

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



**VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE NUTRIENTES EN
LAGUNA OJO DE LIEBRE, BAJA CALIFORNIA SUR, DURANTE
DOS ESTACIONES
(PRIMAVERA Y OTOÑO)**



**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
O C E A N Ó L O G O
PRESENTA:**

ANGELES DEL PILAR BONILLA GUTIÉRREZ

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, ABRIL DE 2006.

RESUMEN

Las lagunas costeras representan algunas de las áreas litorales de mayor potencial productivo. Las características fisicoquímicas fluctúan más rápidamente que las del océano abierto, debido a una dinámica ocasionada por la interacción de la marea, el viento y la morfología del sistema (Kennish, 1986), por lo tanto es de suma importancia explicar las características fisicoquímicas y su variabilidad espacio-temporal en las lagunas para su conservación y un manejo integral del sistema. Frecuentemente son ricas en nutrientes, pero las variaciones estacionales de éstos son amplias (Mee, 1978; Contreras, 1985). La zona costera de Baja California tiene un considerable número de lagunas costeras. Un ejemplo de esto, es la Laguna de Ojo de Liebre, que además de ser una fuente importante de recursos pesqueros, es una zona de reproducción de muchas especies de gran importancia. Sin embargo, los estudios sobre nutrientes han quedado sin cubrir, siendo éstos los que sustentan la productividad orgánica primaria, de gran importancia para un sistema lagunar.

El objetivo de este trabajo es describir espacial y temporalmente las variables hidroquímicas (salinidad y temperatura), así como la de los nutrientes para determinar si está influenciada por procesos físicos (acción de mareas y viento) o por procesos biológicos; mediante dos muestreos para la estación de primavera (2000) y otoño (2001), en la Laguna de Ojo de Liebre, B.C.S.

La distribución espacial de las variables hidrológicas en ambos muestreos indica que la Laguna Ojo de Liebre es un sistema antiestuarino. Se sugiere que el aporte de nutrientes nitrogenados en el mes de marzo es externo (oceánico), y que son remineralizados en la cabeza de la laguna. En la marea viva de marzo, el aumento de la concentración de clorofila, la disminución de nitrógeno inorgánico y la sobresaturación de oxígeno hacia la cabeza de la laguna sugieren un florecimiento fitoplanctónico. En la marea muerta de noviembre, hay grandes concentraciones de clorofila que coinciden también con zonas de baja concentración de nitratos. En noviembre el nitrógeno inorgánico depende principalmente de la cantidad de amonio. Se observa una tendencia al aumento de concentración hacia el centro de la laguna, lo que sugiere que el amonio es remineralizado a partir de la materia orgánica por acción bacteriana (nitrificación)

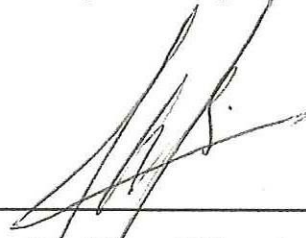
La razón N/P < 10, calculada en ambos muestreos indica que la productividad primaria en la Laguna Ojo de Liebre está determinada por la concentración de nitrógeno inorgánico.

El análisis de agrupamientos en marzo del 2000 y noviembre del 2001 nos permitió dividir a la Laguna Ojo de Liebre en tres zonas diferente por su temperatura y salinidad (densidad): el área de la boca, con las mismas características del agua oceánica adyacente, una zona de transición en la zona intermedia, y la cabeza de la laguna, con aguas hiperasalinas.

**VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE NUTRIENTES EN
LAGUNA OJO DE LIEBRE, BAJA CALIFORNIA SUR, DURANTE
DOS ESTACIONES (PRIMAVERA Y OTOÑO)**

**T E S I S
QUE PRESENTA:
ANGELES DEL PILAR BONILLA GUTIÉRREZ**

Aprobada por:

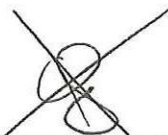


Presidente del jurado:

M. C. Sergio Raúl Canino Herrera



**Sinodal propietario:
Dr. Manuel Salvador Galindo Bect**



**Sinodal Propietario:
M.C. José Antonio Segovia Zavala**

Dedicatoria

...A mis padres, quienes son el ejemplo de que el amor es la fuerza más grande que existe y aunque unas cuantas páginas no sean nada comparado con toda una vida dedicada a sus hijos, espero que se sientan orgullosos de que todos los esfuerzos hayan valido la pena. Gracias por haberme brindado su apoyo incondicional a pesar de todo...

...A mi hermano, porque todos nuestros logros y fracasos son siempre compartidos...

...

...A mis amigos de siempre, quienes a pesar del tiempo y la distancia nunca han dejado de estar en mi corazón...y que hacen que los malos momentos sean más fáciles.

...A los nuevos amigos para los que siempre habrá espacio....

...A K, porque nunca es un error arriesgarse a ver más allá de lo predecible...

...Y a todos los personajes incidentales en el escenario de esta obra, aquellos que en un instante hacen que la vida sea diferente...

Agradecimientos

Al M.C. Raúl Canino Herrera por haber dirigido este trabajo, y quien siempre tiene una respuesta para todo.

Al Dr. Salvador Galindo Bect y al M.C. Antonio Segovia por sus aportaciones tan acertadas.

A Marine Algalita Foundation por haber hecho posible esta investigación.

A la Dr. Elizabeth Orellana por todo su apoyo.

Al M.C. Eliseo Almanza Heredia que hizo posible todo esto, porque sin principios no habría finales...

A la Dra. Irma Soria, Francisco Aranda, Francisco Ley, y a todos aquellos quienes hicieron que aprender fuera interesante.

A Lucina, por ser la mejor amiga del mundo.

A Pao, Gina, Cei, Iván, Monch, Manu, Vicens y Dany, que siempre van a estar ahí incondicionalmente...

A Gina, Esteban, Koko, Mau, Amílcar, Charlie, Pedro, Javier....y a todos aquellos que de alguna manera han hecho este viaje más fácil.

ÍNDICE

RESUMEN	I
ÍNDICE	V
LISTA DE TABLAS	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	3
HIPÓTESIS	4
OBJETIVOS	5
Objetivos Generales:.....	5
Objetivos Particulares:.....	5
DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	5
METODOLOGÍA	7
Muestreo:	7
Métodos de análisis:.....	8
RESULTADOS:	11
Condiciones del estudio.....	11
Hidrografía	12

Temperatura:	12
Salinidad:	15
Densidad (σ_T):	18
NUTRIENTES	20
Nitratos (NO_3):	20
Nitritos (NO_2):	23
Amonio (NH_4):	26
Fosfatos (PO_4):	29
Variables Bioquímicas	35
Oxígeno disuelto:	35
Clorofilas:	38
Análisis de variables	39
Razón NP y Ley del Mínimo de Leibig :	45
Análisis de agrupamientos:	47
DISCUSIÓN	51
CONCLUSIONES	56
REFERENCIAS:	53

LISTA DE TABLAS

- Tabla I. Características de las curvas de calibración de las metodologías empleadas para el análisis de nutrientes 10
- Tabla II. Desviación aceptable y resolución de los sensores montados en el CTD marca Idronaut, modelo 316 (tomado de la hoja de calibración del equipo, 2001).. 10
- Tabla III. Estadística descriptiva y miembros de las zona identificadas con el análisis de agrupamiento hecho con los valores de temperatura y salinidad para la Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000. Donde X es el promedio, S es la desviación estándar y n es el número de datos para cada variable. 48
- Tabla IV. Estadística descriptiva y miembros de las zona identificadas con el análisis de agrupamiento hecho con los valores de temperatura y salinidad para la Laguna Ojo de Liebre, para noviembre de 2001. Donde X es el promedio, S es la desviación estándar y n es el número de datos para cada variable..... 50
- Tabla V. Estadística descriptiva de la zona identificada con el análisis de agrupamiento hecho con los valores de temperatura y salinidad para la Laguna Ojo de Liebre, en marzo del 2000. Donde X es el promedio, S es la desviación estándar, % Var es el porcentaje de variabilidad y n es el número de datos para cada variable. 52
- Tabla VI. Estadística descriptiva de las zona identificadas con el análisis de agrupamiento hecho con los valores temperatura y salinidad para la Laguna Ojo de Liebre, en noviembre de 2001. Donde X es el promedio, S es la desviación estándar, %Var es el porcentaje de variabilidad y n es el número de datos para cada variable..... 52

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Localización del área de estudio y de Laguna Ojo de Liebre, Baja California Sur, México (Arriba: Imagen de Satélite Landsat TM, Abajo: Imagen GoogleEarth)..... 6
- Figura 2. Localización de las estaciones de muestreo en Laguna Ojo de Liebre, B.C.S: (a) marzo de 2000, (b): noviembre de 2001..... 9
- Figura 3. Altura de marea en metros, durante el periodo de muestreo (a) 24 al 27 de marzo de 2000. (b) 7 y 8 de noviembre de 2001 (Tomado de predicción de mareas de CICESE: <http://oceanologia.cicese.mx/>)..... 11
- Figura 4. Distribución horizontal superficial de la temperatura en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre. 13
- Figura 5. Distribución vertical de la temperatura a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte posterior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura)..... 14
- Figura 6. Distribución horizontal superficial de la salinidad en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre. 16
- Figura 7. Distribución vertical de la salinidad a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte posterior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura)..... 17
- Figura 8. Distribución vertical de la densidad (σ_T) a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte posterior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura) 19
- Figura 9. Distribución horizontal superficial de la concentración de nitratos en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre. 21
- Figura 10. Distribución vertical de la concentración de nitratos (NO_3) a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte posterior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura)..... 22
- Figura 11. Distribución horizontal superficial de la concentración de nitritos en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre. 24

- Figura 12. Distribución vertical de la concentración de nitritos (NO_2) a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte posterior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura)..... 25
- Figura 13. Distribución horizontal superficial de la concentración de amonio (NH_4) en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre..... 27
- Figura 14. Distribución vertical de la concentración de amonio (NH_4) a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte inferior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura)..... 28
- Figura 15. Distribución horizontal superficial de la concentración de fosfatos (PO_4) en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre..... 30
- Figura 16. Distribución vertical de la concentración de fosfatos (PO_4) a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte inferior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura)..... 31
- Figura 17. Distribución horizontal superficial de la concentración de silicatos (SiO_4) en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre..... 33
- Figura 18. Distribución vertical de la concentración de silicatos (SiO_4) a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte inferior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura)..... 34
- Figura 19. Distribución horizontal superficial de la concentración de oxígeno en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre. 36
- Figura 20. Distribución vertical de la concentración de oxígeno a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte inferior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura)..... 35
- Figura 21. Distribución horizontal superficial de la concentración de clorofilas en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre. 40
- Figura 22. Distribución vertical de la concentración de clorofilas a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte inferior del eje de las X representan la

distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura)..... 39

- Figura 23. Relación entre la salinidad y la temperatura en la laguna de la Laguna Ojo de Liebre en: a).-marzo 2000 y b).-noviembre 2001. Los círculos rojos corresponden la superficie, los círculos amarillos al fondo y la línea azul a la tendencia..... 43
- Figura 24. Relación entre los nitratos, nitritos y amonio, y la salinidad en la Laguna Ojo de Liebre. El muestreo de marzo de 2000 está representado con rojo y el de noviembre de 2001 con amarillo..... 44
- Figura 25. Relación entre la concentración de oxígeno disuelto y la concentración de clorofila "a en Laguna Ojo de Liebre. Los círculos rojos representan el muestreo de marzo de 2000 y los amarillos el de noviembre de 2001..... 46
- Figura 26. Zonas de la Laguna de Ojo de Liebre identificadas por su temperatura y salinidad correspondientes al muestreo de marzo 2000 (Las áreas coloreadas indican los zonas identificadas con el análisis cluster)..... 48
- Figura 27. Zonas de la Laguna de Ojo de Liebre identificadas por su temperatura y salinidad correspondientes al muestreo de noviembre de 2001 (Las áreas coloreadas indican los zonas identificadas con el análisis cluster)..... 50

VARIACION ESPACIAL Y TEMPORAL DE NUTRIENTES EN LAGUNA OJO DE LIEBRE, BAJA CALIFORNIA SUR, DURANTE DOS ESTACIONES (PRIMAVERA Y OTOÑO)

INTRODUCCIÓN

Las lagunas costeras son ecosistemas muy complejos y variables, tanto espacial como temporalmente (Álvarez-Borrego *et al.*, 1977). Además son zonas importantes para la alimentación y crianza de muchas especies, ya que contienen un gran número y variedad de hábitats, son altamente productivas y de baja incidencia de predadores (Day y Yáñez, 1985), por lo que representan áreas litorales de un potencial productivo. Es importante resaltar que las características fisicoquímicas fluctúan más rápidamente que las del océano abierto, debido a una dinámica ocasionada por la interacción de la marea, el viento y la morfología del sistema (Kennish, 1986). Como consecuencia, el tiempo de residencia del agua en el interior de la laguna está determinado por las mareas y la dinámica del mar adyacente (Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego, 1982), así como el agua que intercambia la laguna con el exterior (Gilmartin y Revelante, 1978). Por lo tanto es de suma importancia entender y explicar las características fisicoquímicas en las lagunas, así como su variabilidad espacio-temporal para su conservación y manejo integral del sistema.

Una característica de las lagunas costeras es el gran contenido de materia orgánica que hace oscilar notablemente las variaciones diarias de oxígeno disuelto (Edwards, 1979; Mee, 1978). Por la elevada productividad, frecuente en estos ecosistemas, la depositación de materia orgánica hacia los sedimentos es considerable y ésta requiere de mucho oxígeno para su descomposición. La buena mezcla de agua en las lagunas costeras ofrece volúmenes suficientes de este elemento, aunque los

sedimentos son anóxicos inmediatamente debajo de la capa superficial de sedimento (Contreras, 1985).

Estos ecosistemas manifiestan una marcada individualidad, sin embargo, están regidas por algunos factores comunes a todas ellas como el considerable contenido de sales inorgánicas que propicia una elevada productividad así como los procesos de mezcla (Contreras, 1985). Dentro de los compuestos inorgánicos disueltos denominados nutrientes o micronutrientes se encuentran las sales de nitrógeno (nitratos, nitritos y amonio), del fósforo (ortofosfatos principalmente) y silicatos, suplementos básicos para la producción primaria. Además, ciertos metales traza (hierro, cobre, zinc, manganeso, vanadio y molibdeno) son esenciales para los sistemas enzimáticos de los productores primarios (De la Lanza-Espino, Cáceres-Martínez, 1994).

Un común denominador de las lagunas costeras es que son ricas en nutrientes (Mee, 1978). Asimismo, el constante forzamiento provee a la columna de agua de nutrientes del fondo casi todo el año, suceso fundamental para la productividad primaria del cuerpo acuático (Colombo, 1977). Las variaciones estacionales de los nutrientes son amplias. Las concentraciones mínimas se detectan después del florecimiento fitoplanctónico (Contreras, 1985).

El estudio biogeoquímico (desde el punto de vista geológico, biológico y químico) de los compuestos del nitrógeno y fósforo ha tenido una connotación asociada a la productividad orgánica primaria de las lagunas, y esto se debe a la micro y macrovegetación, que constituyen la base principal de la trama trófica. La materia orgánica elaborada por los productores primarios representa una energía directa para los consumidores, mientras que la materia orgánica disuelta en distintos grados de degradación, representa una energía potencial para los heterótrofos.

ANTECEDENTES

La zona costera de Baja California tiene un considerable número de lagunas costeras. Según Lankford (1977), en la costa del Pacífico de la Península de Baja California existen 16 lagunas costeras: Estero San Miguel, Estero de Punta Banda, Laguna Vicente Guerrero, Bahía San Quintín, Laguna Manuela, Laguna Guerrero Negro, Laguna Ojo de Liebre, Bahía Tortuga, Laguna Abreojos, Estero Ballenas, Laguna San Ignacio, Estero San Benito, Laguna San Gregorio, Laguna Santo Domingo, Bahía Magdalena y Bahía Almejas, todas ellas con características geomorfológicas similares (Contreras, 1985).

Algunas de estas lagunas representan una gran importancia para la migración de aves y mamíferos (Page *et al.*, 1997; Palacios *et al.*, 1994; Fleischer, 1990) como en el caso de la Laguna de Ojo de Liebre la cual forma parte de la reserva de la Biosfera MAB-UNESCO, El Vizcaíno, declarándose esta zona como patrimonio de la humanidad (Diario Oficial de la Federación, 1988; Álvarez-Borrego; Granados-Guzmán, 1992). Además de ser una fuente importante de recursos pesqueros, la Laguna de Ojo de Liebre es una zona de reproducción y crianza de la Ballena Gris *Eschrichtius robustus*, así como zona de forraje para algunas tortugas (entre ellas, *Chelonia mydas*, *Eretmochelys imbricata* y *Lepidochelys olivacea*). Otras especies de interés que se presentan en esta laguna, son algunas aves como *Falco peregrinus*, *Pandion haliaetus*, la branta negra, los cormoranes, el delfín *Tursiops truncatus* y el león marino *Zalophus californianus* (Swarts, 1981). Asimismo, la Laguna Ojo de Liebre está considerada todavía en estado prístino altamente productiva, con una diversidad de ambientes que representan áreas de protección y sustento a millones de aves migrantes (Ibarra-Obando *et al.*, 2001).

Las principales actividades que se desarrollan en esta laguna son la pesca doméstica-artesanal, así como el turismo de avistamiento y la actividad industrial por la extracción de sal, la cual es de importancia nacional e internacional (Carmona y Danemann, 1998).

La laguna de Ojo de Liebre ha sido estudiada principalmente en aspectos de su geología (Iman, 1966), transporte litoral (Marinone y Lizárraga-Arciénega, 1982), sedimentos (Phleger y Erwing, 1962), temperatura (Álvarez-Borrego *et al*, 1992), clorofilas (Millán-Núñez *et al*, 1987), fitoplancton (Millán-Núñez *et al.*, 1987), bentos (Sarur *et al.*1984), cianobacterias (Javor y Castenholz, 1981), nemátodos (Gómez, 1983), Briozoarios (Soule y Soule, 1964) y la ballena gris y aves migratorias (Jones *et al.*, 1984; Castellanos y Llinas, 1991).

En los estudios referentes a la calidad del agua de esta laguna destaca el realizado por Millán-Núñez *et al.* (1987); en el cual se reporta que la temperatura y la salinidad se incrementan hacia el interior de la laguna con gradientes de 15 a 18 °C y de 32 a 41 ‰ de salinidad. Estos cambios los atribuyen a la disminución de la profundidad en la boca de la laguna y a la incidencia de la radiación solar que provoca un incremento en la temperatura, lo que ocasiona un aumento en la evaporación y la salinidad. La variación diurna de la temperatura y la salinidad fue inversa a la marea.

Sin embargo, los estudios sobre nutrientes han quedado sin investigar, siendo éstos los que sustentan la productividad orgánica primaria.

Por lo tanto, esta investigación pretende contribuir a incrementar el conocimiento de las variables ambientales hidrológicas, principalmente a lo que se refiere al contenido de nutrientes (nitratos, nitritos, amonio, fosfatos y silicatos) y a la hidrología de la Laguna Ojo de Liebre (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, etc.).

HIPÓTESIS

Debido a que en la Laguna Ojo de Liebre las mareas son semidiurnas y de gran amplitud, la corriente de marea producirá una mezcla vertical sobre el canal principal y se verá reflejada en la distribución y variación de los nutrientes.

OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERALES:

Describir espacial y temporalmente las variables hidroquímicas (salinidad y temperatura), así como la de los nutrientes para determinar si está influenciada por procesos físicos (acción de mareas y viento) o por procesos biológicos; mediante dos muestreos para la estación de primavera (2000) y otoño (2001), en la Laguna de Ojo de Liebre, B.C.S.

OBJETIVOS PARTICULARES:

- Determinar la variabilidad horizontal y vertical de los nutrientes dentro de la Laguna de Ojo de Liebre en dos muestreos diferentes.
- Identificar el nivel de influencia de los factores físicos sobre los nutrientes mediante los cambios de salinidad, temperatura y densidad.
- Identificar la razón de N:P en la laguna.
- Identificar la variabilidad de nutrientes en relación con la biomasa fitoplanctónica, utilizando correlaciones con la concentración de clorofila.
- Determinar la naturaleza de algunos de los factores que afectan la concentración de nutrientes dentro de la laguna.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Laguna Ojo de liebre se localiza aproximadamente a 600 Km. al sur de la frontera internacional con los Estados Unidos, entre 27°35' y 27°55' Norte y entre 113°50' y 114°20' oeste (Fig. 1). Esta Laguna forma parte del complejo Lagunar de Guerrero Negro, Baja California Sur, en la costa del Pacífico adyacente a la Bahía de Sebastián Vizcaíno.

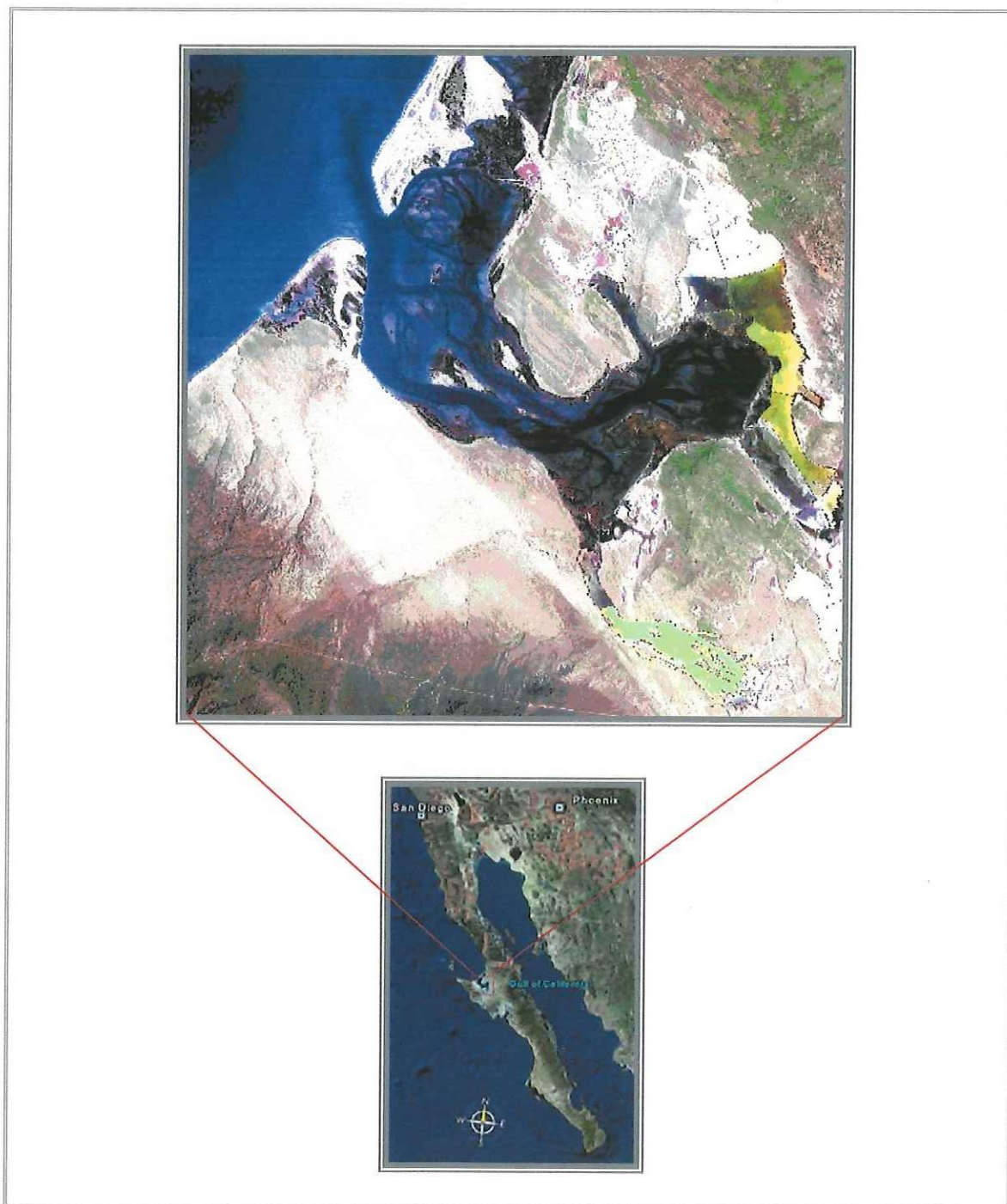


Figura 1. Localización del área de estudio y de Laguna Ojo de Liebre, Baja California Sur, México (Arriba: Imagen de Satélite Landsat TM, Abajo: Imagen GoogleEarth).

