



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA**

**“DISTRIBUCIÓN DEL METANO DISUELTO DURANTE ABRIL Y
JULIO DEL 2006 FRENTE A LA COSTA PACÍFICO DE LA
PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO.”**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO EN
MAESTRO EN CIENCIAS**

**Presenta
FABRICIO SARO RIVERA IBARRA**

**Ensenada, Baja California, México
Diciembre del 2007**

Resumen

La enorme incertidumbre acerca de qué proporción del metano que ingresa anualmente a la atmósfera proviene de los océanos, así como su repercusión en el cambio climático global, ha despertado el interés en conocer el papel que juegan los mares, en especial las zonas costeras, en el ciclo biogeoquímico del metano. Con base en este argumento, durante abril y julio del 2006 se analizó la distribución y se determinaron los flujos océano-atmósfera del metano disuelto en la región acotada por la red de muestreo del programa IMECOCAL en la costa Pacífico de la Península de Baja California, México. Se utilizaron los datos de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y clorofila-*a* para tratar de establecer relaciones entre estas y los contenidos de metano observados. Los valores máximos y mínimos de metano, así como el mayor flujo promedio se registraron durante abril. La concentración de metano más elevada se registró en la estación 120.30 (frente a Bahía Vizcaíno) con un valor de 520 nL/L (NTP), mientras que la mínima (9 nL/ NTP), se observó a 20 metros de profundidad en la estación 123.45 (frente a Punta Eugenia). Durante ambos muestreos la zona de estudio se comportó como una fuente de metano para la atmósfera. El flujo de metano promedio para el mes de abril fue de 3.9 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ día, contrastando con el de julio (0.3 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ día), siendo la diferencia entre ambos de un orden de magnitud. Se considera que estas diferencias pudieron deberse a la elevada temperatura que presentó la capa de agua superficial y/o a la disminución en la velocidad del viento, ambos fenómenos observados durante julio. Esto último consistente con el debilitamiento de la Corriente de California. No se registraron asociaciones claras entre el contenido de oxígeno, clorofila y metano de las muestras. Sin embargo, con frecuencia los máximos de metano se hallaron a la profundidad de la oxiclina. Durante ambos muestreos fue frecuente la asociación de los máximos subsuperficiales de metano a plegamientos en la termoclina similares a los formados en remolinos. La presencia de contornos circulares de temperatura y salinidad en estos sitios, así como registros anteriores acerca de la presencia de estas estructuras en dichos sitios, sugirió la posible existencia de alguna relación entre los máximos de metano y estructuras similares a remolinos.

Palabras clave: Gases de invernadero, Metano, Baja California, Termoclina, Remolinos, Flujos océano-atmósfera.

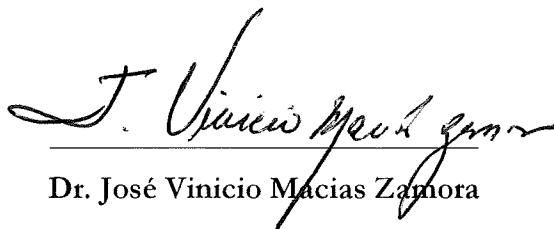
“DISTRIBUCIÓN DEL METANO DISUELTO DURANTE ABRIL Y JULIO
DEL 2006 FRENTE A LA COSTA PACÍFICO DE LA PENÍNSULA DE BAJA
CALIFORNIA, MÉXICO”

Tesis que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera

Presenta

Fabricio Saro Rivera Ibarra

Aprobada por



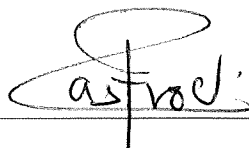
Dr. José Vinicio Macías Zamora

Director de tesis



Dr. José Martín Hernández Ayón

Sinodal



Dr. Rubén Castro Valdez

Sinodal

A. L. G. A. D. U.

**A mi madre y padre
Por haberme hecho adicto
al mejor vicio de todos: el conocimiento**

AGRADECIMIENTOS.

