Bd. Canada. Bull.* 167. 310 p.
- Torres-Orozco, E. 1993. Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México. 80 p.
- Trees, C., D. Clark, R. Bidigare, M. Ondrusek y J. Müller. 2000. Accessory pigments versus chlorophyll a concentrations within the euphotic zone: A ubiquitous relationship. *Limnol. Oceanogr.*, 45(5): 1130-1143.
- Tremblay, J., L. Legendre y J. Thériault. 1997. Size-differential effects of vertical stability on the biomass and production of phytoplankton in a large estuarine system. *Estuar. Coast Shelf Sci.*, 45: 415-431.
- Treguer, P. y P. LeCorre. 1974. Manuel d'analyse des sels nutritifs dans l'eau de mer. Université de Bretagne Occidentale.
- Turk, D., M. Lewis, G. Harrison, T. Kawano e I. Asanuma. 2001. Geographical distribution of new production in the western/central equatorial Pacific during El Niño and non El Niño conditions. *J. Geophys. Res.*, (C. oceans) 106 (C3): 4501-4515.
- Tyrrel, T. y C. Law. 1997. Low nitrate: phosphate ratios in the global ocean. *Nature*, 387: 793-796.
- Vandevelde, T., L. Legendre, J. Thériault, S. Demers y A. Bah. 1987. Subsurface chlorophyll maximum and hydrodynamics of the water column. *J. Mar. Res.*, 45: 377-396.
- Vernet, M. y C. Lorenzen. 1987. The presence of chlorophyll b and phaeopigments in marine phytoplankton. *J. Plank. Res.*, 9(2): 255-265.
- Welschmeyer, N. y C. Lorenzen. 1985. Chlorophyll budgets: Zooplankton grazing and phytoplankton growth in a temperate fjord and the Central Pacific Gyres. *Limnol. Oceanogr.*, 30: 1-21.
- Wood, A. 1979. Chlorophyll a:b ratios in marine planktonic algae. *J. Phycol.*, 15: 330-332.
- Yacobi, Y., T. Zohary, N. Kress, A. Hetch, R. Robarts, M. Waiser, A. Wood y W. Li. 1995. Chlorophyll distribution throughout the southeastern Mediterranean in relation to the physical structure of the water mass. *J. Mar. Syst.*, 6: 179-190.
- Yilmaz, A. y S. Tugrul. 1998. The effect of cold and warm-core eddies on the distribution and stoichiometry of dissolved nutrients in the northeastern Mediterranean. *J. Mar. Systems*, 16: 253-268.