Esta laguna forma parte de la reserva de la biosfera El Vizcaíno-Ojo de Liebre, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 30 de enero de 1988 (Álvarez-Borrego y Granados-Guzmán, 1992). El área de la laguna es de 57,100 ha (Carmona y Danemann, 1998). El clima de la región es árido, con lluvias escasas durante el invierno y apenas rebasan los 100 mm³ anuales (Salinas-Zavala *et al.*, 1991).

La laguna de Ojo de Liebre tiene una boca que comunica permanentemente con Bahía Vizcaíno. Su batimetría es muy irregular con una gran cantidad de bajos e islas planas (Fig. 1) que se cubren y descubren periódicamente con la marea, sin embargo se presentan canales con profundidades hasta 20 m. La amplitud de la marea es de aproximadamente 3 m. Las corrientes en la parte baja muestran velocidades de 1.29 m s⁻¹, en la parte media de 0.78 a 1 m s⁻¹ en la interna de 0.17 a 0.78 m s⁻¹ (Phleger y Erwing, 1962; Contreras, 1988). Existe un retraso de marea de aproximadamente 3 horas, entre la entrada y la cabeza de la laguna.

La laguna está circundada por la planicie del Vizcaíno, que está cubierto en su mayor parte por material halófito de 30 a 60 cm de altura, careciendo totalmente de vegetación en algunos sitios. Los márgenes de la laguna están formados por dunas inestables y marismas cubiertas por *Spartina foliosa* y *Salicornia bigelovii* (Bostic, 1975) salitrales y matorral halófito (Castellanos y Llinas, 1991).

El uso del lugar está relacionado con la extracción de sal, pesca artesanal y extracción de almeja, además de actividad recreativa, turístico, avistamiento de ballenas y aves; con las limitantes que exige un área natural protegida.

METODOLOGÍA

MUESTREO:

Se realizó un muestreo sinóptico en la primavera del año 2000 y el otoño del 2001 a bordo de la embarcación oceanográfica "ALGUITA" propiedad de Algalita Marine Research Foundation. El diseño experimental incluyó a) la ubicación de las estaciones de muestreo a lo largo del canal principal dado que el mayor volumen de

agua se moviliza a través de él, b) la diferencia de condiciones hidrográficas entre la boca de la laguna y su cabeza, c) la variación vertical de los procesos que afectan la distribución de las variables fisicoquímicas.

El muestreo se realizó el 24, 25, 26 y 27 de marzo del 2000 y el 7 y 8 de noviembre del 2001 (Fig. 2). Se colectaron muestras superficiales y de la columna de agua (5, 10, 20 y 40 m), con botellas Niskin de 5 L de capacidad, siempre que la profundidad del punto de muestreo lo permitió. Las muestras para la determinación de nutrientes inorgánicos: nitratos (NO_3), nitritos (NO_2), amonio (NH_4), fosfatos (PO_4) y silicatos (SiO_4) se almacenaron en botellas de polietileno de alta densidad de 250 ml y se mantuvieron congeladas a -20°C hasta su análisis en el laboratorio.

En cada punto de muestreo se efectuaron mediciones *in situ* de temperatura ($^\circ\text{C}$), salinidad (S ‰), oxígeno disuelto (O_2), pH y clorofila con un perfilador hidrológico (CTD) marca IDRONAUT modelo 316.

MÉTODOS DE ANÁLISIS:

En las muestras de agua discretas, el oxígeno se analizó con el método microwinkler (Parsons *et. al.*, 1984). La precisión de tres réplicas fue de ± 0.01 mg O_2 /l. El pH se midió con un potenciómetro Orion modelo 720A de acuerdo al método descrito por Dickson (1993). El pH fue corregido por la temperatura de acuerdo a Fhurmann y Zirino (1988). La precisión con éste método fue de ± 0.01 unidades de pH.

Se evaluó en nitrógeno y fósforo total mediante la digestión del material orgánico con persulfato de amonio para el subsecuente análisis de los nutrientes inorgánicos (nitratos, nitritos, amonio, fosfatos y silicatos) siguiendo los métodos espectrofotométricos descritos en Grasshoff (1983). Estas mediciones se realizaron utilizando celdas de cuarzo de un centímetro de espesor en un espectrofotómetro Spectronic modelo 301. La precisión y los límites de detección fueron evaluados a partir de 15 curvas de calibración para cada nutriente. Los resultados se muestran en la tabla I.

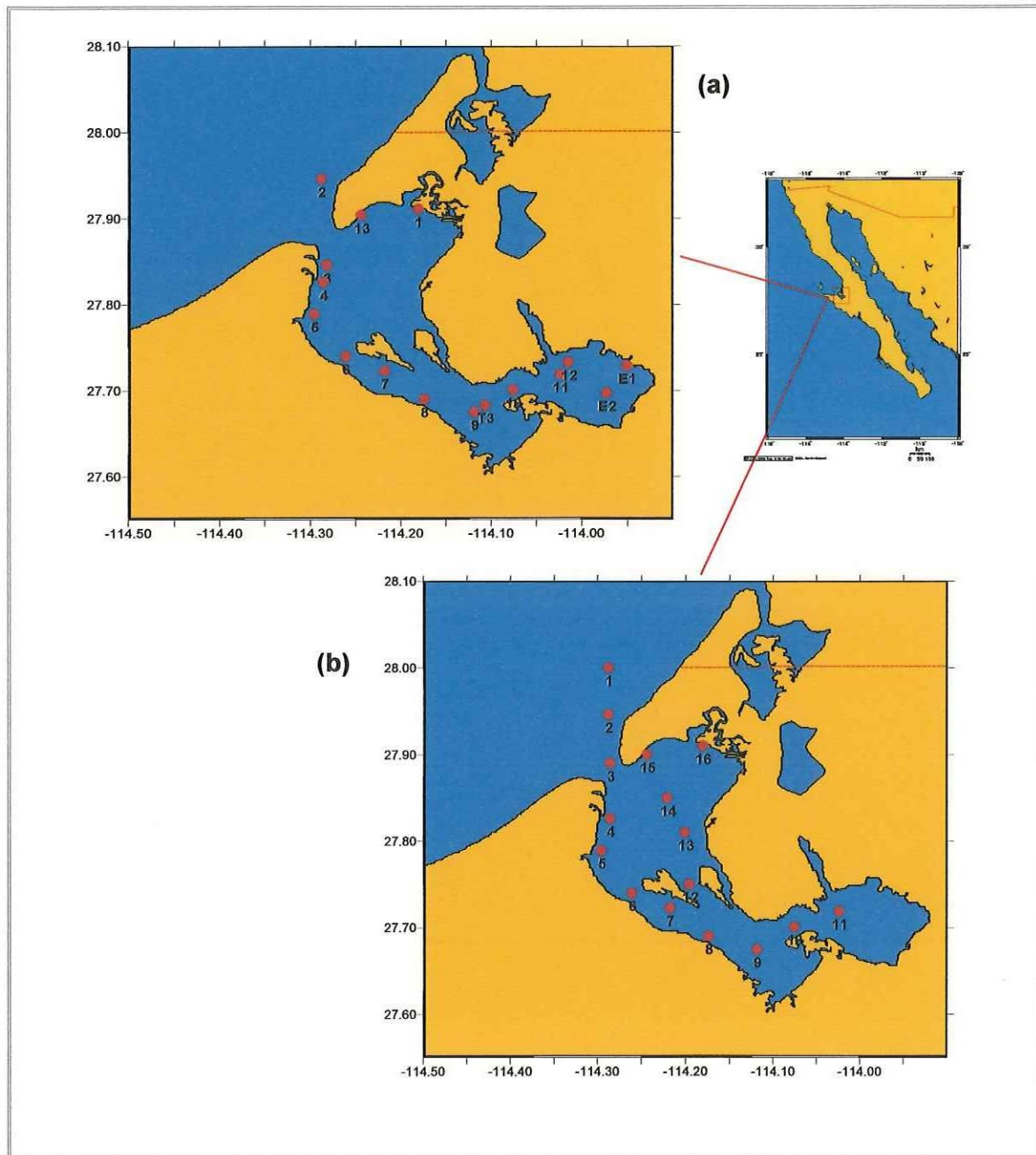


Figura 2. Localización de las estaciones de muestreo en Laguna Ojo de Liebre, B.C.S:
(a) marzo de 2000, (b): noviembre de 2001.

Las mediciones de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y pH realizados con el CTD se calibraron con las mediciones realizadas en muestras de agua discretas para verificar su exactitud. La resolución de las mediciones y la precisión permitida con el equipo se muestran en la tabla II.

Tabla I. Características de las curvas de calibración de las metodologías empleadas para el análisis de nutrientes

VARIABLE	PENDIENTE	CONSTANTE	r^2	PRECISION (%)	LIM.DETEC(μ M)
Amonio	85.90	-0.89	0.999	85	0.15
Nitritos	20.5	-0.06	0.999	98	0.12
Nitratos	24.8	+0.07	0.995	95	0.006
Fosfatos	48.9	+0.03	0.999	98	0.05
Silicatos	101.3	-0.12	0.998	92	0.15

Tabla II. Desviación aceptable y resolución de los sensores montados en el CTD marca Idronaut, modelo 316 (tomado de la hoja de calibración del equipo, 2001).

Variable	Desviación aceptable	Resolución
Temperatura ($^{\circ}$ C)	\pm 0.03	0.0003
Salinidad (‰)	\pm 0.009	0.001
Oxígeno (mg O ₂ /L)	\pm 0.03	0.01
pH	\pm 0.05	0.01
Fluorescencia (expresado como clorofila (μ g/L))	\pm 0.1	0.03
Profundidad (m)	\pm 0.3	0.1

Con la finalidad de entender la distribución espacial de las diferentes variables hidroquímicas y considerando que el canal principal es la parte de la laguna en la que se realiza el mayor intercambio de agua, se realizó un análisis gráfico de su

distribución vertical en un transecto conformado por las estaciones ubicadas sobre el dmencionado. Con la intención de darle un soporte objetivo al análisis de la información generada en la laguna, fue necesario un análisis estadístico descriptivo e inferencial. El análisis inferencial fue determinado por medio de un análisis de agrupamientos, que permite reunir en grupos a los puntos de muestreo con las mismas características hidroquímicas, para establecer zonas hidrológicas semejantes.

RESULTADOS:

CONDICIONES DEL ESTUDIO.

La laguna Ojo de liebre tiene un periodo de marea semidiurno. En marzo, el muestreo fue realizado en un periodo de transición de mareas vivas a muertas (mv), (Fig. 3.a.), mientras que en noviembre, el muestreo fue realizado en un periodo de transición con predominancia de mareas muertas (mm) (Fig. 3.b). Se sugiere un mayor efecto de mezcla por influencia de marea en marzo, que en noviembre.

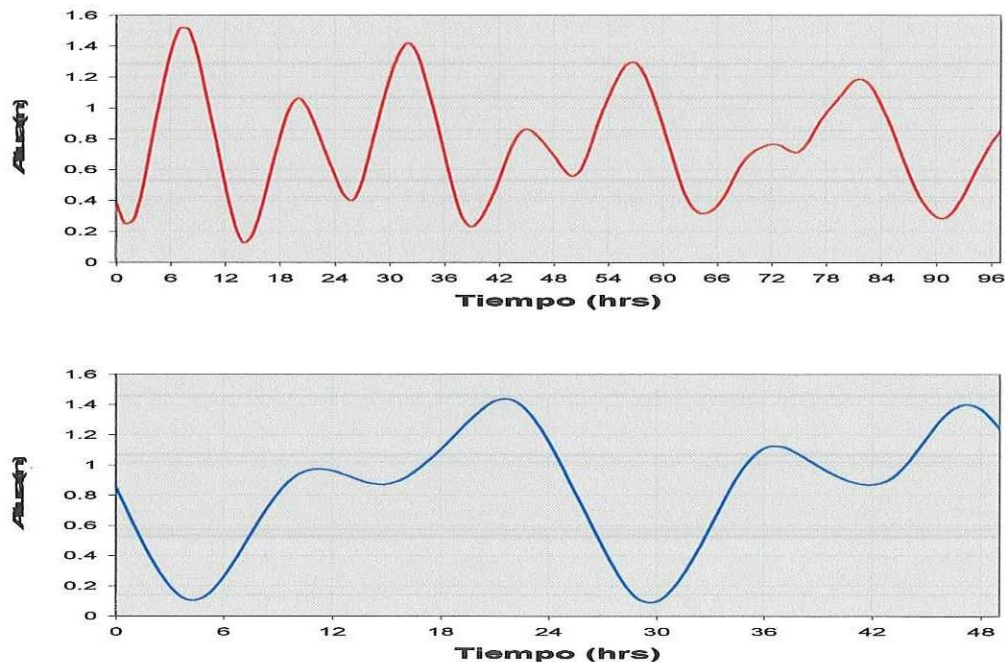


Figura 3. Altura de marea en metros, durante el periodo de muestreo (a) 24 al 27 de marzo de 2000. (b) 7 y 8 de noviembre de 2001 (Tomado de predicción de mareas de CICESE: <http://oceanologia.cicese.mx/>).

HIDROGRAFÍA

Temperatura:

El intervalo de temperatura en marzo (mv: marea viva) fue de 18.3-19.5 °C, con un valor promedio de 19.05 ± 0.45 °C. En noviembre (mm: marea muerta), la temperatura va de 19.5-28.9 °C, con un promedio de 22.4 ± 3.1 °C. Se puede observar que la variabilidad en noviembre es mucho más alta que para el mes de marzo.

La figura 4 presenta la distribución horizontal de la temperatura en la superficie de la Laguna Ojo de Liebre. En marzo (mv), hay un mínimo de 18.3 °C en la boca de la laguna y un máximo de 19.3 °C en la cabeza. Se observa una tendencia a incrementar hacia el interior de la laguna (Fig. 4. a.). En noviembre (mm), hay valores mínimos de 20 °C en la boca, y un máximo de 28.6 °C en el centro de la Laguna de Ojo de Liebre, lo que sugiere la presencia de descargas de agua de temperatura elevada al norte de las islas (Fig. 4.b). Las temperaturas superficiales de marzo son menores que en noviembre, tal vez por un efecto de surgencia.

La figura 5 presenta un perfil vertical de temperaturas desde la boca hasta la cabeza en marzo, y desde el océano adyacente hasta la cabeza en noviembre, mostrando todas las profundidades muestreadas a lo largo del canal principal. Además se incluye en la parte superior de cada perfil el número que corresponde a las estaciones consideradas para su construcción (Fig. 5). En marzo (mv) se observan tres zonas: la zona cercana a la boca con una temperatura homogénea de 18.4 °C; una zona central en la que hay un aumento gradual de 18.4 °-19.5°C y la zona de la cabeza donde se mantiene este valor máximo, (Fig. 5.a). En noviembre (mm), a lo largo del canal principal, se puede observar un valor máximo de 21.6 °C desde el océano adyacente hasta la boca de la laguna, y una zona en el mínimo de temperatura de 19.5 °C en la parte central del canal. Se puede observar que en la estación 6 hay una zona de alta temperatura (21.4°C), lo que sugiere la presencia de un posible aporte externo (Fig. 5.b).

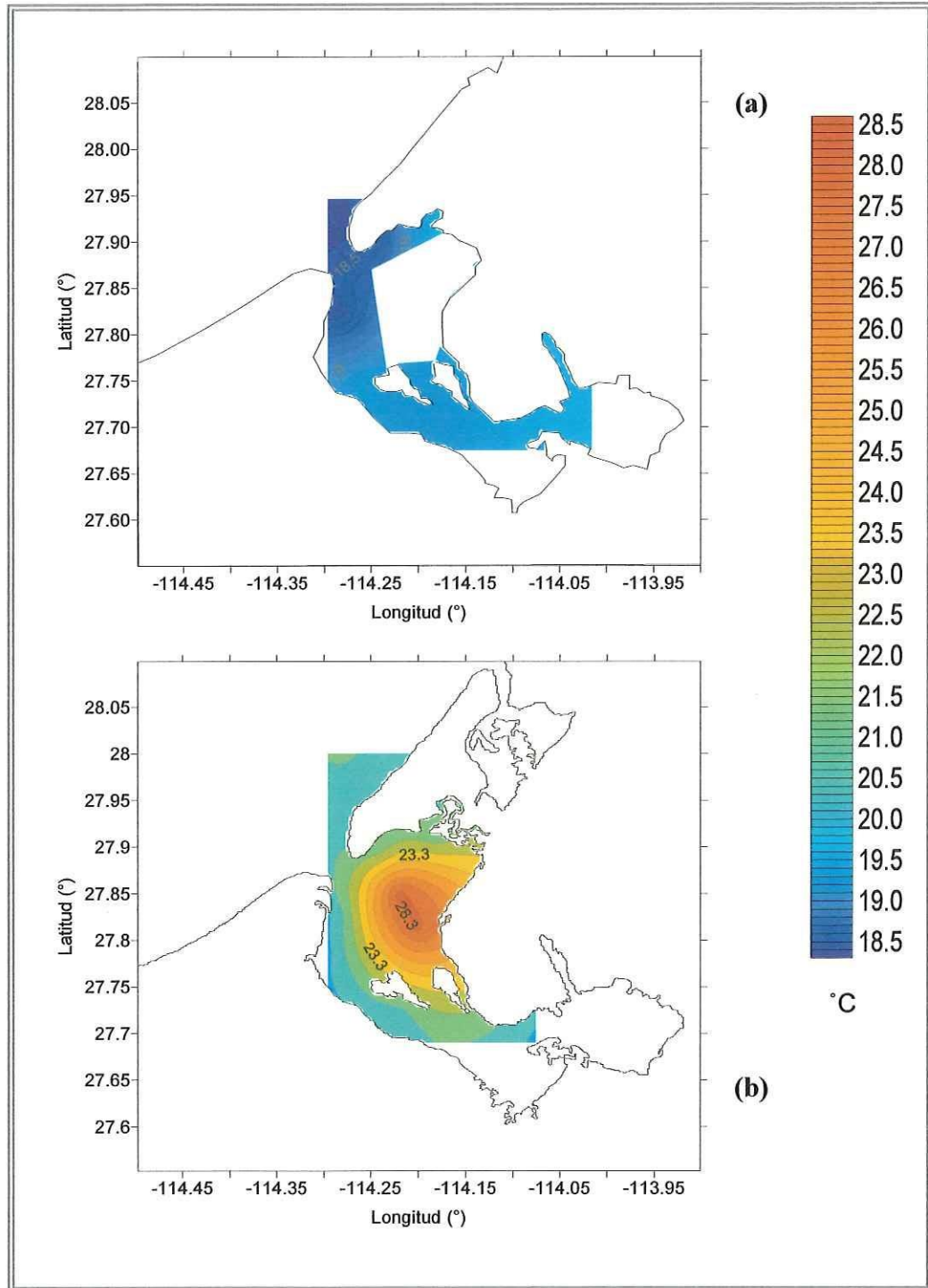


Figura 4. Distribución horizontal superficial de la temperatura en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre.

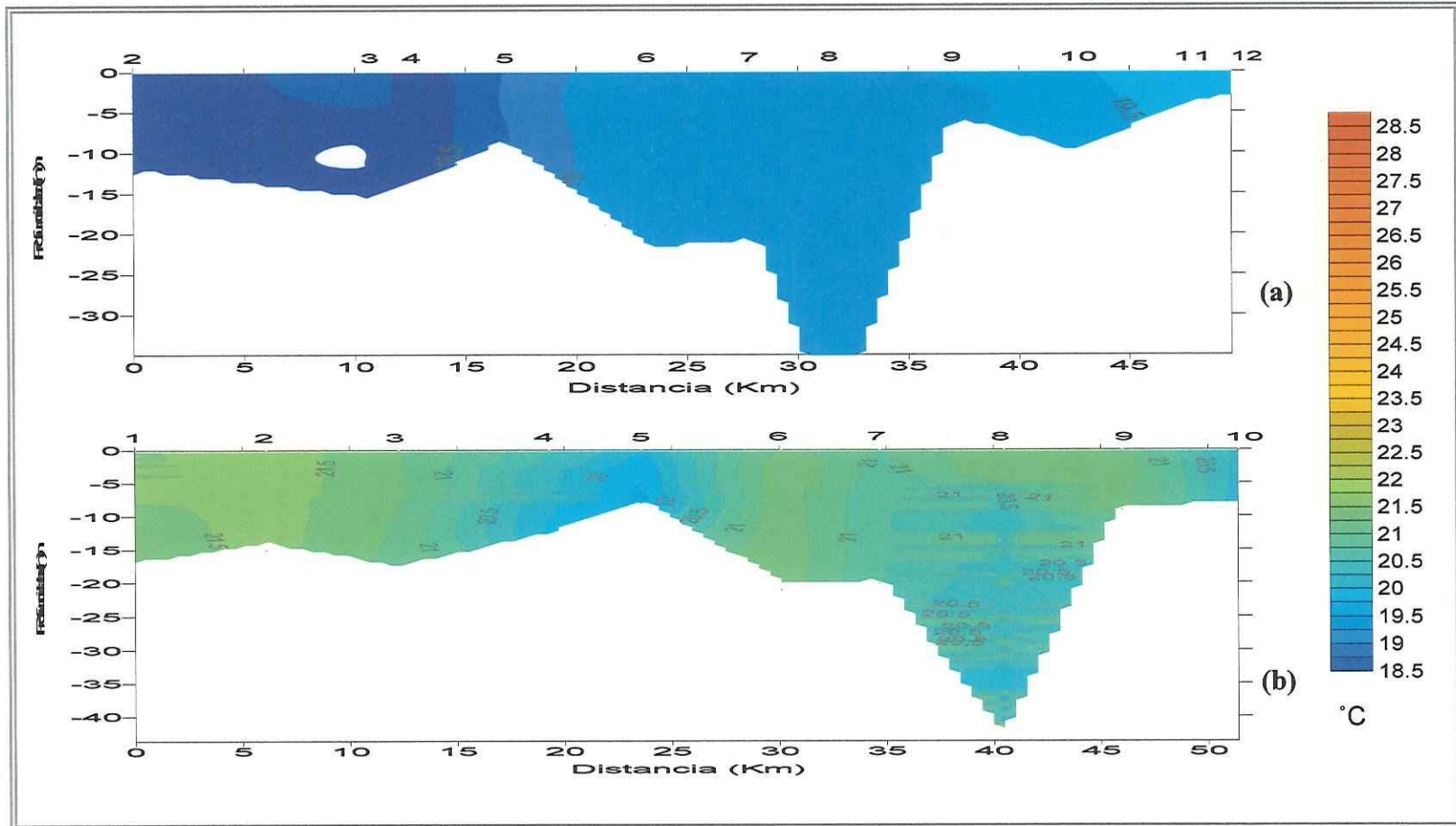


Figura 5. Distribución vertical de la temperatura a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte posterior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura)

En ambos muestreos, hay una diferencia de 0.2 °C entre la superficie y el fondo, y para el mes de marzo (mv) se puede observar que la distribución vertical de la temperatura a lo largo del canal principal es relativamente homogénea, lo que sugiere la condición de mezcla (Fig. 5.a). En noviembre (mm) se observa una mezcla vertical hasta la parte central de la laguna. En la zona de la cabeza, la distribución vertical no tiene un patrón definido (Fig. 5.b).