Un sincero agradecimiento a mis padres por su infinito apoyo y cariño y a todas las personas que con sus críticas ayudaron al mejoramiento de este trabajo entre ellas a mi director de tesis el Dr. Vinicio Macias Zamora y a mis asesores los doctores José Martín Hernández Ayón y Rubén Castro Valdez. Gracias por sus comentarios y sugerencias. Quisiera agradecer también a el M. en C. Martín De la Cruz y al Oc. Joaquín García Córdova por facilitar los registros de concentración de oxígeno y clorofila-*a*; y velocidad del viento, respectivamente. Doy la gracias a los doctores Gilberto Gaxiola y Ruben Lara por los recursos proporcionados a través del proyecto CONACyT flujos de carbono (FLUCAR) con el numero de registro 45813.

También aprovecho para agradecer a las personas que me proporcionaron información bibliográfica en formato electrónico como los doctores Francis Sansone, de la Universidad de Hawaii; Ulrich Berner, del Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Hannover; Hermann Bange, del IFM-GEOMAR, Alemania; Walter Borowski de la Universidad de Kentucky del Este, E.U.A y a Stuart Wakeham del Skidaway Institute of Oceanography, Georgia, E.U.A.

De forma muy especial agradezco a Miriam simplemente por estar a mi lado y por todo el apoyo y cariño incondicional que me brindas. Nada de esto hubiera sido igual sin ti. A Belinda por el cariño y apoyo espiritual que siempre nos has dado. Te deseo lo mejor de lo mejor con tu nuevo tesoro en esta vida, disfrútalo.

Finalmente a los contribuyentes por financiar la beca a la que fui acreedor a través del CONACyT.

CONTENIDO

Resumen.....	II
Votos Aprobatorios.....	III
Agradecimientos.....	IV
Lista de figuras.....	IX
Lista de tablas.....	XI
Lista de abreviaturas y símbolos.....	XII
1. Introducción.....	1
2. Antecedentes.....	4
3. Hipótesis.....	8
4. Objetivos.....	8
4.1 General.....	8
4.2 Particulares.....	8
5. Área de estudio.....	9
5.1 Sitios de colecta.....	9
5.2 Generalidades del área de estudio.....	12
5.2.1 Características generales de la línea costera.....	12
5.2.2 Vientos.....	12
5.2.3 Corrientes.....	13
5.2.4 Masas de agua.....	14
5.2.5 Surgencias.....	15
5.2.6 Oxígeno disuelto.....	16
5.2.7 Estructuras de mesoescala.....	17
6. Material y método.....	18
6.1 Colecta y procesamiento de muestra.....	18
6.2 Extracción de gases disueltos en agua mediante el método de equilibrio de fases	18
6.3 Detección y cuantificación del metano.....	20
6.4 Determinación de la concentración de metano en la muestra de agua.....	20
6.5 Determinación de los flujos de metano océano-atmósfera.....	22