Salinidad:

En marzo (mv), en toda la laguna, el intervalo de la salinidad va de 34.2-38.8 ‰, con un valor promedio de 36.11 ± 1.61 ‰. En noviembre (mm), la salinidad fue de 29.3-39.4 ‰, con un promedio de 34.4 ± 2.80 ‰. La variabilidad en noviembre es relativamente mayor que en marzo.

La figura 6 presenta la distribución horizontal de la salinidad en la superficie de la Laguna Ojo de Liebre. La salinidad superficial en marzo (mv) mostró una clara tendencia de aumento hacia el interior de la laguna con valores mínimos 34.2 ‰ en la boca y máximos de 38.8 ‰, en la cabeza (Fig. 6. a.). En noviembre (mm), hay un mínimo superficial de 29.3 ‰ hacia el Este de la parte central de la laguna, y un máximo de 39.37 ‰ en la cabeza. Es importante notar una zona de baja salinidad en la parte central Este de la Laguna que corresponde con una zona de alta temperatura, lo que sugiere la presencia de un afluente externo a la laguna, que por sus características no puede ser de origen fluvial o pluvial (Fig. 6.b.)

De igual manera que en el caso de la temperatura, se construyó un perfil vertical de salinidad a lo largo del canal principal de la laguna para poder observar las variaciones dentro de éste. En marzo (mv), la salinidad presenta una distribución horizontal relativamente homogénea de 34.5 ‰ en la boca hasta los primeros 15 Km. En el centro del canal se observa una clara tendencia al aumento hacia la cabeza, con una razón de cambio de 0.1 ‰ Km^{-1} (Fig. 7.a). En noviembre (mm), hay un valor mínimo de 34 ‰ en la boca del canal principal, con una tendencia a aumentar hacia la cabeza de la laguna a una razón de cambio de 0.25 ‰ Km^{-1} . (Fig. 7.b).

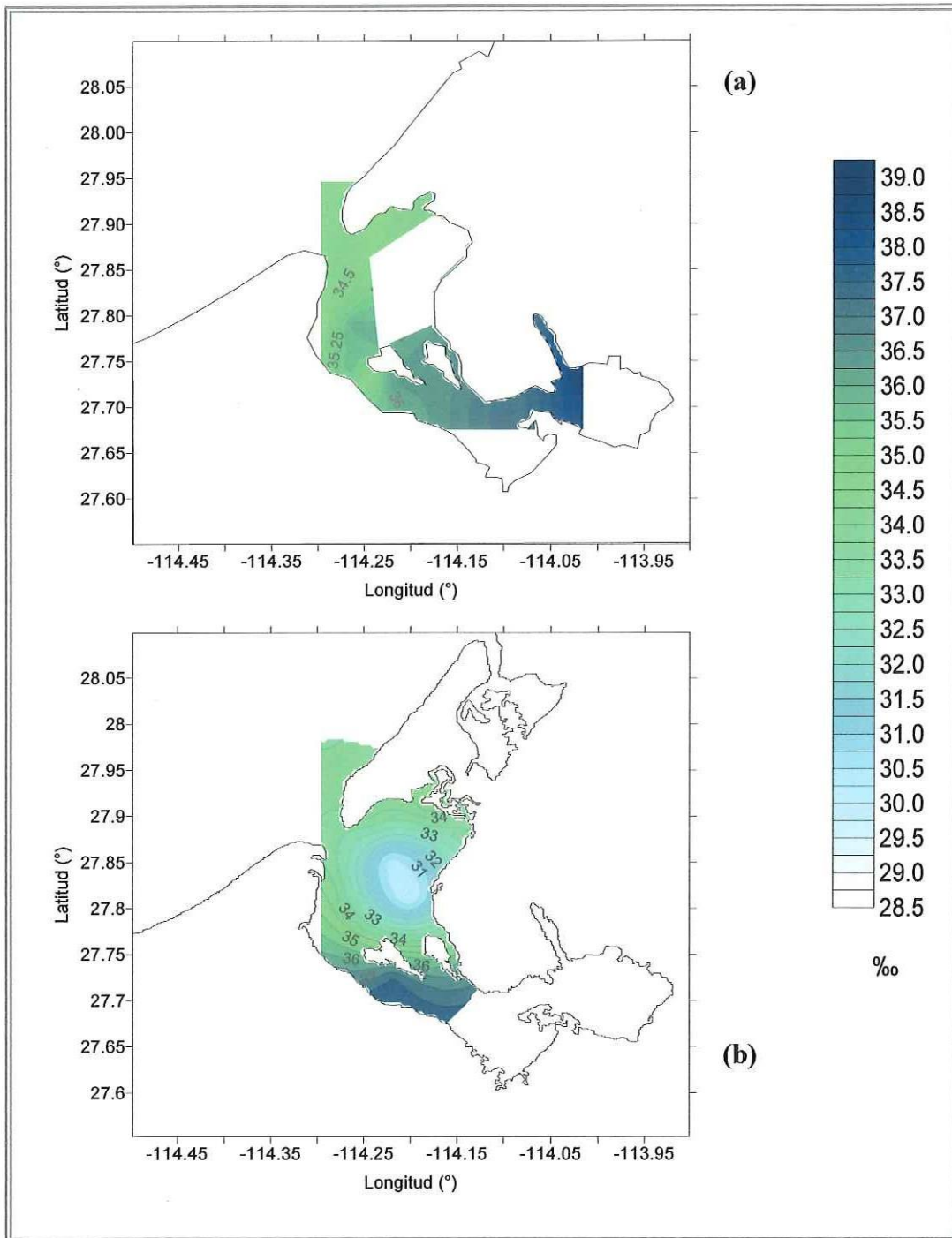


Figura 6. Distribución horizontal superficial de la salinidad en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre.

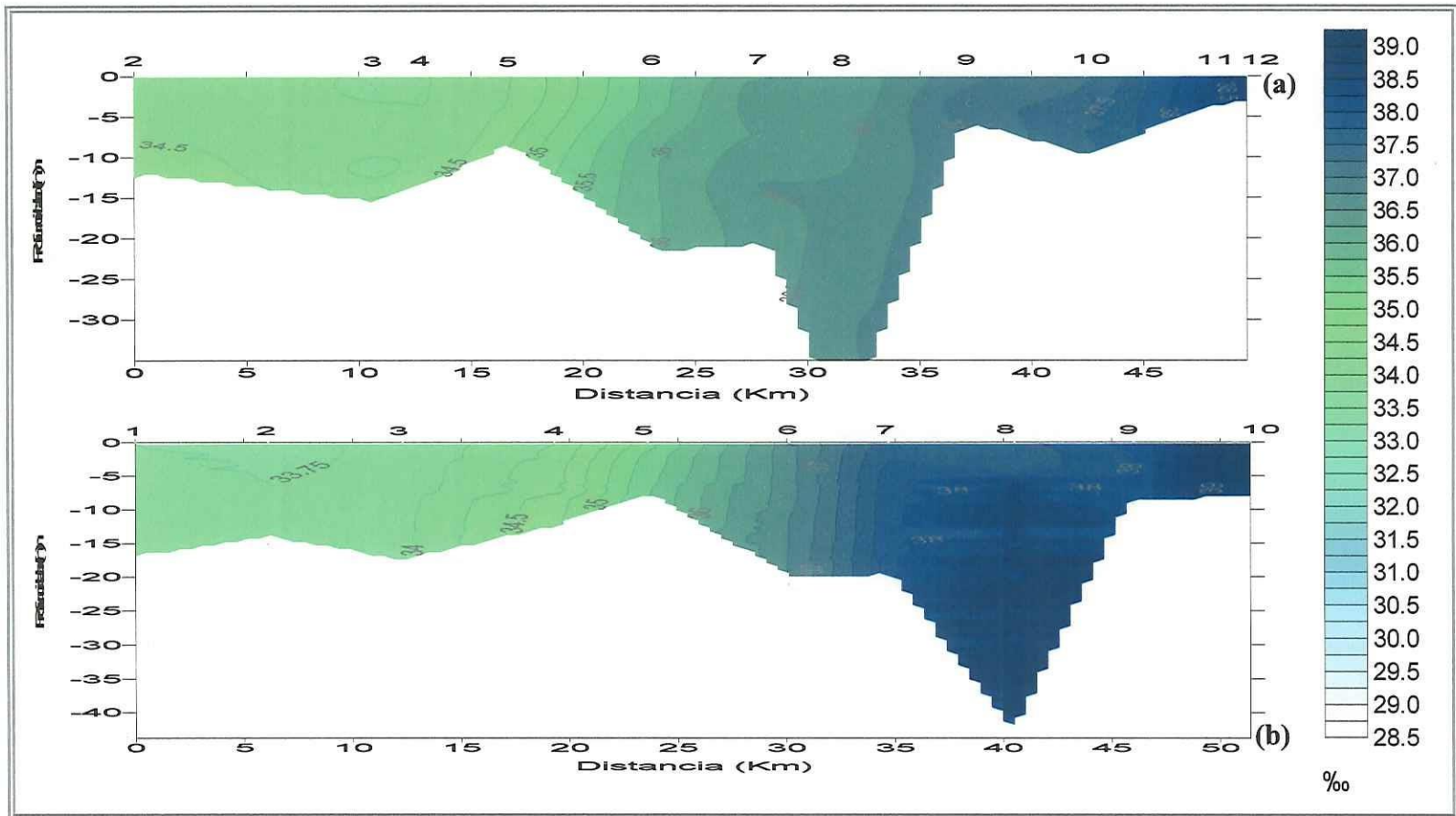


Figura 7. Distribución vertical de la salinidad a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001(b). (Los números de la parte posterior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura)

En ambos muestreos, la distribución vertical mostró una estructura ligeramente estratificada, con diferencias de salinidad entre la superficie y el fondo de hasta 0.2 ‰ en marzo, y 0.5 ‰ en noviembre (Fig. 7). Los perfiles en el canal principal indican que en la Laguna Ojo de Liebre hay circulación antiestuarina, es decir, el agua del océano adyacente entra a la laguna por la superficie por efecto de las corrientes de marea y el viento, y el agua de mayor salinidad proveniente de la cabeza sale hacia el océano por el fondo.

Densidad (σ_t)

El intervalo densidad (σ_t) en marzo (mv) va de 24.5-27.8, con un valor promedio de 25.92 ± 1.06 . En noviembre (mm), la densidad va de 23.2-28.2, con un promedio de 25.42 ± 1.6 .

La figura 8 presenta la distribución de la densidad (σ_t) a lo largo del canal principal de la laguna Ojo de Liebre. En marzo (mv) se observa que la densidad se mantiene homogénea con un valor de 24.5 hasta la estación 5; después se observa un aumento hacia la cabeza hasta el valor máximo(27.8). En las isopícnas se puede observar que hay cierto flujo de agua de mayor salinidad que sale hacia afuera de la laguna. En noviembre (mm), se observa que la densidad aumenta gradualmente desde afuera de la boca hacia la cabeza de la laguna. De igual manera se observa que hay cierto flujo de agua de mayor salinidad que sale por el fondo, y el flujo de agua de menor salinidad proveniente del océano adyacente. En la parte más profunda del canal, se observa que la densidad tiene una distribución sin un patrón definido, de manera similar a lo que ocurre con la salinidad. En general, y aunque no es muy evidente, se puede observar cierta circulación antiestuarina.

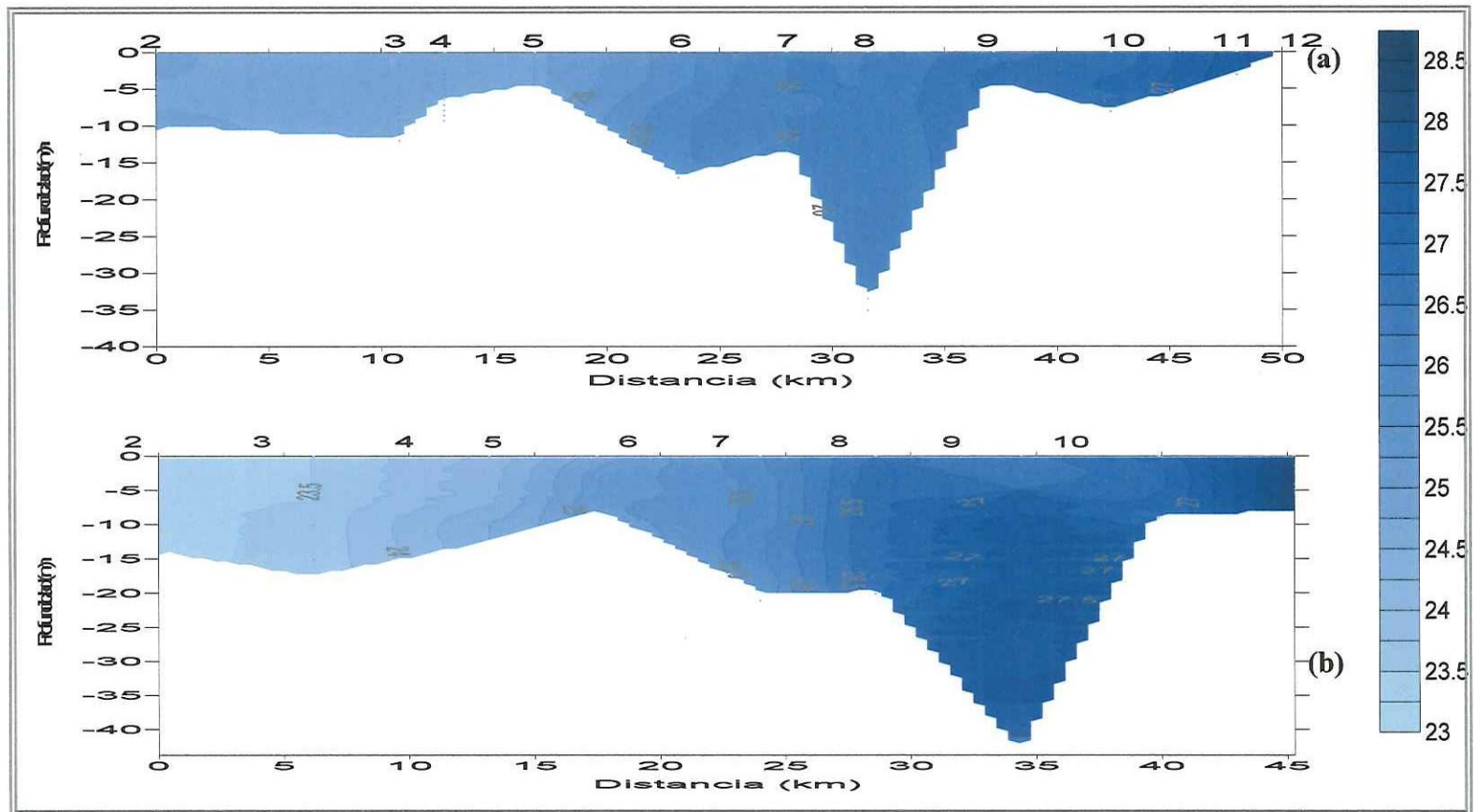


Figura 8. Distribución vertical de la densidad (σ_T) a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte posterior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura)

NUTRIENTES

Nitratos (NO_3):

La concentración de nitratos en toda la laguna en marzo (mv) va de 0.5-18 μM , con un valor promedio de $1.85 \pm 1.04 \mu\text{M}$. En noviembre (mm), la concentración va de 0.5-2.82 μM , con un valor promedio en toda la laguna de $1.13 \pm 0.67 \mu\text{M}$. En ambos muestreos la variabilidad es muy alta (C.V. > 55 %).

La figura 9 presenta la distribución superficial de los nitratos en la Laguna Ojo de Liebre. En marzo (mv), hay un máximo superficial de 4 μM en la estación 6 y un mínimo de 2 μM en la estación 2. Superficialmente se observa que hay valores mínimos en la boca y en la cabeza, mientras que la parte central se encuentran las concentraciones máximas (Fig. 9.a). En noviembre (mm), el máximo superficial es de 2.82 μM en el centro (estación 13), en el mismo lugar donde se encontraron los máximos de temperatura y mínimos de salinidad, lo que sugiere la presencia una descarga de una fuente externa; el promedio superficial es de 1.47 μM (Fig. 9. b.).

La figura 10 presenta un perfil vertical de la concentración de nitratos a lo largo del canal principal de la Laguna Ojo de Liebre, el cual fue construido de manera similar al de temperatura. En marzo (mv), a lo largo del transecto principal de la laguna, los nitratos presentan valores mínimos de 0.5 μM entre los 5 y 10 m de profundidad a 10 Km. de la boca (estación 3) y en la superficie de la cabeza de la laguna, y un máximo subsuperficial de 18 μM en la estación 6 (20 m) (Fig. 10.a). En noviembre (mm), a lo largo del canal principal se observa un mínimo subsuperficial (5 m) de menos de 0.5 μM en la estación 5 a 25 Km. de la boca, y un máximo subsuperficial de 2.8 μM a 5 m en la cabeza de la laguna (Fig. 10. b.).

En marzo (mv), a los 25 Km. de la boca, hay una zona donde la concentración de nitratos aumenta con la profundidad a partir de los 10 m y llegando a un valor máximo de 17 μM a los 20 m de profundidad. Sin embargo, en las demás zonas del canal no se observan diferencias considerables de la concentración de nitratos con la

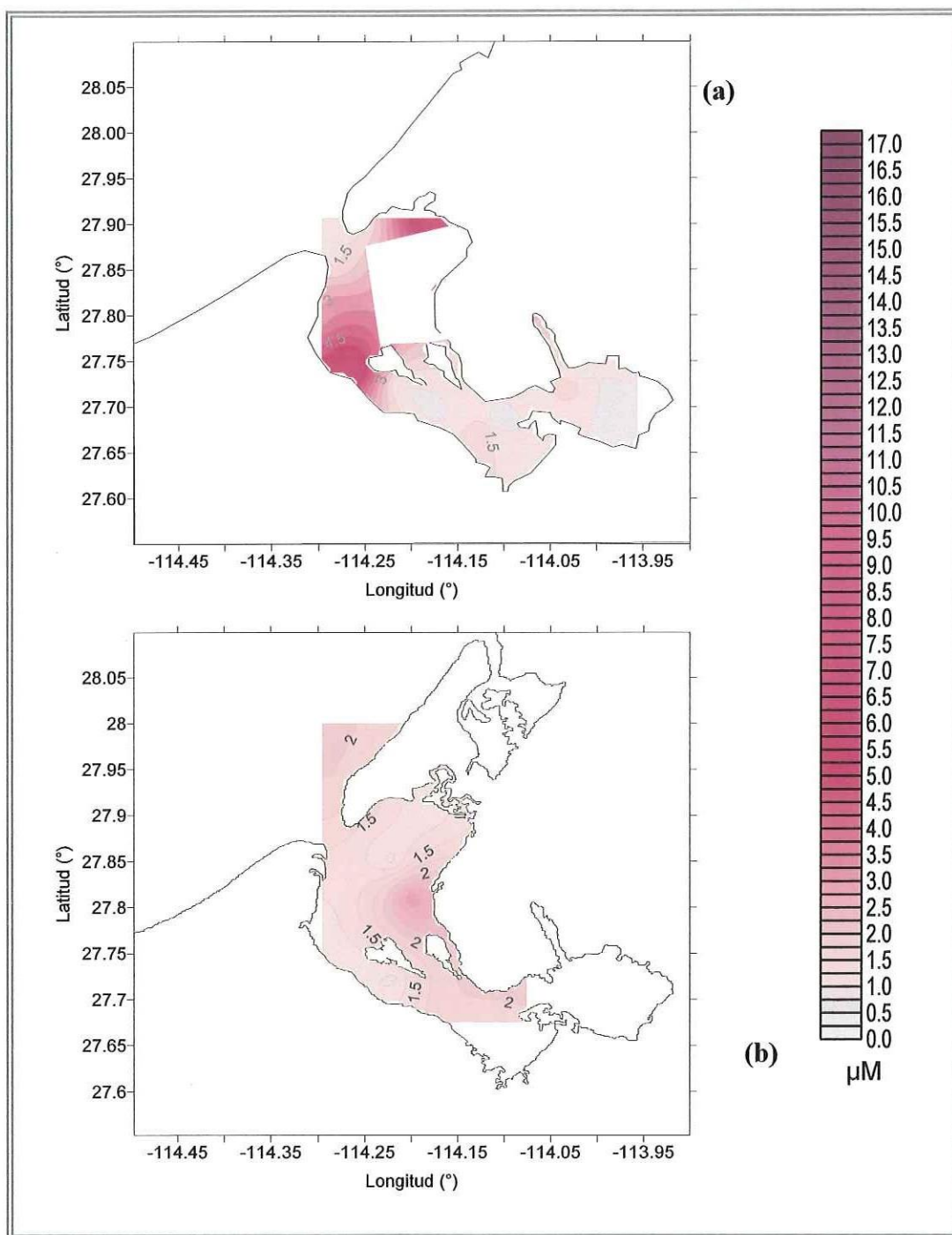


Figura 9. Distribución horizontal superficial de la concentración de nitratos en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre.

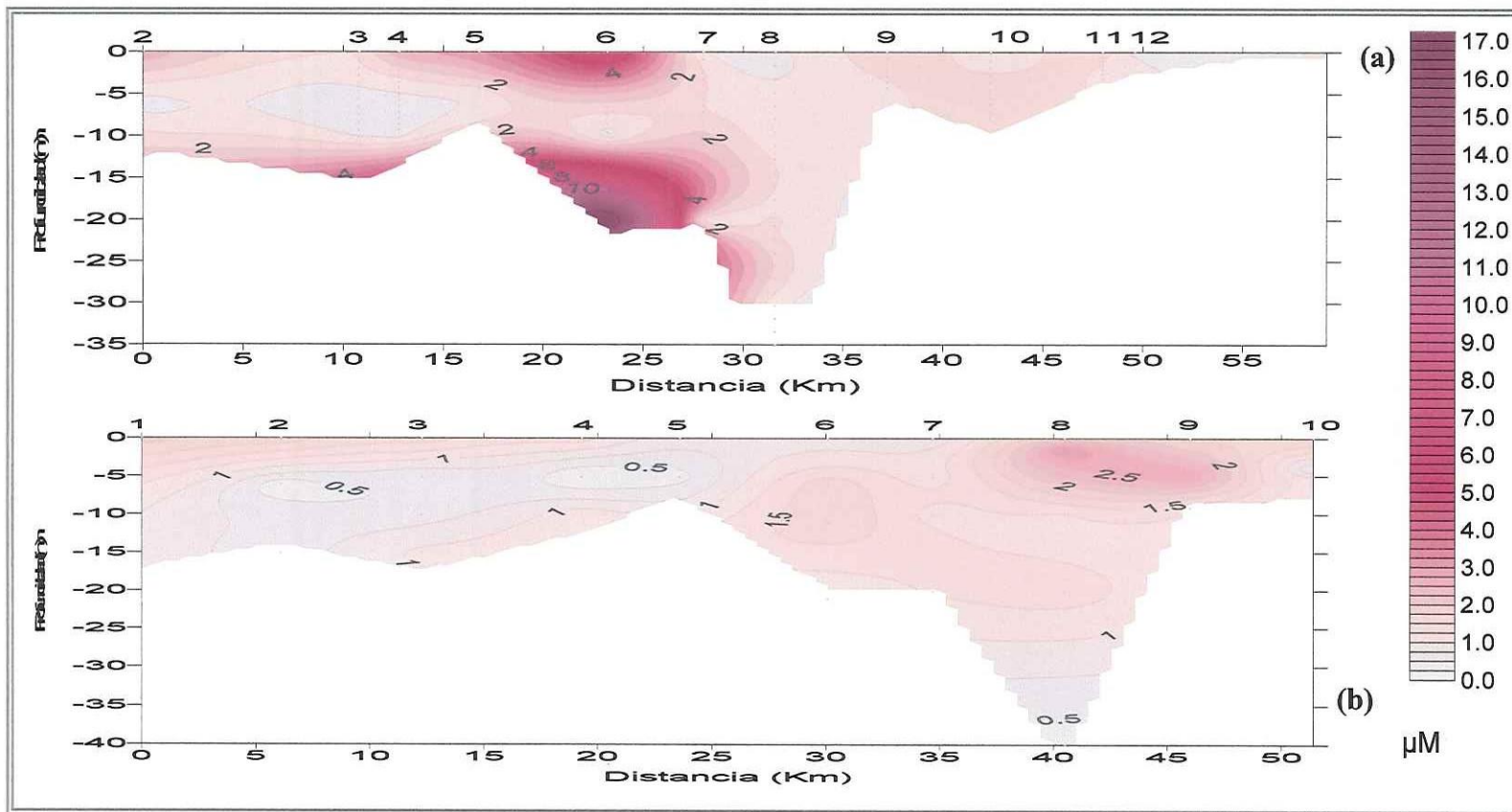


Figura 10. Distribución vertical de la concentración de nitratos (NO_3) a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte posterior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura)

profundidad. En noviembre (mm), en los perfiles verticales se observa una clara tendencia a la disminución en la concentración de nitratos con la profundidad hasta los 10 m (Fig. 10. b).

Nitritos (NO₂):

La concentración de nitritos encontrada en marzo (mv) va de <0.12-0.4 μM con un valor promedio de <0.12 ± 0.14 μM. En noviembre (mm) la concentración encontrada va de <0.12-0.19, con un valor promedio de <0.12 ± 0.07 μM. La concentración promedio en ambos muestreos es muy similar (<0.12 μM), sin embargo, la variabilidad en marzo (C.V.= 113.9 %) es mucho mayor que en noviembre (C.V.= 59.5 %).

En marzo (mv), hay dos valores máximos superficiales de 0.23 μM: en la boca y en la parte cercana a las islas (Fig. 11.a). En noviembre (mm), se observan máximos superficiales de 0.227 μM en los mismos lugares que en marzo, y un mínimo de < 0.12 μM en la boca y en general se observa una tendencia al aumento de la concentración de nitritos hacia la cabeza de la laguna (Fig. 11.b).

Se construyó un perfil vertical de la concentración de nitritos a lo largo del canal principal, siguiendo las mismas consideraciones usadas para construir el perfil de temperatura (Fig. 12). A lo largo del transecto principal de la laguna Ojo de Liebre en marzo (mv), se observa un máximo subsuperficial (20 m) de 0.4 μM en la estación 5, y un mínimo de < 0.1 μM a una profundidad de 5 m en la boca (Fig. 12.a). Se puede observar que éstos están ubicados en los mismos puntos que el máximo y el mínimo de nitratos. En la zona más profunda del canal (donde el efecto de mezcla es menor), hay valores altos de nitritos que corresponden a valores mínimos de nitratos, lo que sugiere un consumo de nitratos (Fig. 11.a y 12.a). El resto de la Laguna presentó valores menores a 0.15 μM, con valores altos superficiales en las estaciones 5 y 7 de 0.2 μM. En noviembre (mm), a lo largo del transecto principal hay concentraciones subsuperficiales mínimas < 0.1 μM en la boca de la laguna, y dos máximos superficiales de alrededor 0.2 μM, en la estación 6 y en la cabeza de la laguna. En el

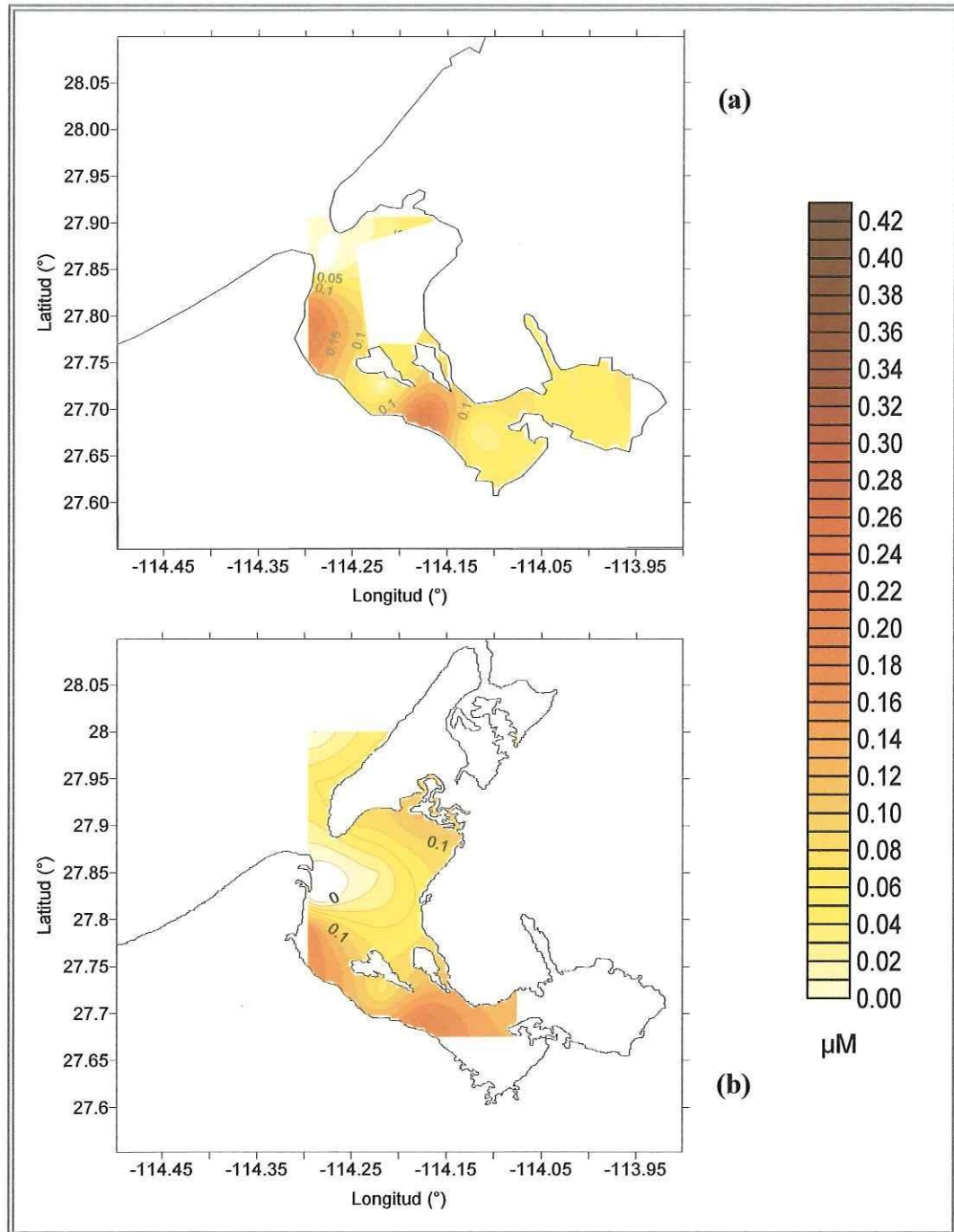


Figura 11. Distribución horizontal superficial de la concentración de nitritos en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre.

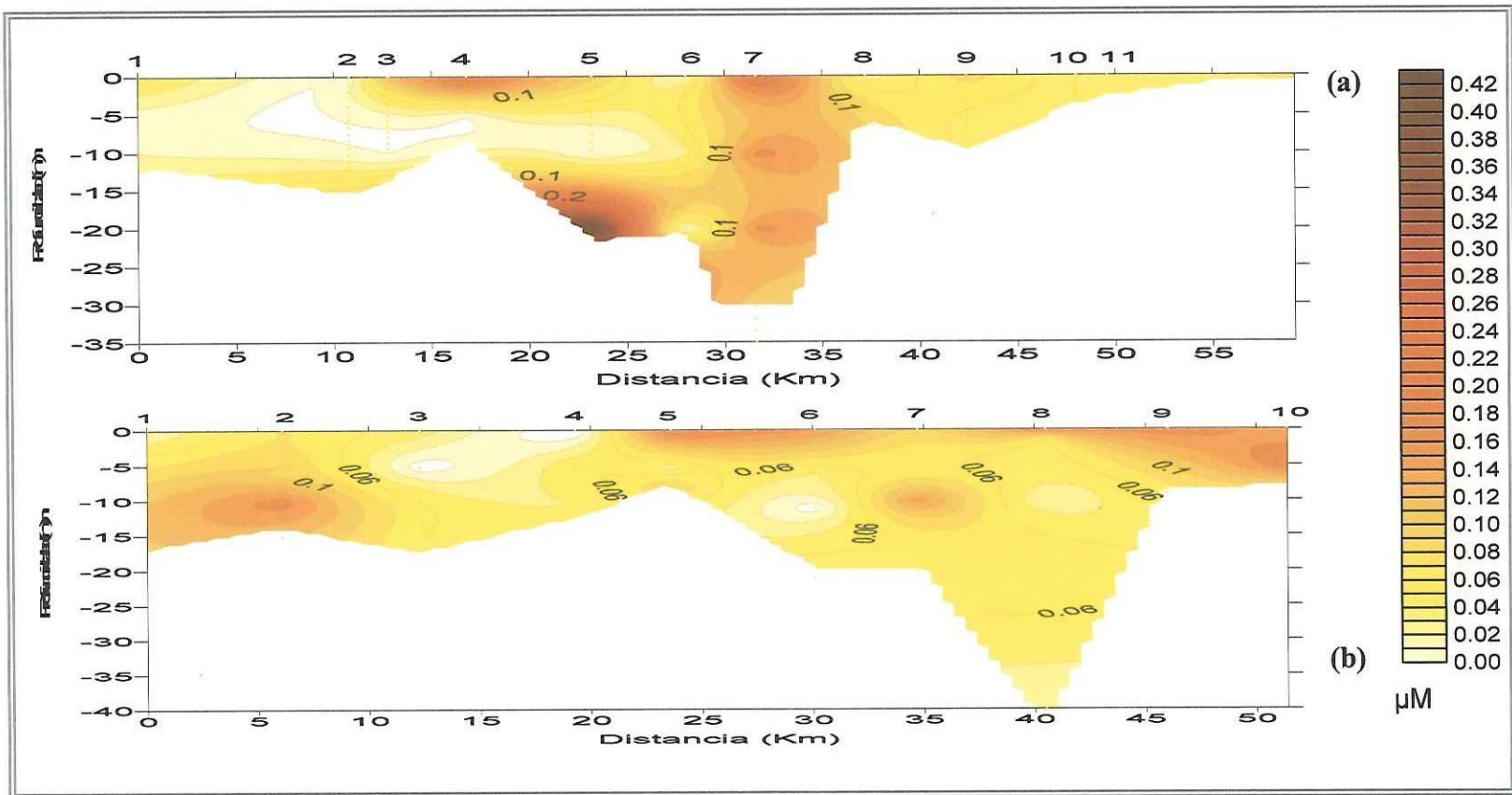


Figura 12. Distribución vertical de la concentración de nitritos (NO_2) a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001(b). (Los números de la parte posterior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura).

océano adyacente hay un aumento de la concentración con la profundidad, y a partir de ahí las concentraciones máximas están en la superficie, lo que indica que hay consumo de este nutriente. Se observa también una mancha de concentración baja en la estación 6 a 10 m, y un máximo en la estación 7 a 10 m (Fig. 12.b).

Amonio (NH₄):

La concentración de amonio en la Laguna Ojo de Liebre en marzo (mv) fue de $0.15-1.36 \mu\text{M}$, con un promedio $0.19 \pm 0.25 \mu\text{M}</math>. En noviembre (mm) el las concentraciones encontradas van de $2.51-7.63 \mu\text{M}</math>, con un promedio fue de $2.99 \pm 0.82 \mu\text{M}</math>. Se observa que las concentraciones promedio encontradas en el mes de noviembre son 16 veces mayores que las de marzo. Además, hay mayor variabilidad en noviembre que en marzo.$$$

La figura 13 presenta la distribución superficial de la concentración de amonio en la Laguna Ojo de liebre en ambos muestreos. En marzo (mv), hay un mínimo de menos de $0.3 \mu\text{M}</math> en la boca, lo que sugiere que el aporte oceánico es mínimo. Hay un máximo superficial de $1.36 \mu\text{M}</math> en la parte angosta de la cabeza de la laguna,. También se observa un valor mínimo en la cabeza de la laguna que coincide con las concentraciones más altas de clorofila y oxígeno, lo que indica consumo de este nutriente (Fig. 13.a). En noviembre (mm), hay un mínimo superficial de $2.56 \mu\text{M}</math> en la cabeza (estación 9). Se observa una tendencia al aumento de concentración hacia el centro de la laguna, con un máximo de $7.64 \mu\text{M}</math> en la estación 6, cerca de la isla, probablemente por un aporte externo, o por un proceso de amonificación similar al que se observa en marzo (Fig. 13.b).$$$$

Las variaciones a lo largo del canal principal de la laguna pueden observarse en la figura 14, la cual fue construida de manera similar al perfil vertical de temperatura. En marzo (mv), el amonio presentó un valor máximo de $6.5 \mu\text{M}</math> en el fondo en la estación 6, en el mismo lugar donde se encontraron los máximos de NO_3 , NO_2 y PO_4 . El resto de la laguna presentó valores mínimos subsuperficiales (entre 5 y 10 m de$

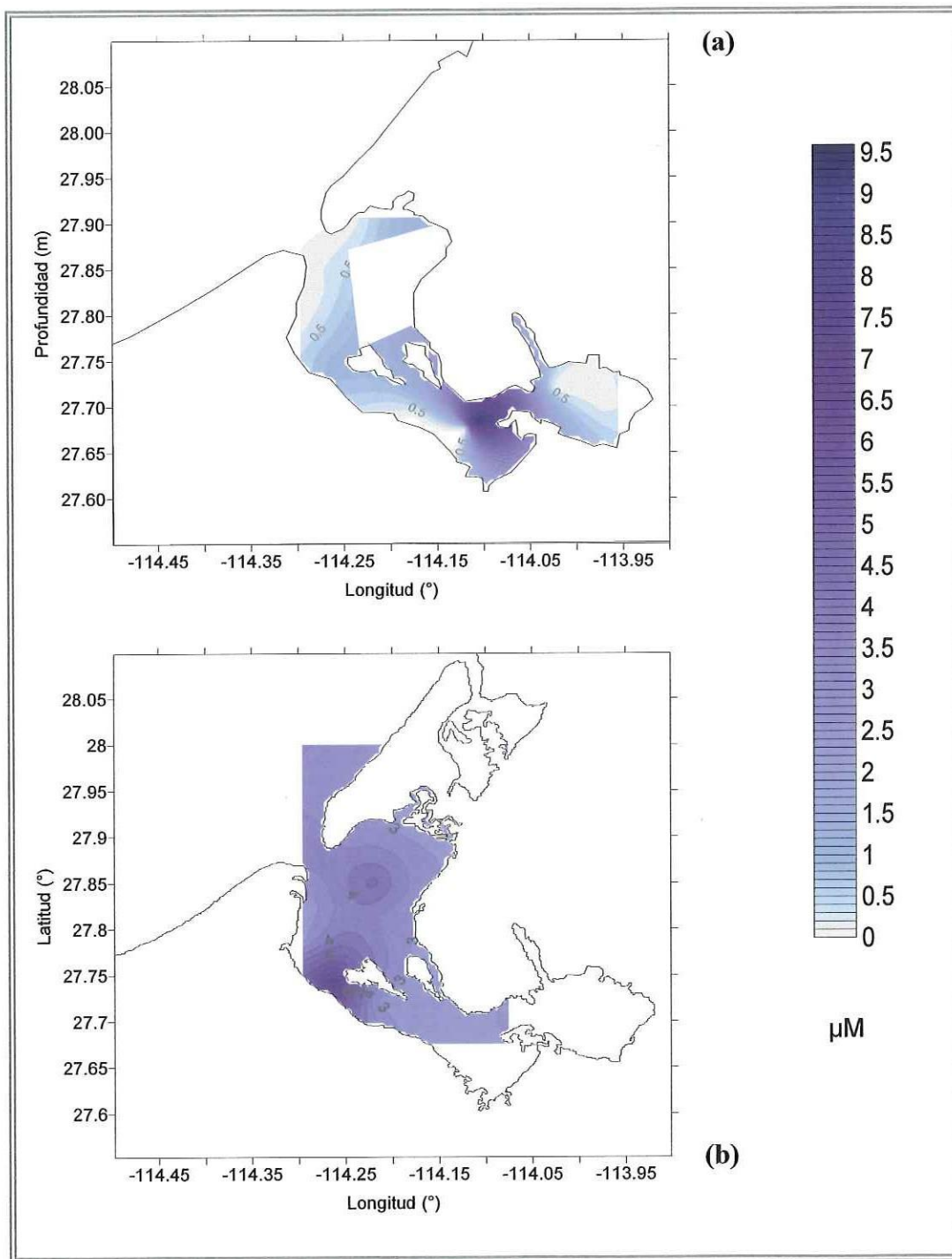


Figura 13. Distribución horizontal superficial de la concentración de amonio (NH_4) en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre.

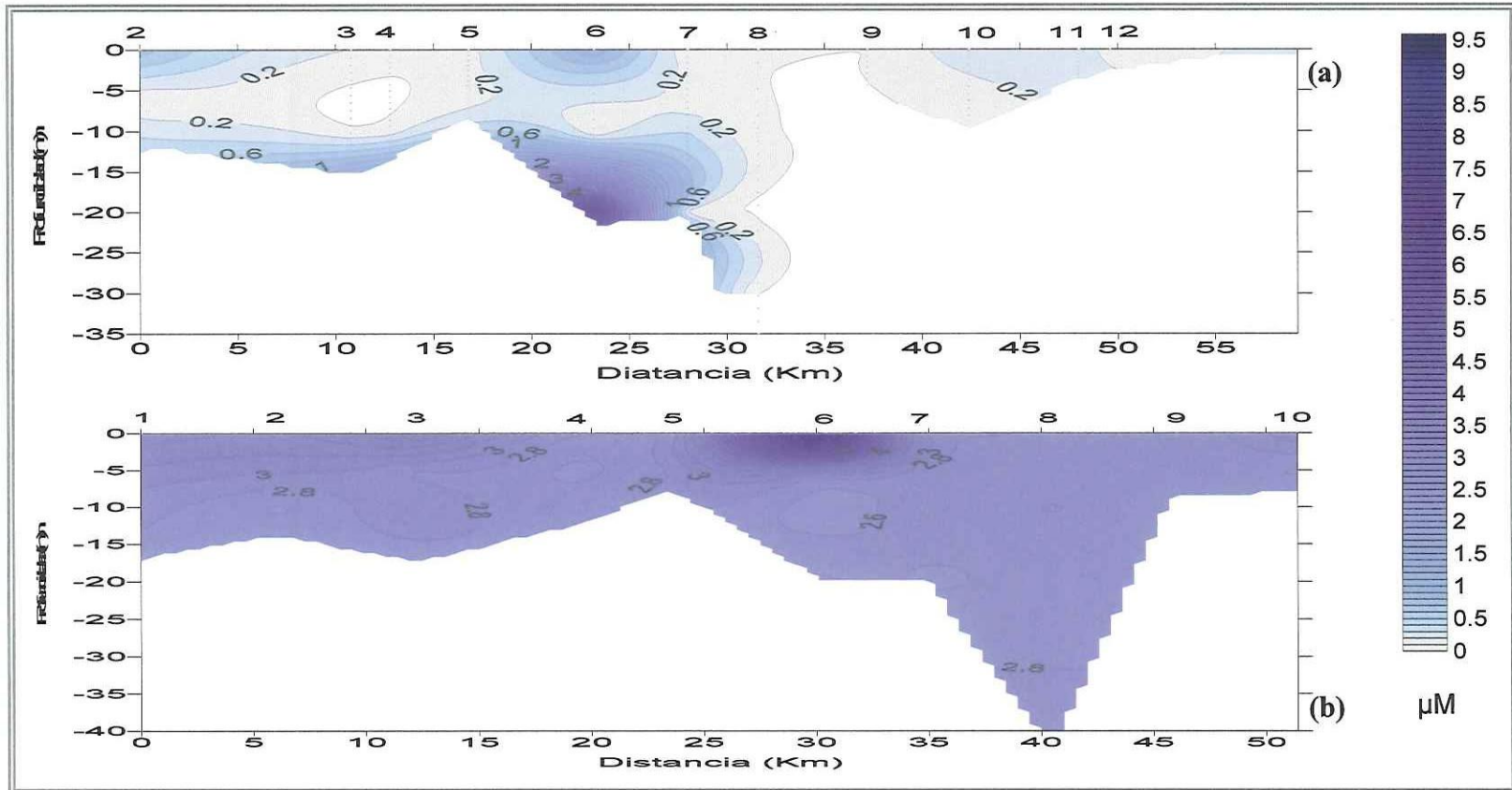


Figura 14. Distribución vertical de la concentración de amonio (NH_4) a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte inferior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura)

profundidad) de $0.2 \mu\text{M}$, y concentraciones de $0.5 \mu\text{M}$ en la superficie de todo el canal (Fig. 14.a). En noviembre (mm), hay un máximo superficial de $7.64 \mu\text{M}$ en el centro al oeste de las islas (estación 6). A lo largo de todo el canal se observa una concentración muy alta ($\approx 3.5 \mu\text{M}$) distribuida de manera relativamente homogénea, lo que sugiere que en el mes de noviembre el proceso de amonificación es predominante.