7. Resultados.....	25
7.1 Curva de calibración.....	25
7.2 Muestreo IME0604 (abril del 2006).....	25
7.2.1 Hidrografía.....	25
7.2.2 Distribución del metano disuelto.....	31
7.2.3 Factor de saturación y flujos de metano océano-atmósfera.....	51
7.3 Muestreo IME0607 (julio del 2006).....	53
7.3.1 Hidrografía.....	53
7.3.2 Distribución del metano disuelto.....	58
7.3.3 de saturación y flujos de metano océano-atmósfera.....	73
8. Discusión.....	76
8.1 Muestreo IME0604 (abril del 2006).....	76
8.1.1 Hidrografía.....	76
8.1.2 Distribución del metano disuelto.....	78
8.2 Muestreo IME0607 (julio 2006).....	84
8.2.1 Hidrografía.....	84
8.2.2 Distribución del metano disuelto.....	85
9. Conclusiones.....	106
10. Referencias.....	108
Anexo I. Constantes para la determinación del coeficiente de Bunsen (β) para metano (Weisenburg y Guinasso, 1979).....	115
Anexo II. Constantes para la determinación de la concentración de metano en una muestra de agua que se encuentre en equilibrio con la atmósfera (Weisenburg y Guinasso, 1979).....	115
Anexo III. Estaciones que presentaron una profundidad de fondo cercana a la profundidad máxima de los muestreos.....	116
Anexo IV. Velocidad del viento y campo de densidad superficial durante abril y julio del 2006. a, velocidad del viento (m/s); b, campo de densidad (σ).....	117
Anexo V. Contornos de salinidad y temperatura ($^{\circ}\text{C}$) a las profundidades de: a), 100 metros; y b), 150 metros para el muestreo IME0607 (julio 2006).....	118
Anexo VI. Factores de conversión útiles.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura		Pagina
1	Red de muestreo del programa IMECOCAL en la costa Pacífico de la península de Baja California, México (modificado de Goericke <i>et al.</i> , 2005).....	10
2	Relación existente entre concentración de metano y el área integrada por el cromatógrafo.....	25
3	Distribución de la salinidad, temperatura, clorofila-a y oxígeno en a), superficie; y b) 10 metros de profundidad en el crucero IME 0604 (abril 2006).....	27
4	Diagramas T-S de las líneas de muestro y sus respectivas estaciones cubriendo hasta los 200 m. Cada grupo de puntos en color representa una estación. Las estaciones en colores cálidos son las más cercanas a la costa, colores fríos representan las más alejadas. SAW, Agua Subártica Superficial; TrW, Agua de Transición; ESsW, Agua Ecuatorial Subsuperficial; StSW, Agua Subtropical Superficial; TSW, Agua Tropical Superficial.....	30
5	Distribución zonal de salinidad y temperatura (en color) en las líneas de muestreo sobrepuestos sobre los contornos de metano (nL/L) (líneas oscuras continuas). Valores de metano que no pudieron ser representados como contornos se muestran mediante estrellas a la profundidad de la muestra. Las líneas punteadas oscura muestran el límite entre la masa de agua subártica, de transición y ecuatorial subsuperficial (ver detalles en el texto).....	33
6	Distribución meridional de la salinidad y temperatura a lo largo de las líneas muestreo (contornos en color) sobrepuestos sobre los contornos de metano (nL/L) (líneas oscuras continuas). Las líneas punteadas oscura muestra el límite entre la masa de agua subártica, de transición y ecuatorial subsuperficial.....	40
7	Perfiles verticales de clorofila (-.-), oxígeno (-o) y metano (-*) en las estaciones del muestreo IME 0604 (abril 2006).....	44
8	Dispersión de los valores de metano-clorofila, (a); y metano-oxígeno (b); para todas las profundidades. Los puntos oscuros representan las estaciones superficiales (0 metros).....	48
9	Dispersión de los valores de metano-temperatura y metano-salinidad para todos los sitios del muestreo IME0604 (abril 2006). Los puntos oscuros representan las estaciones superficiales (0 metros).....	48
10	Distribución del metano respecto a la profundidad en estaciones costeras (estaciones -30, -35 y -40) y oceánicas (estaciones mayores a -40) en a) líneas norteñas (100-120) y b) líneas sureñas (120-133) durante abril del 2006.....	50
11	(a) Factor de saturación del metano respecto al equilibrio atmosférico; y (b) flujos de metano océano-atmósfera ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$) obtenidos durante abril del 2006. Factores de saturación >1 indican sobresaturación. Valores positivos en b indican flujos en dirección a la atmósfera, negativos hacia el océano.....	52
12	Distribución de la salinidad, temperatura, clorofila-a y oxígeno en a)	