En marzo (mv), la concentración promedio superficial ($0.27 \mu\text{M}$) fue mayor que a 10 m de profundidad ($0.11 \mu\text{M}$). En los perfiles verticales se observa una ligera tendencia a la formación de capas verticales, y la diferencia entre la superficie y 10 m es de $0.16 \mu\text{M}$. En noviembre (mm) la concentración se mantiene relativamente estable con la profundidad, con concentraciones muy elevadas de este nutriente (Fig. 14.b).

Fosfatos (PO_4):

El promedio de fosfatos en marzo (mv) fue de $1.09 \pm 0.30 \mu\text{M}$, y se observan concentraciones de $0.8\text{-}4.0 \mu\text{M}$ en toda la laguna. En noviembre (mm) se observaron concentraciones con un intervalo de $0.2\text{-}2.4 \mu\text{M}$, con un valor promedio de $0.94 \pm 0.41 \mu\text{M}$. La variabilidad del en noviembre fue mucho mayor que en marzo.

En marzo (mv), hay una distribución más o menos homogénea en la superficie con valores máximos en el centro y en la cabeza de la laguna (Fig. 15.a). En noviembre (mm), en la superficie, encontramos un mínimo de $0.44 \mu\text{M}$ en la cabeza de la laguna (estación 9) y un máximo de $2.43 \mu\text{M}$ en la parte central oeste (estación 7). Se observa una tendencia al aumento de concentración hacia el centro de la laguna, el cual corresponde los máximos superficiales de NO_2 y NH_4 , lo que sugiere la degradación de materia orgánica (Fig. 15.b.).

La Figura 16 es una representación gráfica de la distribución de la concentración de fosfatos en el canal principal de la Laguna Ojo de Liebre. En marzo (mv) se encontró un mínimo de $<1 \mu\text{M}$ en la boca. Se observa un gradiente positivo hacia la estación 6 donde se encontró la máxima concentración de fosfatos ($4.0 \mu\text{M}$) en el fondo (en el mismo lugar que los máximos de NO_3 , NO_2 y NH_4). En la cabeza

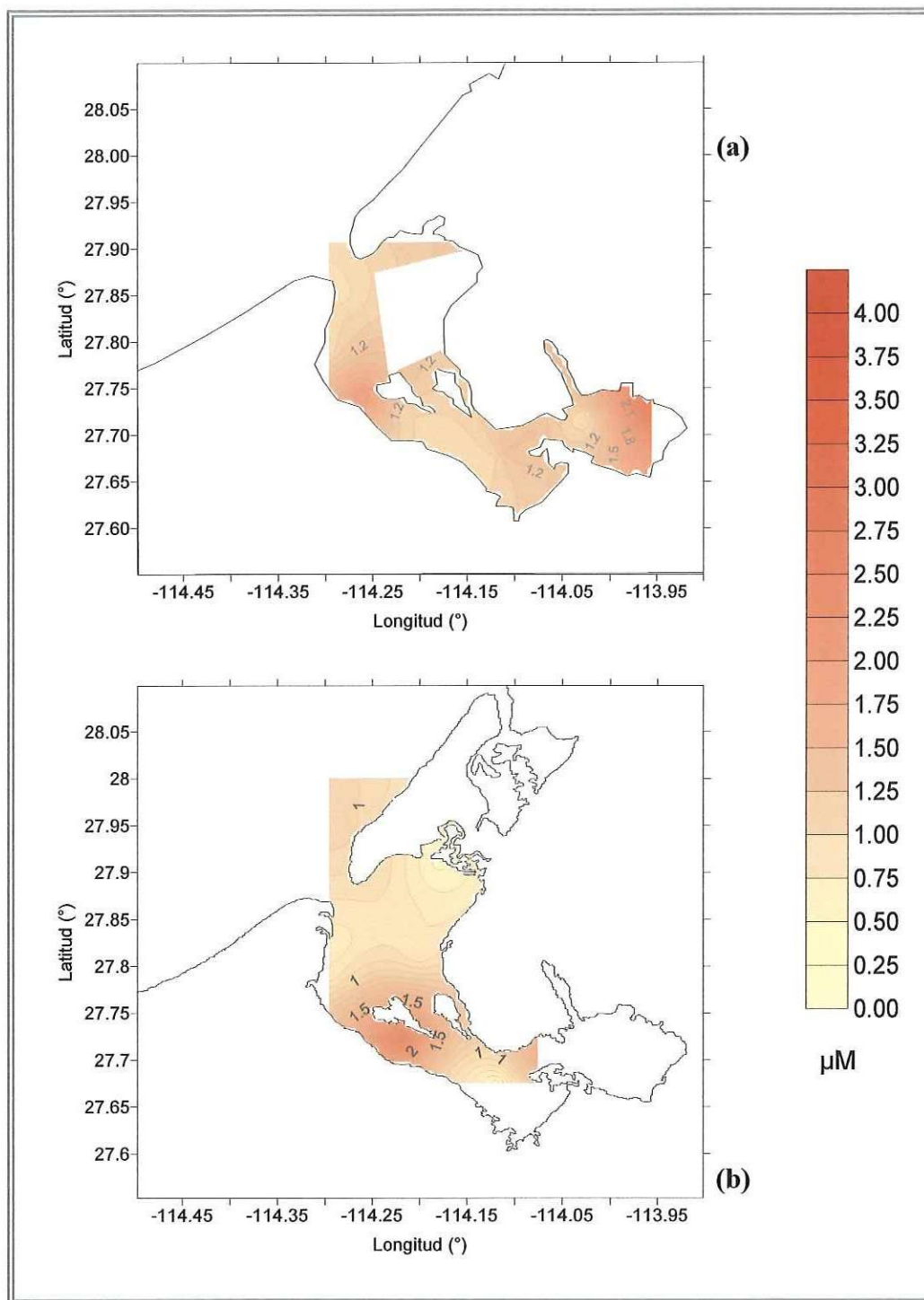


Figura 15. Distribución horizontal superficial de la concentración de fosfatos (PO_4) en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre.

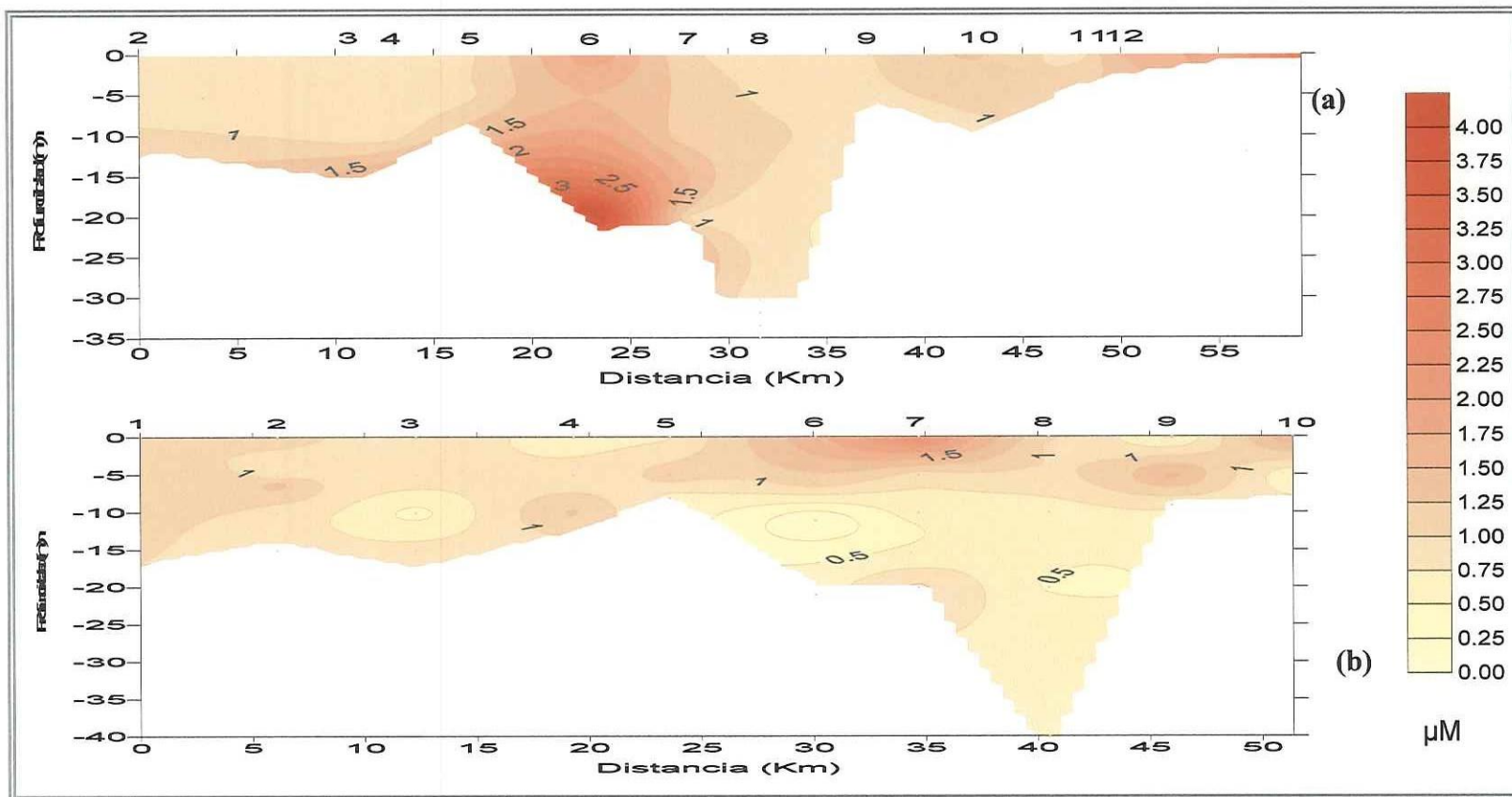


Figura 16. Distribución vertical de la concentración de fosfatos (PO_4) a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte inferior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura).

también se encontraron concentraciones altas de más de 2 μM , lo que sugiere la remineralización de este nutriente (Fig. 16.a). En noviembre (mm), encontramos un máximo superficial de 2.43 μM en la estación 7 y un mínimo de menos de 0.2 μM en la estación 6 (10m). En el océano adyacente hay una zona de concentraciones altas que van disminuyendo hacia el centro de la laguna, lo que sugiere el aporte oceánico, además hay otra zona de concentraciones altas en la cabeza.

En términos generales, en marzo (mv), el promedio superficial de fosfatos ($1.10 \pm 0.33 \mu\text{M}$) fue ligeramente mayor al encontrado a 10 m de profundidad ($1.08 \pm 0.28 \mu\text{M}$). En general no se observan diferencias significativas con la profundidad, probablemente debido a la buena mezcla generada por la dinámica de la marea viva. En noviembre (mm), hay una diferencia entre el promedio de la superficie y el fondo de 0.44 μM y se puede observar cierta tendencia a una disminución con la profundidad desde el centro del canal hacia la cabeza, lo que sugiere el consumo de fosfatos (Fig. 16.b).

Silicatos (SiO_4):

La concentración de silicatos encontrada en marzo (mv) va de 1.6-17.35 μM , con un valor promedio de $4.01 \pm 3.18 \mu\text{M}$. En noviembre (mm), el promedio en toda la laguna fue de $5.16 \pm 0.78 \mu\text{M}$, con concentraciones de 3.85-5.80 μM . La variabilidad en el mes de marzo es mucho mayor que en noviembre.

En marzo (mv), hay un máximo superficial de 17.35 μM en la boca y mínimos de menos de 2.0 μM en el centro y la cabeza, lo que sugiere un aporte oceánico de este nutriente (Fig. 17.a). En noviembre (mm) hay un mínimo superficial de 3.85 μM en las estaciones fuera de la boca de la laguna, y un máximo superficial de 5.80 μM en la zona noroeste de la laguna (estación 16) (Fig. 17. b). En marzo (mv), la máxima concentración a lo largo del canal principal se encontró, a diferencia de otros nutrientes, en la superficie de la boca de la laguna, lo que sugiere que en el mes de marzo el principal aporte de silicatos es oceánico, posiblemente por el efecto de surgencia. Otro valor alto se localizó en la estación 8, con valores de 12 μM . Las concentraciones mínimas (1.6-2 μM) se encontraron en el centro de la laguna (Fig.

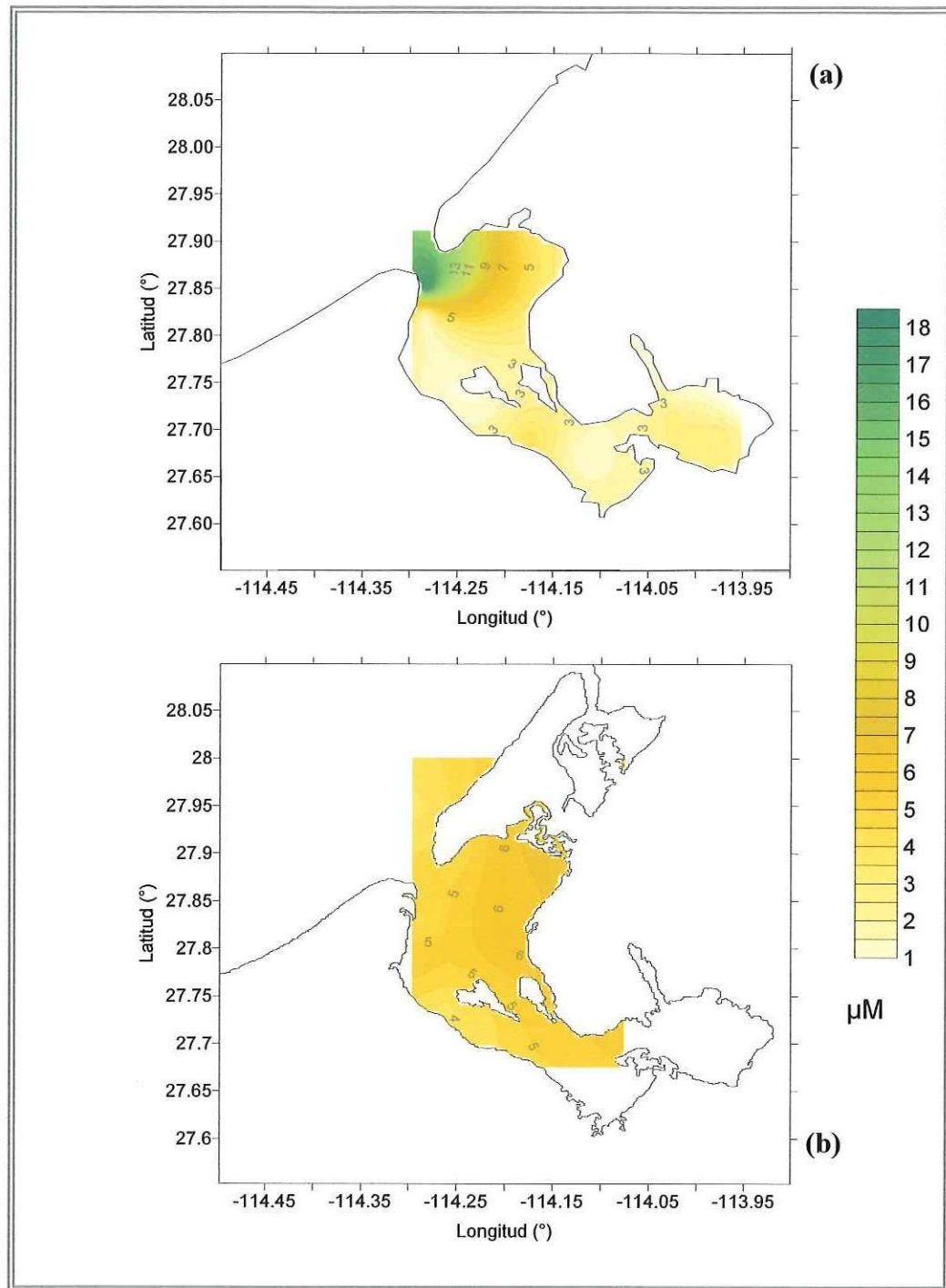


Figura 17 Distribución horizontal superficial de la concentración de silicatos (SiO_4) en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre.

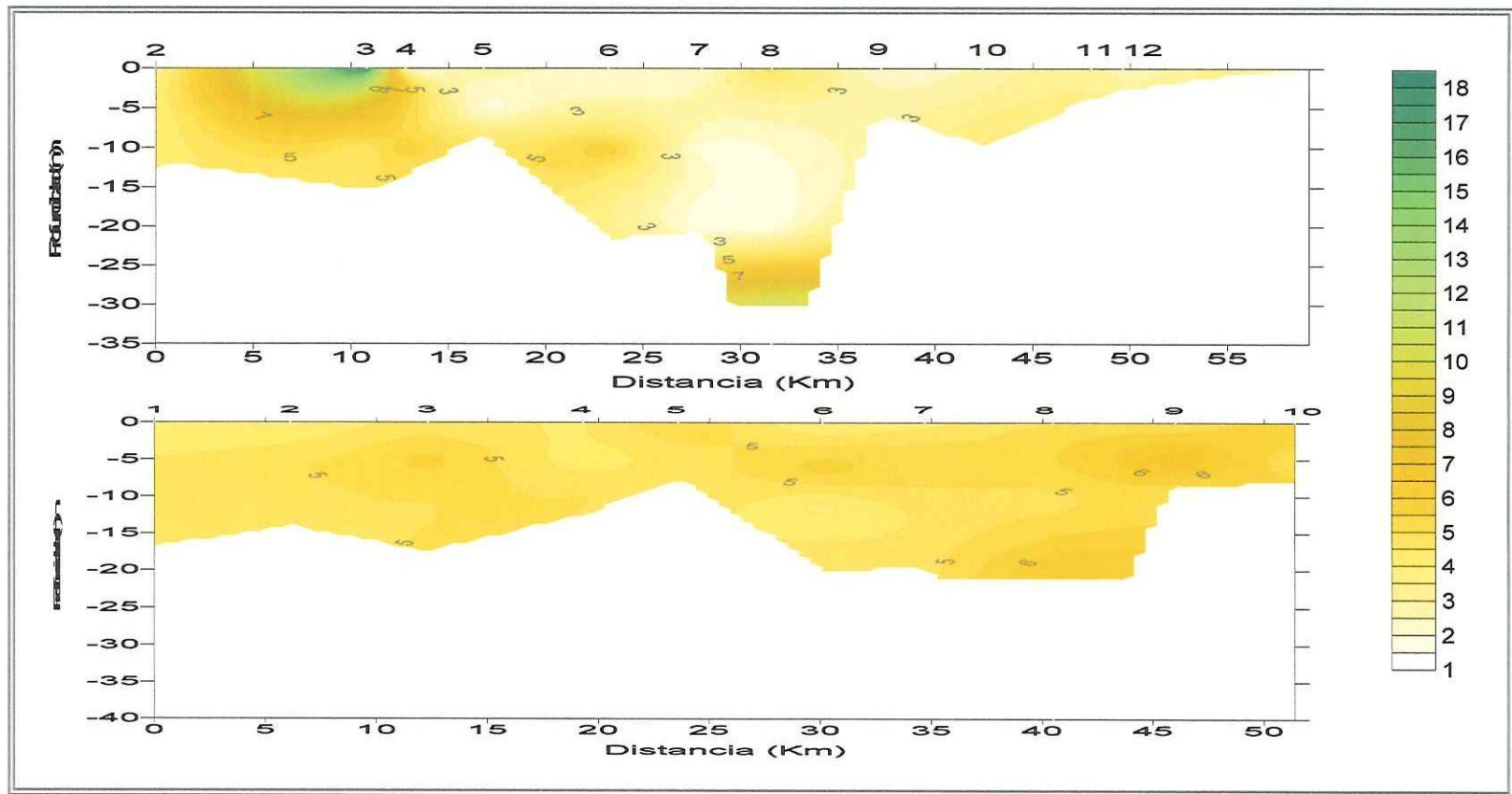


Figura 18 Distribución vertical de la concentración de silicatos (SiO_4) a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte inferior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura).

18.a). Durante noviembre (mm), a lo largo del canal principal, encontramos un máximo subsuperficial (5m) de $6.96 \mu\text{M}$ en la cabeza de la laguna (estación 9) y dos mínimos de $3.851 \mu\text{M}$, uno en la superficie del océano adyacente y el otro al oeste de las islas en la estación 6, a 10 m de profundidad (Fig. 18.b).

En términos generales, el promedio superficial de silicatos durante marzo ($4.18 \mu\text{M}$) fue mayor que la concentración promedio a 10 m de profundidad ($3.84 \mu\text{M}$), lo que sugiere un efecto de surgencia reciente. En noviembre, la concentración de silicatos presenta una distribución más o menos homogénea en toda la laguna, tanto vertical como horizontalmente, lo que no da información suficiente acerca de la fuente que aporta este nutriente.

VARIABLES BIOQUÍMICAS

Oxígeno disuelto:

Las concentraciones de oxígeno encontradas en marzo van de $6.55\text{-}8.87 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ con un promedio de $7.8 \pm 0.70 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$. En noviembre, las concentraciones de oxígeno disuelto encontradas en toda la laguna van de $5.38\text{-}8.4 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$, con un promedio de $7.6 \pm 0.93 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$. En general se puede observar que la variabilidad es mayor en marzo que en noviembre.