	superficie; y b) a 10 metros de profundidad en el crucero IME 0607 (julio 2006).....	54
13	Diagramas T-S de las líneas de muestreo analizadas durante julio del 2006 y sus respectivas estaciones cubriendo hasta los 200 m. Cada grupo de puntos en color representa una estación. Las estaciones en colores calidos son las más cercanas a la costa, colores fríos representan las más alejadas. Las estaciones en color negro no fueron analizadas para su contenido de metano (ver mas adelante en texto). SAW, agua subártica superficial; TrW, agua de transición; ESsW, agua ecuatorial subsuperficial; StSW, agua subtropical superficial; TSW, agua tropical superficial.....	58
14	Distribución zonal de la salinidad y temperatura en las líneas de muestreo analizadas durante julio del 2006 (contornos en color) sobrepuestos sobre los contornos de metano (nL/L) (líneas oscuras continuas). Valores de metano que no pudieron ser representados como contornos se muestran mediante estrellas a la profundidad de la muestra. Las líneas punteadas obscura muestran el límite entre la masa de agua subártica.....	61
15	Dispersión de los valores de metano vs. Temperatura y metano vs. Salinidad para todos los sitios del muestreo IME0607 (julio 2006). Los puntos oscuros corresponden a las estaciones superficiales (0 metros).....	65
16	Distribución meridional de la salinidad y temperatura a lo largo de las líneas muestreo (contornos en color) sobrepuestos sobre los contornos (líneas oscuras continuas) de metano (nL/L).....	67
17	Perfiles verticales de clorofila (-.-), oxígeno (-o), y metano (-*) en las estaciones del muestreo IME 0607 (julio 2006).....	71
18	Factor de saturación del metano respecto al equilibrio atmosférico; y (b), flujos de metano océano-atmósfera ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$ día) estimados durante julio del 2006. Factores de saturación >1 indican sobresaturación. Valores positivos en b indican flujos en dirección a la atmósfera; negativos hacia el océano. Los valores de la barra de colores de esta imagen no corresponden con los de la figura 11.....	75
19	Traslape de contornos de temperatura (líneas coloreadas) y clorofila (líneas oscuras) y los de metano (líneas azules) y clorofila para: a, estaciones 35 (abril); b, estaciones 45 (julio); y c) estación 120.50 (julio). La estrella azul en esta última representa la máxima concentración de metano medida en la estación 50.....	93
20	Factores de saturación calculados para todas las muestras de cada uno de los muestreos. Las muestras ubicadas a la derecha de la línea punteada fueron las que presentaron sobresaturación; las ubicadas a la izquierda de esta se encontraron subsaturadas.....	95

LISTA DE TABLAS

Tabla		Pagina
I	Estaciones analizadas durante cada muestreo. 1°, primer muestreo (IME0604); 2° segundo muestreo (IME0607).....	11
II	Estadística básica de la concentración de metano (nL/L) según la masa de agua en el muestreo IME 0604. SAW, Agua Subártica Superficial; ESsW, Agua Ecuatorial Subsuperficial; TW, Agua de Transición.....	38
III	Estadística básica de la concentración de metano (nL/L) según la masa de agua en el muestreo IME 0607. SAW, Agua Subártica Superficial; ESsW, Agua Ecuatorial Subsuperficial; TW, Agua de Transición.....	69
IV	Comparación de los flujos de metano obtenidos por otros autores para distintas regiones del océano.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS.

%o	Partes por mil.
Ar	Argón.
atm	Atmósferas.
ATP	Adenosin-trifosfato.
CalCOFI	(<i>California cooperative fishery investigations</i>).
cc	Centímetros cúbicos.
FID	Detector de ionización de flama (<i>Flame ionization detector</i>)
He	Helio.
HgCl ₂	Cloruro de mercurio.
ID	Diámetro interno (<i>internal diameter</i>).
IMECOCAL	Investigaciones mexicanas para estudio de la Corriente de California
mesh	Tamaño de malla.
ppm	Partes por millón.
STP	Condiciones estándares de temperatura y presión (0 °C y 1 atm)
Tg	Teragramos (1x10 ¹⁵ g).

Distribución del metano disuelto durante abril y julio del 2006 frente a la costa Pacífico de la Península de Baja California, México.

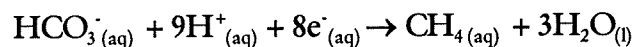
1. INTRODUCCIÓN.

Hoy en día, las intensas actividades humanas han llevado a crecientes alteraciones en el suelo, agua y aire de nuestro planeta. Entre las modificaciones más alarmantes se encuentran aquellas relacionadas con el clima. Se considera que el principal responsable de estos cambios climáticos es el aumento de la concentración de sustancias con elevada capacidad para absorber radiación de onda larga en la atmósfera. Entre las más importantes se encuentran el vapor de agua, el CO₂ y el metano.