La Figura 19 presenta la distribución horizontal de la concentración de oxígeno en la superficie de la Laguna Ojo de Liebre. En marzo, el oxígeno disuelto mostró un valor mínimo de $6.63 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ en la boca de la laguna, y se observa una clara tendencia de aumento hacia el interior de la laguna, lo que sugiere que el aumento en la concentración está influenciado por la productividad primaria en la cabeza (Fig. 19.a). En noviembre (mm), hay un valor máximo superficial de $8.4 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ en la estación 5. El valor mínimo de $5.5 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$, se registró en la estación 13 y la 9. En la estación 13 este mínimo se ubica en la misma zona con los mínimos de salinidad, clorofilas, NO_2 , NH_4 y PO_4 y el máximo de temperatura, lo que sugiere la presencia de un aporte de agua externo a la laguna (Fig. 19. b).

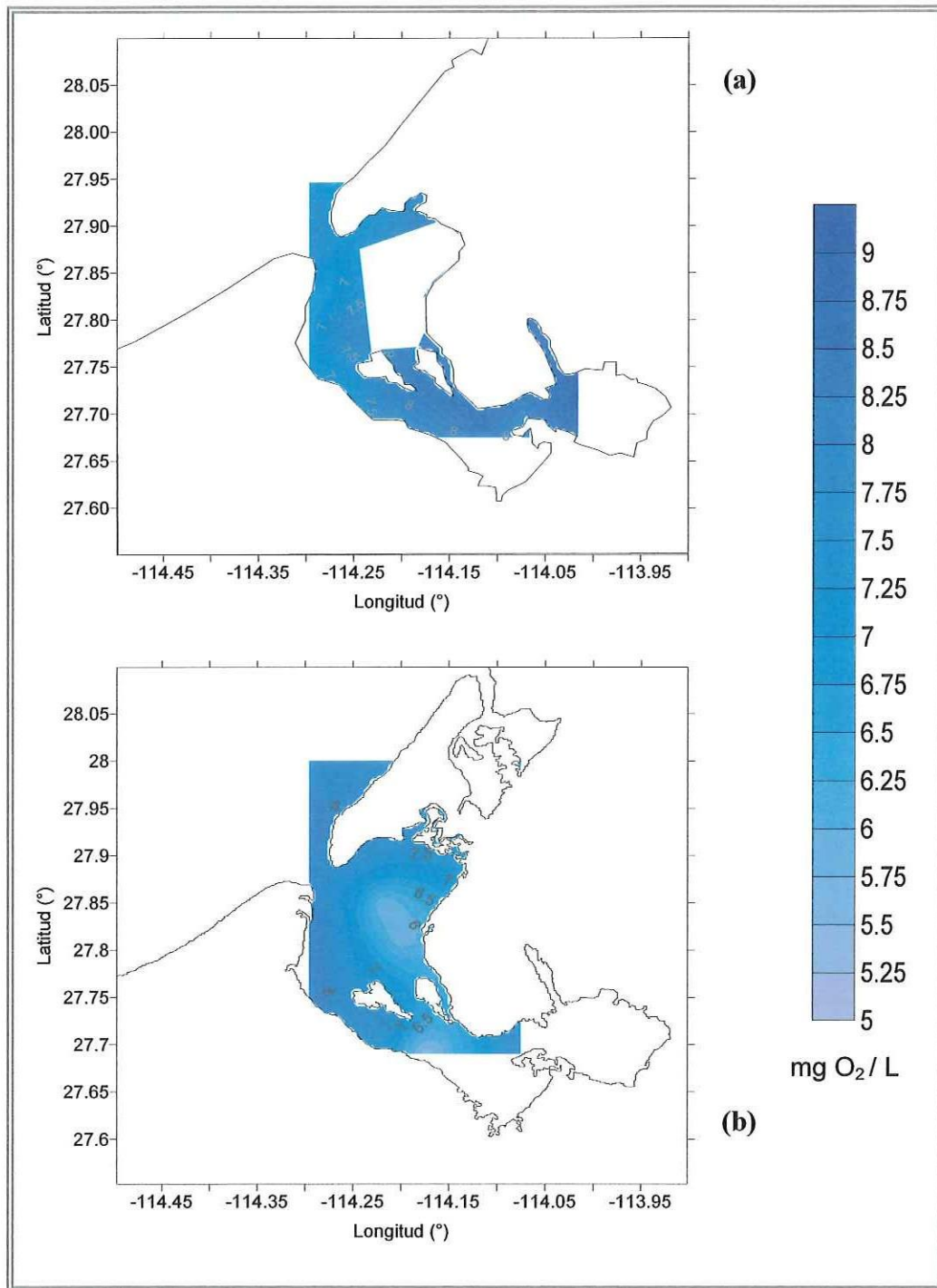


Figura 19. Distribución horizontal superficial de la concentración de oxígeno en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre.

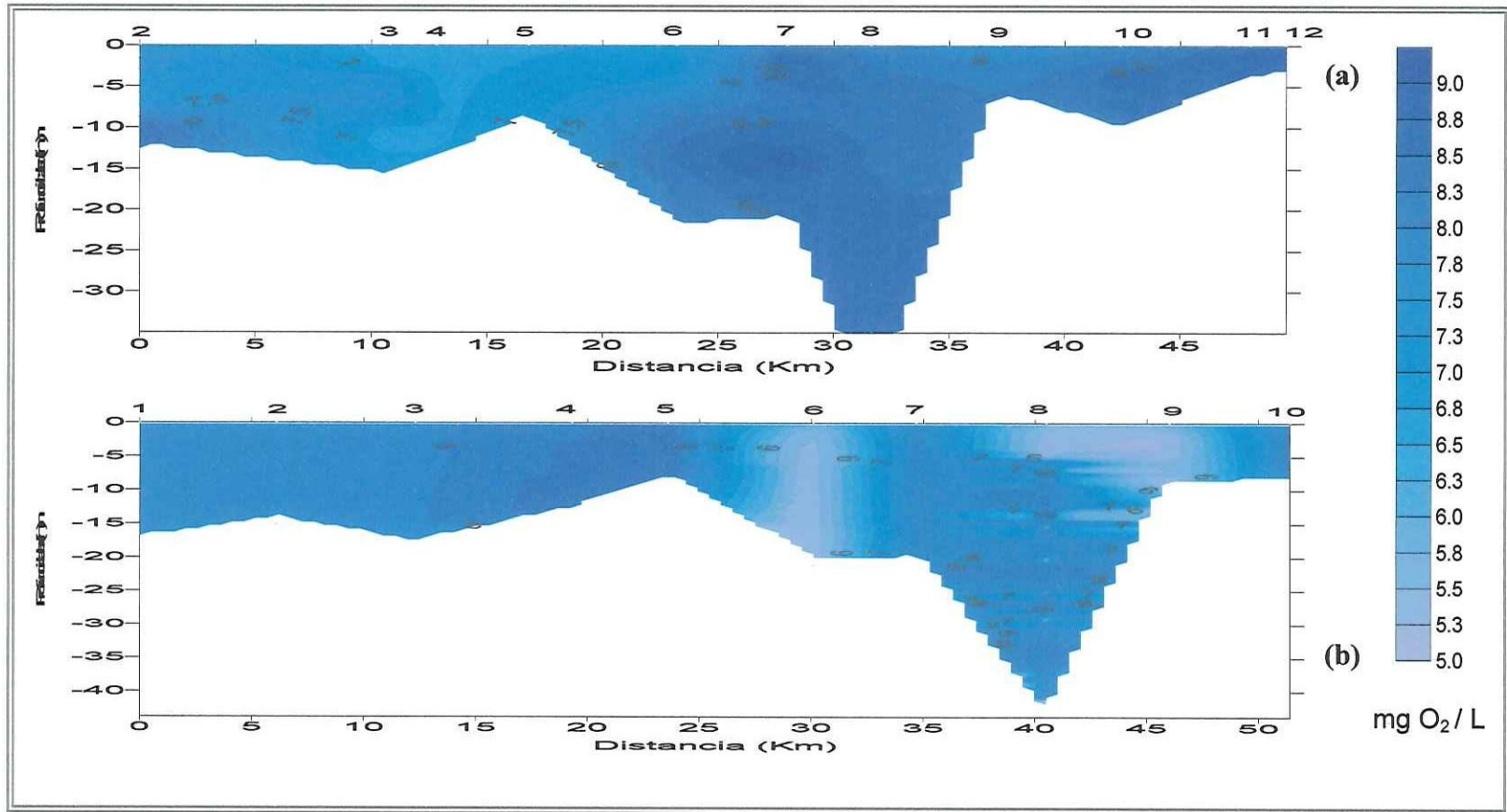


Figura 20. Distribución vertical de la concentración de oxígeno a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte inferior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura).

La Figura 20 es un perfil vertical de la distribución del oxígeno a lo largo del canal principal de la Laguna Ojo de liebre, el cual fue construido con las mismas consideraciones que el perfil de temperatura. A lo largo del transecto principal en marzo (mv) se observa un mínimo superficial de $7 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ en la boca (estación 3 y 4), y un máximo subsuperficial (15 m) de $9.5 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ a la mitad del canal (Fig. 20. a.). En noviembre (mm), en el transecto principal de la Laguna Ojo de Liebre, se observa un mínimo de $5.29 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ en la estación 6, 8 y 9, y un máximo de $8.47 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ en la estación 5. Hay un aumento de la concentración hasta la mitad del canal, donde se encuentra la concentración mínima (estación 6); de ahí en adelante en las estaciones cercanas a la cabeza, tanto la distribución horizontal como vertical tiene mucha variabilidad (Fig. 20. b.).

En marzo (mv), se presentan perfiles verticales con muy poca variabilidad, sin embargo se observa un ligero aumento con la profundidad (Fig. 20. a.). En los perfiles verticales de noviembre (mm) se observa cierta tendencia a aumentar con la profundidad, sin embargo, los valores máximos están subsuperficialmente entre 5 y 15 m (Fig. 20.b).

Clorofilas:

La concentración de clorofila en marzo (mv) es de $<0.03\text{-}8.78 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ con un promedio de $2.76 \pm 1.67 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$. El promedio de noviembre (mm) fue de $8.24 \pm 1.25 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$. Los valores promedio de noviembre son más altos y con menor variabilidad que en marzo.

La distribución superficial de las clorofilas en la Laguna Ojo de Liebre está representada en la figura 21. En marzo (mv), la clorofila superficial mostró los valores más altos ($8.78 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$) en la zona noreste y en la cabeza de la laguna; el mínimo en la boca ($<0.03 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$) en la zona donde se observa más mezcla (Fig. 21.a.). En noviembre, la distribución superficial presenta un máximo de $13.37 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ en la boca, y un mínimo de $0.99 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ en la parte sur cercana a las islas (Fig. 21.b.).

La figura 22 es una representación gráfica de la distribución de la concentración de clorofilas a lo largo del canal principal de la laguna. A lo largo del transecto principal en Laguna Ojo de Liebre, en marzo (mv) hay un mínimo en la boca de la laguna de $< 0.05 \mu\text{g L}^{-1}$, y un máximo de $8.5 \mu\text{g L}^{-1}$ en la cabeza (Fig. 22. a.). También se observa un valor alto ($3.68 \mu\text{g L}^{-1}$) en la estación 6, en el fondo, la cual corresponde con una zona máxima de todos los nutrientes, lo que sugiere que el incremento en la concentración de clorofila es debida a la alta concentración de nutrientes. En noviembre (mm) las clorofilas a lo largo del transecto principal de la laguna presentaron la concentración mínima $< 0.03 \mu\text{g L}^{-1}$ a la mitad del canal (estación 6) y una concentración máxima de $13.5 \mu\text{g L}^{-1}$ en la boca (Fig. 22.b).

En marzo (mv), la distribución vertical de la clorofila mostró una amplia tendencia a aumentar con la profundidad en las estaciones cercanas a la boca, mientras que las estaciones cercanas a la cabeza mostraron una mayor concentración en la superficie (Fig. 22.a.). En noviembre, se observa que en las estaciones cercanas a la boca la distribución vertical presenta un claro aumento con la profundidad hasta la estación 6 donde la distribución es homogénea verticalmente. En la parte más profunda del canal no hay un patrón vertical definido, y se observan concentraciones muy elevadas. En las estaciones cercanas a la cabeza, la distribución vertical es homogénea (Fig. 22.b).

ANÁLISIS DE VARIABLES

Para el análisis de las variables determinadas en este estudio se utilizaron los valores medidos en las estaciones del canal principal de la Laguna Ojo de liebre, ya que en esta zona es donde se puede observar mejor la dinámica de la laguna.

La figura 23 es una representación gráfica de la relación entre la temperatura y la salinidad, ya que éstas son las variables conservativas, es decir, que sus variaciones no están determinadas por procesos biológicos. En marzo, hay una correlación positiva

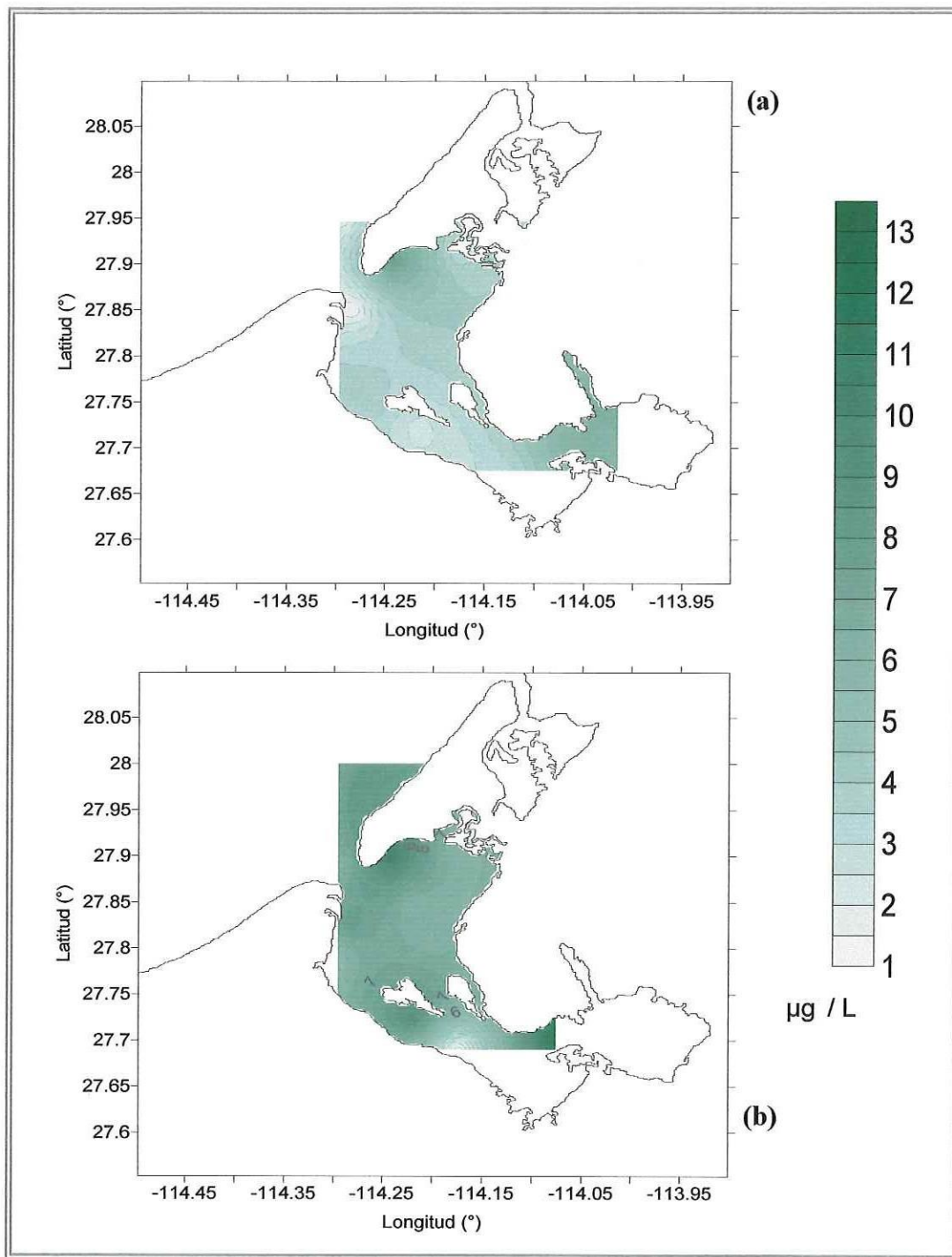


Figura 21. Distribución horizontal superficial de la concentración de clorofilas en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b) en Laguna Ojo de Liebre.

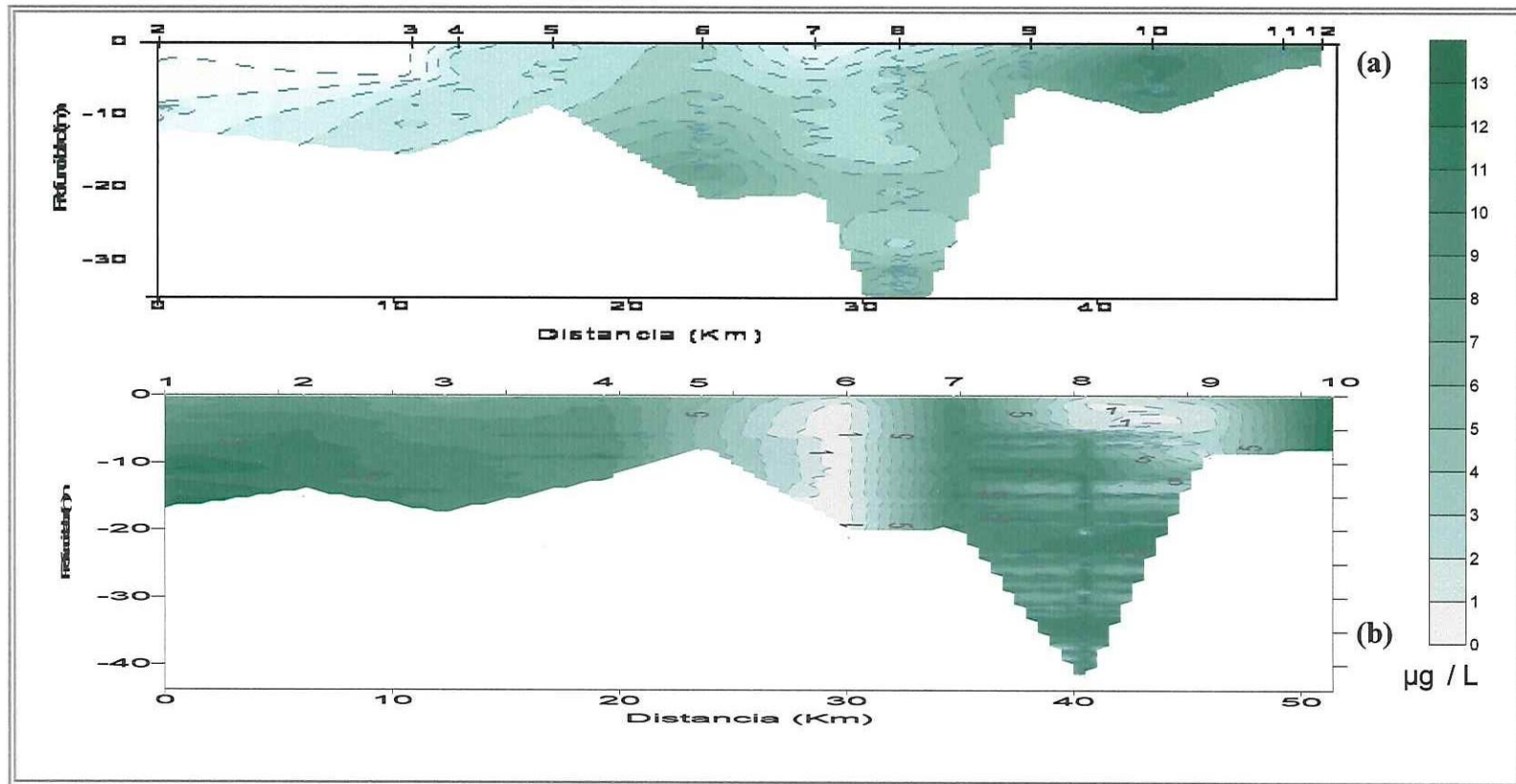


Figura 22. Distribución vertical de la concentración de clorofilas a lo largo del canal principal de Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000 (a) y noviembre del 2001 (b). (Los números de la parte inferior del eje de las X representan la distancia a partir de la boca y los de la parte superior representan las estaciones que se usaron para construir esta figura).

entre la temperatura y la salinidad, lo que indica que hay evaporación. Además no se observan diferencias entre la superficie y el fondo, lo que indica, que la acción de las mareas vivas en este periodo hace que el agua esté bien mezclada (Fig. 23.a.). En noviembre hay una correlación positiva en la superficie, lo que indica evaporación. En el fondo, hay una correlación inversa. Estas diferencias entre la superficie y el fondo indican que hay estratificación, debido a que la dinámica es más baja en las mareas muertas (Fig. 23.b).

La figura 24 muestra la relación entre los nutrientes inorgánicos nitrogenados y la salinidad. Se puede observar que ninguno de los nutrientes nitrogenados tiene correlación lineal con la salinidad, lo que indica que éstos no tienen un comportamiento conservativo, es decir, los procesos biológicos afectan más la distribución de los nutrientes que la salinidad. Sin embargo, en ambos muestreos se pueden observar tres zonas diferentes: la boca (donde se observan las salinidades menores), la zona de salinidad intermedia, y la cabeza (con salinidades altas). En ambos muestreos se observa también que en la boca hay aporte de nutrientes nitrogenados, los cuales a excepción de los nitratos en noviembre, tienden a mantenerse. Se observa además que en la parte media del canal hay un consumo de nutrientes ya que las concentraciones son bajas en todos los casos, a excepción de los nitratos en marzo. Además es importante mencionar que en la cabeza de la laguna se observa que la concentración de los nutrientes aumenta, lo que sugiere ya sea que hay regeneración de estos nutrientes o un aporte.

La concentración de clorofila a y la concentración de oxígeno disuelto se correlacionaron positivamente en ambos muestreos (Fig. 25), sin embargo la correlación entre estas variables en noviembre no es estadísticamente significativa. En el mes de marzo, las concentraciones de clorofila "a" ($<0.05 \mu\text{g/L}$) y de oxígeno disuelto (6.4 mg/L) más bajas medidas en este estudio se detectaron en la boca, ambas variables mostraron una tendencia de aumento hacia la cabeza y alcanzaron sus máximas concentraciones a 45 Km. de la boca, con concentraciones de $8 \mu\text{g L}^{-1}$ de clorofila y 9 mg L^{-1} de oxígeno. En noviembre, las concentraciones más bajas medidas

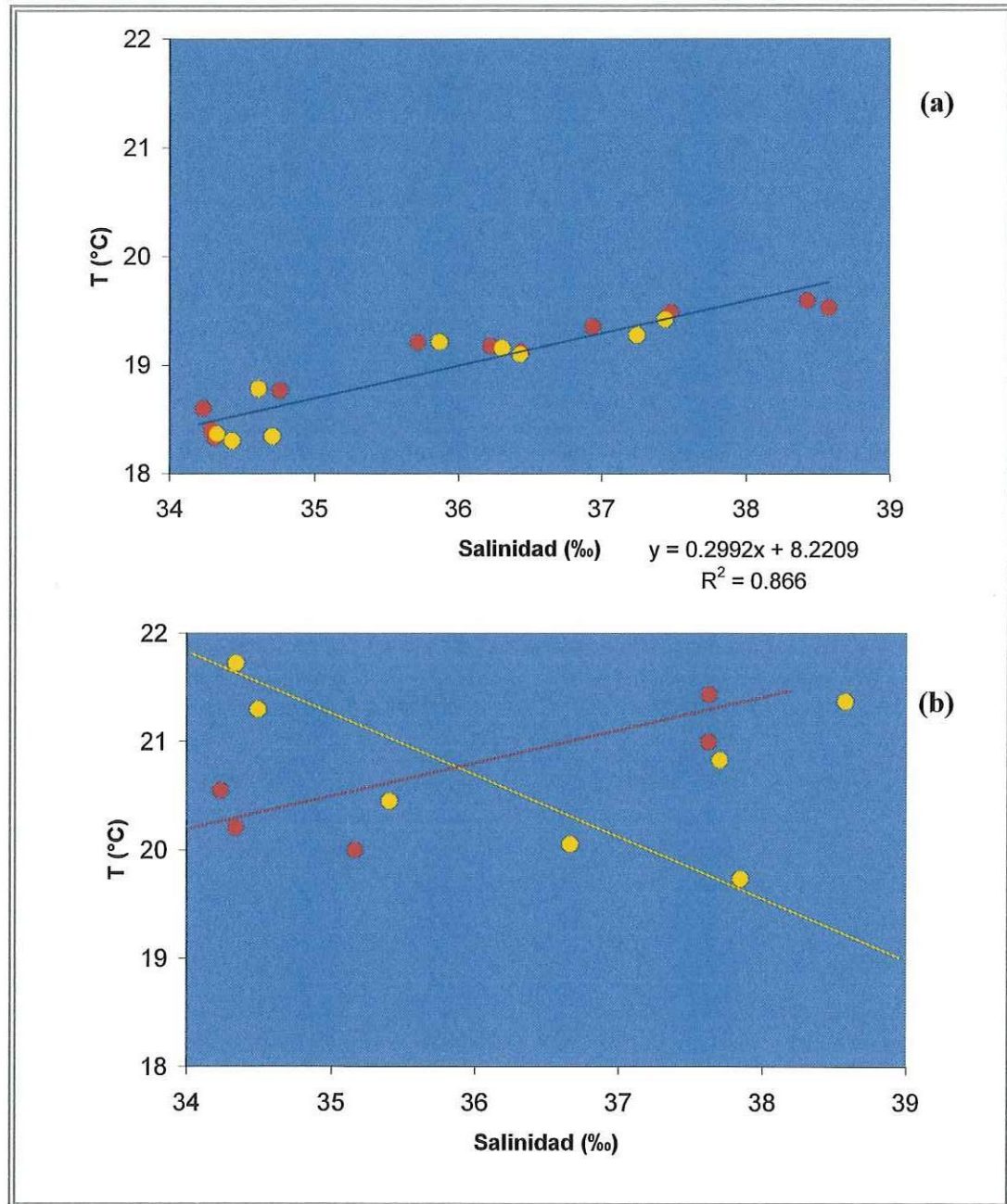


Figura 23. Relación entre la salinidad y la temperatura en la laguna de la Laguna Ojo de Liebre en: a).-marzo 2000 y b).-noviembre 2001. Los círculos rojos corresponden la superficie, los círculos amarillos al fondo y la línea azul a la tendencia.

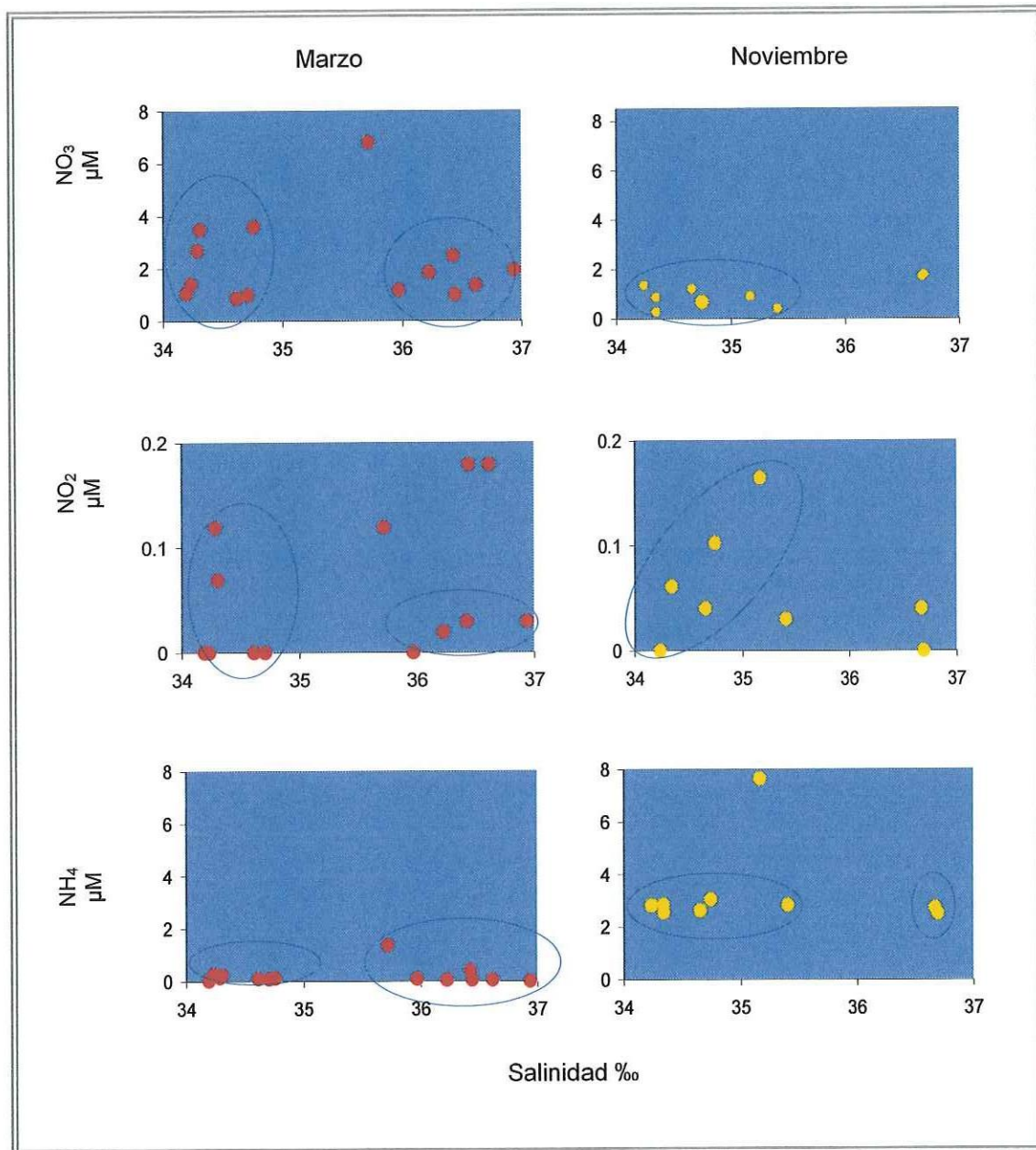


Figura 24. Relación entre los nitratos, nitritos y amonio, y la salinidad en la Laguna Ojo de Liebre. El muestreo de marzo de 2000 está representado con rojo y el de noviembre de 2001 con amarillo

de clorofila "a" ($<0.01 \mu\text{g/L}$) y de oxígeno disuelto (5.3 mg/L) fueron encontradas en la parte central de la laguna (Fig. 20 y 22. b.)

Para poder determinar si la concentración de oxígeno depende de procesos biológicos se determinó el porcentaje de saturación usando la ecuación de Weiss (1970). La figura 25.b. representa la relación entre el porcentaje de saturación de oxígeno y la concentración de clorofila medida a lo largo del canal principal. Las marcas rojas representan los valores del mes de marzo y las marcas amarillas los de noviembre. En marzo, los niveles de oxígeno de sobresaturación ($>100\%$) se encontraron asociados a concentraciones altas de clorofila a, lo que sugiere que hay actividad biológica ($>2.5 \mu\text{g L}^{-1}$, Fig. 20.a). En noviembre, se observa un nivel de sobresaturación (113-122 %) de oxígeno en todas las zonas muestreadas. Los niveles de sobresaturación están asociados a todas las concentraciones de clorofila medidas ($>6 \mu\text{g L}^{-1}$, Fig. 20.b), lo que sugiere también alta productividad primaria.

RAZÓN N:P Y LEY DEL MÍNIMO DE LEIBIG :

Con la finalidad de encontrar el nutriente limitante se determinó la razón N:P, con la suma de los nutrientes nitrogenados inorgánicos (nitratos, nitritos y amonio) entre la concentración de fosfatos medidos. Ésta es una razón atómica. La razón N:P encontrada en la Laguna Ojo de Liebre en ambos muestreos es <6 , lo que sugiere que se trata de un sistema en donde el nitrógeno es el elemento que define el crecimiento fitoplanctónico para la productividad primaria de este sistema, ya que la demanda del fitoplancton, como lo establece la razón de Redfield es de 16:1. Se puede observar que la razón N:P promedio del mes de marzo (2.93) fue menor que la de noviembre (5.03), con una tendencia a que esta relación aumente hacia los en la boca, disminuya en la parte central del canal y se incremente en las estaciones cercanas a la cabeza. La zona de disminución de la razón N:P en marzo indica un consumo de nitrógeno

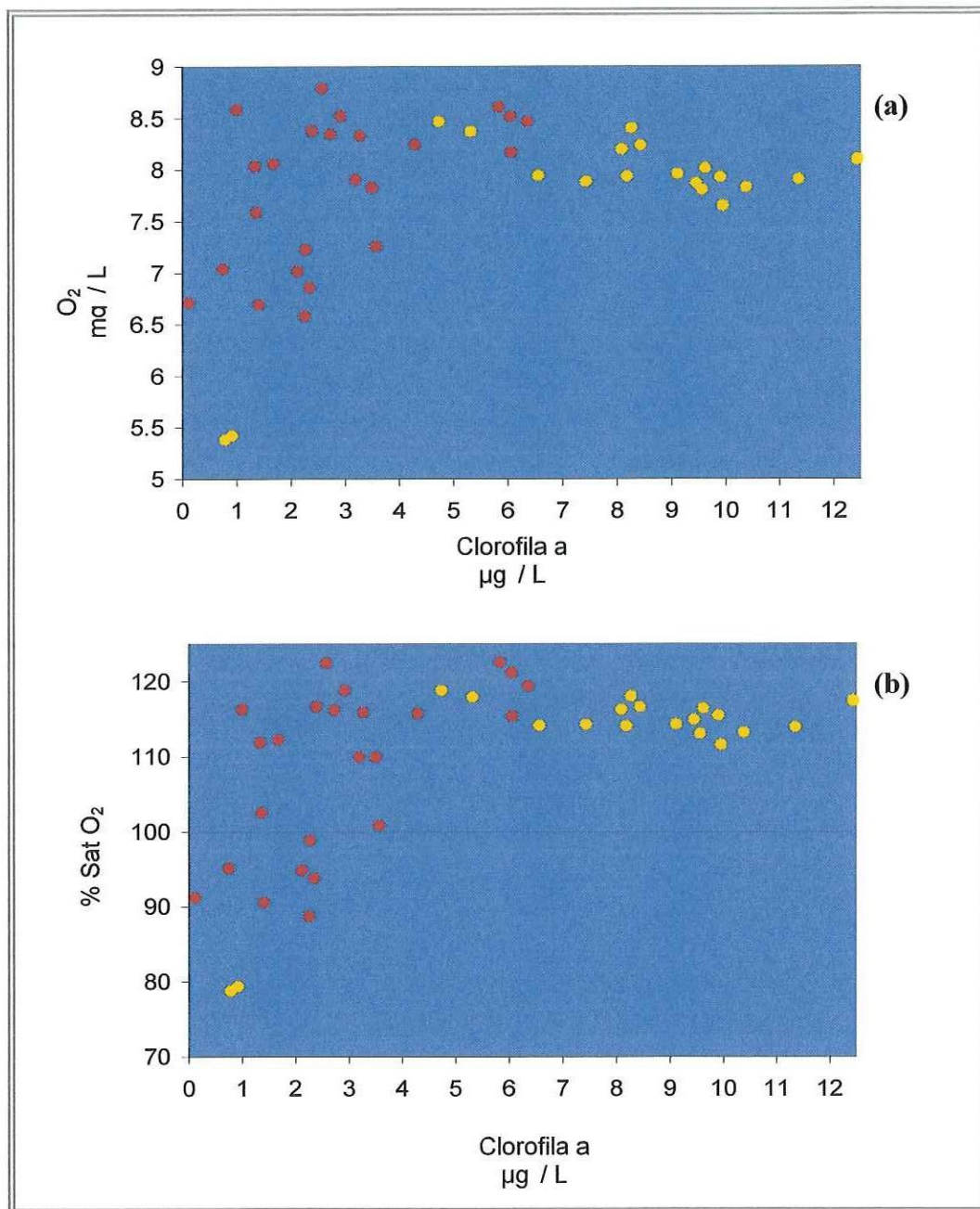


Figura 25. Relación entre la concentración de oxígeno disuelto y la concentración de clorofila "a en Laguna Ojo de Liebre. Los círculos rojos representan el muestreo de marzo de 2000 y los amarillos el de noviembre de 2001

inorgánico, el aumento en la cabeza sugiere que aumenta la proporción del fósforo, es decir, hay regeneración de este nutriente. En noviembre la razón N:P indica solamente que la proporción de nitrógeno es mayor que la del fósforo, debido a la amonificación.

ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTOS:

Con la finalidad de identificar áreas con condiciones fisicoquímicas comunes se realizó un análisis de agrupamientos (análisis cluster) con los datos obtenidos de ambos muestreos en Laguna de Ojo de Liebre. Este análisis se realizó con dos grupos de variables: a). con temperatura y salinidad, b) con nutrientes inorgánicos.

En ambos muestreos, el agrupamiento a partir de temperatura y salinidad permitió identificar 3 zonas cuyos valores fueron estadísticamente diferentes hasta un nivel de confianza del 99.99 %. Las características de los tres grupos para marzo y noviembre, se describen en las tablas III y IV respectivamente.

En el muestreo de marea viva de marzo, puede observarse que el grupo 1; reúne a las estaciones de muestreo pertenecientes a la boca y presentó la temperatura promedio y la salinidad promedio más bajas de los tres grupos, el grupo 2 reúne a las estaciones localizadas en la zona central de la laguna y finalmente, el grupo III reúne a las estaciones localizadas en la cabeza, la cual presentó los valores más altos de temperatura y salinidad (Fig. 26).

En la marea muerta de noviembre, el grupo 1 reúne a las estaciones de la boca, el grupo 2, el cual presenta la temperatura promedio más alta y la salinidad promedio más baja reúne a las estaciones de la zona central, y finalmente en el grupo 3, que reúne a las estaciones cercanas a la cabeza, tiene la temperatura promedio más baja y la salinidad promedio más baja (Fig. 27).

Tabla III. Estadística descriptiva y miembros de las zona identificadas con el análisis de agrupamiento hecho con los valores de temperatura y salinidad para la Laguna Ojo de Liebre en marzo del 2000. Donde X es el promedio, S es la desviación estándar y n es el número de datos para cada variable.

Variable	Grupo 1			Grupo 2			Grupo 3		
	X	S	n	X	S	n	X	S	n
Temperatura (°C)	18.46	0.16	107	19.22	0.12	141	19.53	0.06	38
Salinidad (ups)	34.43	0.20	107	36.34	0.52	141	38.44	0.48	38
Estaciones	2, 3, 4, 5 y 13			1, 6, 7, 8 y 9			10, 11 y 12		

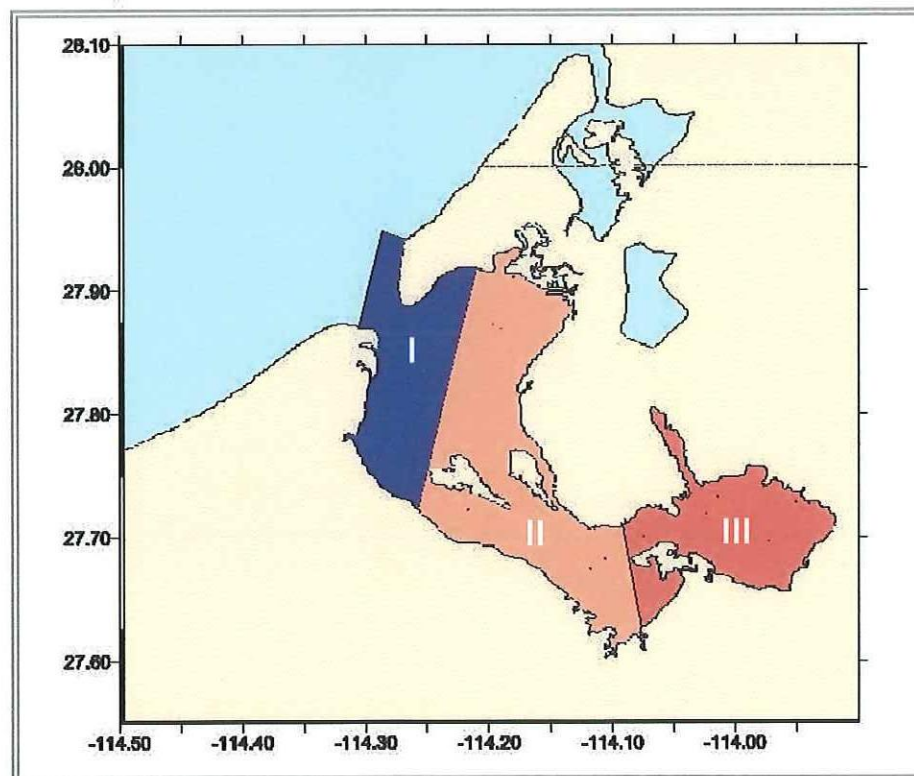


Figura 26. Zonas de la Laguna de Ojo de Liebre identificadas por su temperatura y salinidad correspondientes al muestreo de marzo 2000 (Las áreas coloreadas indican las zonas identificadas con el análisis cluster).

Los resultados obtenidos con el análisis cluster, para nitratos, nitritos, fosfatos y silicatos no muestran una distribución por grupo, sino una zonificación irregular en forma de parches. El nivel de significancia de este análisis era muy bajo, por lo que no se pueden definir áreas determinadas, lo que sugiere que la mezcla en las diferentes áreas casi no influye la distribución de los nutrientes.

Con los datos obtenidos del análisis de agrupamientos a partir de temperatura y salinidad se determinó la estadística descriptiva de los nutrientes inorgánicos. Con estos datos se puede observar que además de que no hay una distribución homogénea, ya que los valores promedio son muy variables, hay una amplia variabilidad dentro de los mismos grupos, por lo que no se encuentra ninguna relación directa con la hidrología, es decir, se trata de variables no conservativas, cuya variación depende principalmente de procesos biológicos.

En la marea viva de marzo se observa una alta variabilidad de nitratos, nitritos y amonio en el grupo II, lo que indica que en esta zona hay una alta actividad biológica. Los fosfatos presentan mayor variabilidad en el grupo III debido a que en la cabeza los procesos biológicos son importantes para la regeneración de este nutriente. La razón N/P tiene un promedio menor y variabilidad mayor en la cabeza, lo sugiere una disminución en la proporción del nitrógeno total por consumo y/o la regeneración del fósforo (Tabla V).

En la marea muerta de noviembre, el amonio no presenta mucha variabilidad en ninguno de los grupos, sin embargo la concentración promedio del grupo III (cabeza) es menor que en el grupo I y II, lo que indica cierto consumo. Los nitratos presentan la mayor variabilidad en el centro, mientras que los nitritos mantienen un valor promedio y una variabilidad similar en los tres grupos. En general la variabilidad del nitrógeno total disminuye hacia la cabeza de la laguna, mientras que la del fósforo aumenta. Las concentraciones altas de amonio en las tres zonas indican que el proceso de amonificación es importante en la marea muerta de noviembre (Tabla VI).

Tabla IV. Estadística descriptiva y miembros de las zona identificadas con el análisis de agrupamiento hecho con los valores de temperatura y salinidad para la Laguna Ojo de Liebre, para noviembre de 2001. Donde X es el promedio, S es la desviación estándar y n es el número de datos para cada variable.

Variable	Grupo 1			Grupo 2			Grupo 3		
	X	S	n	X	S	n	X	S	n
Temperatura (°C)	21.02	0.69	20	28.38	0.18	4	20.92	0.53	9
Salinidad (ups)	34.02	0.49	20	30.15	0.15	4	37.95	1.00	9
Estaciones	1, 2, 3, 4, 5, 15, 16			13, 14			6, 7, 8, 9, 10		

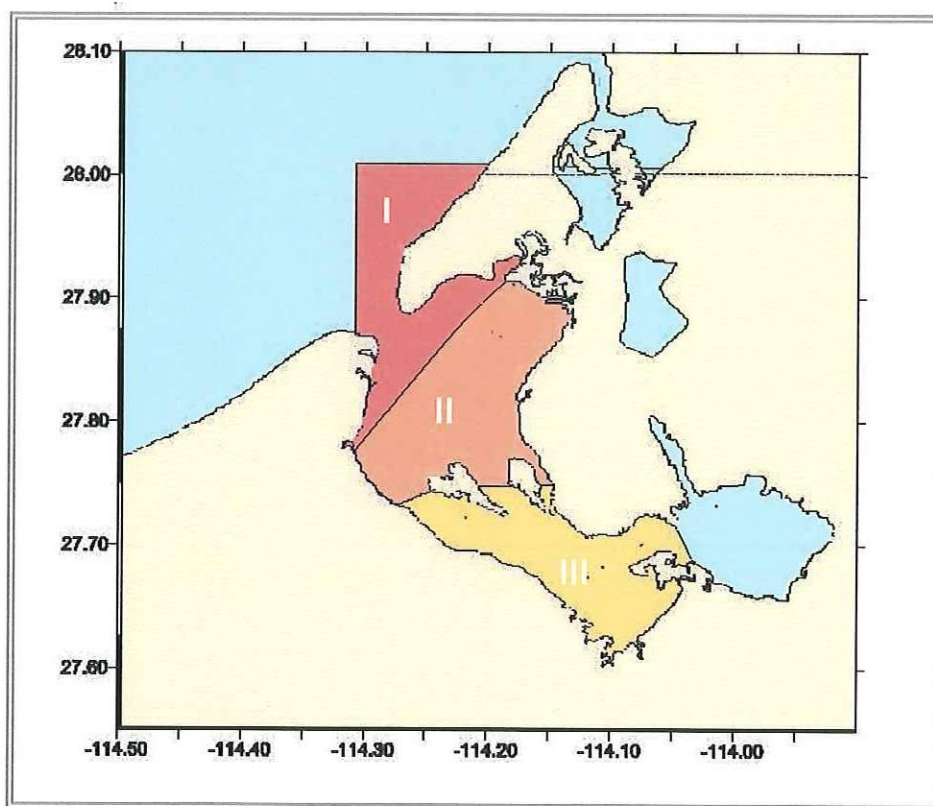


Figura 27. Zonas de la Laguna de Ojo de Liebre identificadas por su temperatura y salinidad correspondientes al muestreo de noviembre de 2001 (Las áreas coloreadas indican los zonas identificadas con el análisis cluster).

DISCUSIÓN

En cualquier estudio de una laguna costera es casi imposible describir los procesos químicos que ahí ocurren sin hacer previamente algunas consideraciones acerca de los procesos físicos que actúan en ese sistema, ya que el tiempo de residencia, la mezcla y las mareas pueden controlar algunos ciclos biogeoquímicos. El régimen de la laguna va a estar determinado por la relación entre la entrada y salida de agua de diferente salinidad y la evaporación (Emery y Stevenson, 1968^a; Groen, 1969). A los sistemas en los que la evaporación neta es mayor que el aporte de agua dulce, se les conoce como antiestuarinos, esto genera un incremento en la densidad produciendo que el agua se hunda y fluya cerca del fondo hacia la boca de la laguna. El resultado de esto es a lo que se le conoce como "circulación antiestuarina", en la que el agua de mar entra por la superficie y el agua de mayor salinidad sale por el fondo.

Laguna de Ojo de Liebre se encuentra ubicada en la región desértica de la península de Baja California, donde la precipitación ($<100 \text{ mm}^3 \text{ año}^{-1}$), los aportes superficiales o subterráneos son prácticamente nulos. La evaporación varía estacionalmente con un valor promedio de $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. Combinando este valor con el área de la laguna, reportada por Danenmann (1988), se puede calcular un flujo de agua a la atmósfera de $2.86 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, lo que indica que la evaporación excede a la precipitación total, de manera que se trata de un sistema evaporativo neto. Este cálculo es consistente con las observaciones hechas en este trabajo, ya que en ambos muestreos, la salinidad y la densidad se incrementan hacia el interior de la laguna indicando que la evaporación excede la precipitación (Fig. 5, 7 y 8). Comporta como un antiestuario. En el muestreo de noviembre, la salinidad y la densidad aumentan hacia el interior de la laguna (Fig 7 y 8), y se observan la entrada de agua de menor salinidad en la superficie y la salida de agua de mayor salinidad por el fondo, lo que es característico de una circulación antiestuarina.

Tabla V. Estadística descriptiva de la zona identificada con el análisis de agrupamiento hecho con los valores de temperatura y salinidad para la Laguna Ojo de Liebre, en marzo del 2000. Donde X es el promedio, S es la desviación estándar, % Var es el porcentaje de variabilidad y n es el número de datos para cada variable.

Variable	Grupo 1				Grupo 2				Grupo 3			
	X	S	%Var	n	X	S	%Var	n	X	S	%Var	n
Amonio (μM)	0.13	0.07	58.0	9	0.48	0.56	117.6	8	0.19	0.07	34.3	2
Nitritos (μM)	0.11	0.09	82.0	4	0.09	0.07	76.8	7	0.04	0.01	15.9	2
Nitratos (μM)	1.85	1.11	60.1	9	2.90	2.33	80.2	9	1.18	0.74	62.5	2
Fosfatos (μM)	0.93	0.07	7.5	9	1.20	0.37	31.1	9	1.15	0.48	42.1	2
Silicatos (μM)	5.36	5.01	93.5	8	3.24	1.91	58.9	8	3.08	0.95	31.0	2
N _{Total} (μM)	3.13	0.96	30.7	4	4.04	3.37	83.3	6	1.42	0.81	57.2	2
N/P (μM)	3.27	1.18	36.1	4	3.01	2.03	67.4	6	1.52	1.35	88.7	2

Tabla VI. Estadística descriptiva de las zona identificadas con el análisis de agrupamiento hecho con los valores temperatura y salinidad para la Laguna Ojo de Liebre, en noviembre de 2001. Donde X es el promedio, S es la desviación estándar, %Var es el porcentaje de variabilidad y n es el número de datos para cada variable.

Variable	Grupo 1				Grupo 2				Grupo 3			
	X	S	%Var	n	X	S	%Var	n	X	S	%Var	n
Amonio (μM)	3.26	1.22	37.4	16	3.31	0.95	28.8	4	2.27	0.16	5.8	9
Nitritos (μM)	0.09	0.06	63.8	13	0.10	0.06	64.3	4	0.09	0.05	60.0	8
Nitratos (μM)	0.98	0.54	55.7	16	1.02	1.21	119.0	4	1.50	0.56	37.4	9
Fosfatos (μM)	0.96	0.36	37.3	15	0.78	0.05	6.3	4	1.05	0.67	63.2	8
Silicatos (μM)	4.89	0.84	17.2	16	5.95	0.70	11.8	4	5.13	0.90	17.5	9
N _{Total} (μM)	4.31	1.46	33.8	16	4.43	1.51	34.0	4	4.29	0.55	12.8	9
N/P (μM)	4.90	2.02	41.3	15	5.80	2.29	39.5	4	5.29	2.58	48.8	8

Las estaciones ubicadas en la boca presentan valores característicos de aguas oceánicas, las cuales se mantienen hacia los primeros 12 Km. a partir de la boca de la Laguna Ojo de liebre, en ambos muestreos. (Fig. 5 y 7). Los perfiles de salinidad muestran una estratificación en el interior de la laguna a partir de este punto, encontrándose los valores máximos de 38.8 ‰ superficiales y 39.3 ‰ en marzo y en noviembre respectivamente en la cabeza. Esto indica que la Laguna Ojo de Liebre se comporta como un antiestuario. En el muestreo de noviembre, la salinidad y la densidad aumentan hacia el interior de la laguna (Fig 7 y 8), y se observan la entrada de agua de menor salinidad en la superficie y la salida de agua de mayor salinidad por el fondo, lo que es característico de una circulación antiestuarina.

En general, las condiciones físicas dentro de la laguna Ojo de Liebre determinaron tres zonas hidrológicamente diferentes en ambos muestreos: la boca, una zona de transición en la parte central, y la cabeza. (Fig. 26 y 27). Las variaciones de temperatura y salinidad en la boca están controladas por las condiciones de la zona costera adyacente, especialmente las corrientes de marea que intercambian el agua entre el océano y la laguna, a una razón de 1 a 3 m min⁻¹ (Contreras, 1988). Las variaciones del centro están afectadas aparentemente por un aporte externo, que puede observarse con mayor claridad en noviembre donde se registró una temperatura elevada (28.6 °C) y muy baja salinidad (29.3 ‰) que cubre un área amplia (40 Km²). En la cabeza la evaporación genera un aumento de salinidad que se compensa mediante un flujo difusivo resultante de los procesos de mezcla por la marea, el esfuerzo del viento, y otros procesos actuando a lo largo del eje principal de la laguna, lo que genera un flujo antiestuarino.

La falta de un aporte de agua dulce continuo en esta zona enfatiza la importancia del intercambio de materiales disueltos y particulados con el océano adyacente. Las fuentes potenciales de nutrientes en una laguna costera son los aportes por ríos, por precipitación, por escurrimientos, aportes antropogénicos y por intercambio con el océano. Debido a que los aportes de nutrientes desde el continente hacia esta laguna son prácticamente nulos, las aguas ricas en nutrientes producidas durante las surgencias en el océano adyacente se transportan al interior de la laguna, y de este modo, sus ciclos biogeoquímicos se alteran internamente. La distribución de la

salinidad, la temperatura y los nutrientes en esta laguna depende del tiempo de residencia del agua y de los procesos biogeoquímicos que ahí ocurran. También dependerán del tipo de mareas (incluyendo cambios de desfase, disipación, retraso y/o anulación) (De la Lanza-Espino, 1994) y de la variabilidad de las surgencias, las cual ocurren con mayor intensidad durante la época de primavera-verano (Bakun, 1977).

En marzo, durante mareas vivas, los nitratos y nitritos presentaron las concentraciones superficiales más altas en la región de la boca y disminuyeron hacia el interior del sistema (Fig. 10.a y 12.a), indicando que en este periodo los aportes externos son más importantes que los internos. Ibarra-Obando *et al.* (2001) han señalado que las Lagunas Costeras de Baja California son aprovisionadas con nutrientes provenientes de surgencias. Además, en la parte angosta del canal principal, se sugiere la producción de amonio a partir de materia orgánica mediante el proceso de amonificación (Fig. 13 y 14 a.). En contraste, en noviembre, durante mareas muertas, del 2001, la concentración de nitratos y nitritos tiene una tendencia a aumentar hacia el interior de la laguna (Fig. 10.b y 12.b), lo que indica que además de aporte oceánico, el proceso de remineralización es importante para este periodo. En el mes de noviembre la concentración de amonio fue 16 veces mayor que en marzo y se mantuvo constante a lo largo de toda la laguna con valores de hasta 7 μM , y con una tendencia a disminuir hacia el interior. En noviembre el nitrógeno inorgánico depende principalmente de la cantidad de amonio (Fig. 14. b.) Se observa una tendencia al aumento de concentración hacia el centro de la laguna, lo que sugiere que el amonio es remineralizado a partir de la materia orgánica por acción bacteriana (nitrificación) (Fig. 13.b).

En ambos muestreos, la distribución espacial del fosfato mostró una tendencia a aumentar hacia el interior de la laguna (Fig. 16), esto sugiere que el fosfato es remineralizado a partir de la materia orgánica por acción bacteriana, lo que concuerda con lo observado para el nitrógeno. En el muestreo de noviembre había un intervalo de marea muerta (Fig. 3), por lo que el tiempo de residencia del agua es prolongado en esta laguna debido a su gran extensión, esto crea las condiciones para que el proceso

de remineralización sea más importante en el sostenimiento del contenido de nutrientes en la laguna.

La ley del mínimo de Leibig dice que el elemento presente en la menor cantidad relativa será el limitante para la productividad primaria (Millero, 1996). La razón N/P en las diatomeas marinas es de alrededor de 16:1 cuando los niveles de nutrientes en el agua son suficientes (Redfield *et al*, 1963). Cualquier modificación de esta razón en la columna de los nutrientes disponibles en la columna de agua, indica una limitación potencial del crecimiento del fitoplancton generada por la deficiencia de nitrógeno o fósforo. Una razón N/P > 30 indica limitación de fósforo, mientras que una razón de N/P < 10 indica limitación por nitrógeno (Contreras, 1985). La razón N:P promedio en marzo fue de 2.93 y en noviembre de 5.03. De acuerdo a esto, se puede decir en ambos casos, que la productividad está determinada por la disponibilidad del nitrógeno, la cual puede deberse al intenso requerimiento de nitrógeno de los pastos marinos que son los productores primarios predominantes, y al tiempo de residencia prolongado del agua en la Laguna Ojo de Liebre, que de acuerdo a Postma (1965) es de 100 días.

En la primavera del 2000, la distribución horizontal de la clorofila mostró un claro incremento hacia el interior de la laguna. Los valores medidos variaron de <0.5 a 8.1 $\mu\text{g L}^{-1}$, los cuales son consistentes con las mediciones de otros investigadores. Por ejemplo Millán-Núñez *et al* (1987), en un estudio realizado durante la primavera reportaron valores de clorofila entre 0.5 y 4.5 $\mu\text{g L}^{-1}$ en una red de muestreo similar a la realizada en este trabajo. En este caso, en marzo, se registraron niveles de clorofila-a >2.5 $\mu\text{g L}^{-1}$ en el centro de la laguna y aumentaron hasta alcanzar valores >8.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ en las estaciones cercanas a la cabeza, indicando la presencia de un florecimiento fitoplanctónico hacia la cabeza de la laguna (Fig. 22.a). Evidencia adicional de este florecimiento se encuentra en la relación entre la clorofila y el oxígeno (Fig. 25), ya que se encontró una correlación positiva entre estas variables ($r = 0.51$). En marzo, los niveles de oxígeno de sobresaturación (>100%) se encontraron asociados a concentraciones altas de clorofila a (>2.5 mg/m^3). En noviembre, se observa un nivel de sobresaturación (113-122 %) de oxígeno en todas las zonas muestreadas, lo que indica mayor actividad fotosintética (Fig. 25.b), esto probablemente debido a que en noviembre la actividad fotosintética era promovida por una mayor estratificación en la

columna, resultado de las mareas muertas. En marzo, la actividad fotosintética era inhibida por el efecto de mezcla producido por las mareas vivas.

CONCLUSIONES

Los valores de temperatura y salinidad observaron una clara tendencia a aumentar hacia el interior de la laguna en el muestreo en la marea viva de marzo, lo que sugiere una evaporación neta producto del alto tiempo de residencia.

En marzo y en noviembre, la hidrología permitió identificar una circulación antiestuarina.

La distribución espacial de los nitratos y nitritos en época de mareas vivas en marzo tuvo una tendencia a disminuir hacia el interior de la laguna lo que sugiere que el aporte oceánico de estos nutrientes es de gran importancia en este periodo. En época de mareas muertas, en noviembre, el proceso de remineralización de materia orgánica es importante para mantener el enriquecimiento de nutrientes en la laguna.

Aparentemente en marzo hay remineralización de fosfato en la cabeza ya que las concentraciones medidas en esta zona, fueron mayores a las que se esperaría si este nutriente estuviera controlado sólo por procesos físicos, lo que sugiere que de alguna manera se recicla el fosfato.

En marzo la clorofila presentó valores menores a $0.05 \mu\text{g L}^{-1}$ en la boca y los más altos en la cabeza, lo que indica la presencia de un florecimiento fitoplanctónico. En noviembre, hay grandes concentraciones de clorofila distribuidas en parches irregulares que coinciden también con zonas de baja concentración de nitratos. En noviembre, se observa mayor actividad fotosintética, esto probablemente debido a que la actividad fotosintética era promovida por una mayor estratificación en la columna, resultado de las mareas muertas. En marzo, la actividad fotosintética era inhibida por el efecto de mezcla producido por las mareas vivas. La razón N:P < 10, calculada en ambos muestreos indica que la productividad primaria en la Laguna Ojo de Liebre está determinada por la concentración de nitrógeno inorgánico.

El análisis de agrupamientos en marzo del 2000 y noviembre del 2001 nos permitió dividir a la Laguna Ojo de Liebre en tres zonas diferente por su temperatura y salinidad (densidad): el área de la boca, con las mismas características del agua oceánica adyacente, una zona de transición en la zona intermedia, y la cabeza de la laguna, con aguas hiperasalinas.

REFERENCIAS:

- Álvarez-Borrego y A. Granados-Guzmán. 1992. Variación espacio-temporal de temperatura en un hábitat de invierno de la ballena gris: Laguna Ojo de Liebre. *Ciencias Marinas*. 18(1):151-165.
- Canino-Herrera S.R. y J.A. Segovia-Zavala, 1995.- Manual de Prácticas de Contaminación Marina. 2a revisión, FCM, UABC, Ensenada, México, p. 72
- Carmona, R. y G. D. Danemann. 1998. Distribución espacio-temporal de aves en la salina de Guerrero Negro, Baja California Sur, México. *Ciencias Marinas*. 24(4):389-408.
- Castellanos, A. y Llinas, J. 1991. Aves migratorias: Patos y gansos en: A. Ortega y L. Arriaga (eds.). *La Reserva de la Biosfera. El Vizcaíno en la Península de Baja California*, pp. 231-246.
- CICESE, 2000. Humedales de Baja California. Laguna Ojo de Liebre. Página de Internet (<http://www.cicese.mx/~proester/inv/ojocomplex/lol/esp/lolperfil.htm>)
- Contreras E. F., 1993. *Ecosistemas Costeros Mexicanos*. UAM. 1ª Ed., México 415. p.
- Contreras, F., 1985. *Las Lagunas Costeras Mexicanas*. Centro de Ecodesarrollo y Secretaría de Pesca. México: 265 pp.

- Contreras, F., 1988. Las Lagunas Costeras Mexicanas. 2da Edición. Centro de Ecodesarrollo y Secretaría de Pesca. México: 263 pp.
- Danemann, G. D. and J. de la Cruz-Agüero. 1993. Ichthyo-fauna of San Ignacio Lagoon, Baja California Sur, México. *Ciencias Marinas*. 13(3):333-341.
- De la Lanza-Espino y G. Cáceres-Martínez. 1994. Lagunas Costeras y el Litoral Mexicano. 1ª Edición. Universidad Autónoma de Baja California Sur. 525 pp.
- Dickson, A.G., 1993. PH buffers for seawater media based on the total hydrogen concentration scale. *Deep-Sea Res.* 40 (1): 107-118.
- Fleischer, L. 1990. Aerial surveys of gray whale (*Eschrichtius robustus*) in Mexican waters (1980-1990). Paper presented to the Scientific committee of the International whaling commission at the Special Meeting for the comprehensive assessment of the gray whale, Seattle, WA: 36pp.
- Fuhrmann R. y A. Zirino, 1988.- High-resolution determination of the pH of seawater with a flow-through system. *Deep-Sea Res.* 35 (2) pp. 197-208.
- Gómez del Prado, M.C. (1983). Hallazgo de una forma larvaria de *Echinocephalus* sp. (Nematoda: Gnathostomidae) en *Argopecten circularis* y *Ligropecten subnadasus* (Mollusca:Lamellibranchia) de la Laguna Ojo de Liebre, Guerrero Negro, B.C.S. *An Inst. Biol. UNIAM. Ser. Zool.* 53 (1): 421-431.
- Gutiérrez, M.F., Contreras, E. 1981. Variación estacional de los parámetros hidrológicos y nutrientes en la Laguna Tamihahua, Ver., México. *Mem. VII Simp. Latinoam. Oceanogr. Biol.* (en prensa).

- Grasshoff, K., M.Ehrhardt, K.Kremling, 1983. METHODS OF SEAWATER ANALYSIS. 2a. Ed. Verlag Chemie, Germany, p. 419.
- Howarth, R.W. 1988. Nutrient limitation of net primary production in marine ecosystems. Annual Reviews of Ecology and Systematics. 19:89-110.
- Huerta-Díaz, M.A. 1978. Estudio bacteriológico para la determinación de la calidad del agua en la zona de la Laguna de San Ignacio y el Estero El Cardón, Baja California Sur. Tesis de Licenciatura en Oceanología. Escuela Superior de Ciencias Marinas –UABC:126 pp.
- Ibarra-Obando, S., V. F. Camacho-Ibar, J.D. Carriquiry and S.V. Smith. 2001. Upwelling and lagoonal ecosystems of the dry Pacific coast of Baja California. In: Coastal Marine Ecosystems of Latin America. Ecological Studies Vol. 44. Chapter 21: 315 - 330
- Inmann, D.L. (1966) Coastal sand and dune of Guerrero Negro, Baja California Sur. México Geol. Soc. Amer. Bull. 77:787-802.
- Javor, B.J. y Castenholz, R.W. (1981). Laminated microbial mats, Laguna Guerrero Negro, México. Geomicrobiol. J., 2(3): 237-273.
- Jones, M.L., Swarts, S.L. y Leatherwood, S. (1984). The gray whales *Eschrichtius robustus*. Academic Press, New York, 600 p.
- Lara-Lara, J. R., S. Álvarez-Borrego y L.F. Small. 1980. Variability and tidal exchange of ecological properties in a coastal lagoon. Estuarine, Coastal and Shelf Sciences. 2:613-637.

- Marinone, S.G.L. y Lizárraga-Arciniega, K (1982). Transporte litoral sobre las barras de Guerrero Negro y Ojo de Liebre. *Ciencias Marinas* 8 (1): 20-29.
- Millán-Núñez, R. A., S. Álvarez-Borrego y D.M. Nelson. 1982. Effects of physical phenomena on the distribution of nutrients and phytoplankton in a coastal lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*. 15:317-335.
- Millán-Núñez, R., Ripa-Solana, E. y Aguirre-Buenfil, L.A. (1987). Estudio preliminar en la composición y abundancia del fitoplancton y clorofilas en la laguna Ojo de Liebre, B.C.S. *Ciencias marinas*, 13 (1): 30-38.
- Page, W.G., E. Palacios, L. Alfaro, S. González, L. E. Stenzel and M. Jungers. 1997. Numbers of wintering shorebirds in coastal wetland of Baja California, México. *Journal of Field Ornithology*. 65(4):490-497.
- Palacios, E., L. Alfaro, W.G. Page, 1994. Distribution and abundance of breeding snowy plovers on the Pacific Coast of Baja California. *Journal of Field Ornithology*. 65(4):490-497.
- Parsons, T.R., Maita Y. Y C.M. Lalli, 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon press. New York, USA. 173 p.
- Phleger, F.B. and G.C. Ewing. 1962. Sedimentology and Oceanography of coastal lagoons in Baja California, México. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 73: 145-182..
- Postma, H. 1965. Water circulation and suspended matter in Baja California lagoons. *Netherland Journal of Sea Research*. 2: 566 – 604.
- Redfield, A.C., B.H. Ketchum and F.A. Richards. 1963. The influence of organisms on the composition of seawater. In: *The Sea*. M.N. Hill (Ed):26-77.

- Riley, J.P., R. Chester. 1978. Chemical Oceanography. 2nd Edition. Academic Press. UK. V.7. 508 pp.
- Salinas-Zavala, C.A., J. Llinas y R. Rodríguez-Estrella. 1991. Aspectos biológicos del águila pescadora (*Pandion haliaetus carolinensis*). En: A. Ortega y L. Arriaga (eds.), La reserva de la Biosfera del Vizcaíno en la Península de Baja California. Centro de Investigaciones Biológicas, La Paz, Baja California Sur: 265-293.
- Sarur-Zanatta, J.C. Millán-Núñez, R., Gutiérrez-Sigala, C.A. y Small Mattox Sheahen, C.A., (1984). Diversidad y similitud de tres zonas con diferente tipo de sustrato, en Laguna Ojo de Liebre, B.C.S., México, Ciencias Marinas 10 (2): 169-174
- SEMARNAP, 1998. Mortandad de tortugas Marinas en la Laguna Ojo de Liebre. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente y Subprocuraduría de Recursos Naturales. Informe Técnico: 39pp
- Soule, D.F. y Soule, J.D., 1964. The ectopoceta (Bryozoa) of Scammon's Lagoon, B.C., México. Amer. Mus. Novitates, 2199: 49-50.
- Weiss, R. F. 1970. The solubility of nitrogen, oxygen, and argon in water and sea water. Deep Sea Research. 17(4): 721-735.