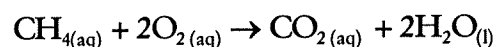
El metano es el hidrocarburo más pequeño de la familia de los alcanos, ha jugado un papel importante en el ciclo biogeoquímico global del carbono a lo largo de la historia de la tierra. Como gas radiativo traza de la atmósfera, ha sido y es, importante en las modificaciones climáticas globales actuales y pasadas (Wakeham *et al.*, 2003; Wakeham *et al.*, 2004). Se cataloga como un potente gas de invernadero capaz de captar radiación de onda larga 3.7 veces más por mol que el CO₂ (Holmes *et al.*, 2000). La concentración de este gas en la atmósfera se ha duplicado en los últimos 250 años de 0.7 a 1.75 ppm, y ahora aumenta entre 1 y 2% anualmente (Tyler, 1991 citado en Marty *et al.*, 2001; Sansone *et al.*, 2004). Esto sugiere que en un futuro el metano pudiera jugar un papel aún más importante en el calentamiento global y en la química atmosférica (Sansone *et al.*, 2004).

Se ha estimado que el aporte total de metano proveniente de los océanos hacia la atmósfera se encuentra entre 5 y 50 Tg año⁻¹. Este enorme grado de incertidumbre, es indicativo de la necesidad de mejorar el entendimiento de las variaciones temporales y espaciales del ciclo del metano en ambientes marinos (Holmes *et al.*, 2000). El entendimiento de los procesos que controlan los flujos de metano océano-atmósfera y la determinación de fuentes y sumideros de este gas en el océano, son vitales para la comprensión de cambios futuros en la capacidad de la atmósfera para retener radiación infrarroja y su posible repercusión climática global (Sansone *et al.*, 2004).

El metano puede tener dos orígenes en la naturaleza: biogénico y abiogénico, el último de estos se produce mediante la reducción de carbonatos durante el enfriamiento del magma. A su vez, el metano de origen biogénico puede subdividirse en termogénico (o fósil) y microbiano. El primero se forma mediante el rompimiento de moléculas orgánicas en condiciones de elevada temperatura y presión (Judd *et al.*, 2002), mientras que el metano de origen microbiano, es producido por la descomposición de materia orgánica llevada a cabo por arqueobacterias asociadas a consorcios microbianos (metanogénesis). Aunque los procesos de metanogénesis en el sedimento son bien conocidos, hasta la fecha no se sabe con exactitud cómo se producen en aguas bien oxigenadas. La metanogénesis se clasifica de tres formas de acuerdo con la fuente de carbono: hidrogenotropía, acetotropía y metilotropía (Whiticar, 1999). En el sedimento marino el proceso más importante es la hidrogenotropía, cuya reacción puede ser ejemplificada de la siguiente forma:



Por otro lado, el consumo o destrucción de metano puede ser químico o microbiano. El primero de ellos no es propio del océano pues se realiza en la estratosfera. El segundo se lleva a cabo de forma aerobia o anaerobia por diversos tipos de bacterias como las α , β , y γ -proteobacterias, organismos abundantes en todos los ambientes (terrestres, marinos y lacustres). La oxidación aeróbica del metano, presumiblemente uno de los principales mecanismos controladores del metano en aguas bien oxigenadas, se lleva a cabo mediante la siguiente reacción:



La oxidación anaeróbica del metano se lleva a cabo utilizando iones sulfato como reductor según lo indica la siguiente reacción (Valentine y Reeburgh, 2000).



La realización de esta reacción en el sedimento marino se considera como el principal sumidero de este gas en el océano (Nauhaus *et al.*, 2007).

Aunque, hablando en términos generales, el conocimiento del ciclo del carbono - en el que se encuentra incluido el metano - en nuestro país y su relación con el cambio climático son indispensables para resolver importantes interrogantes que la ciencia y todas las sociedades demandan, en México el conocimiento acerca del papel que juegan sus costas como fuentes o sumideros de gases invernaderos son virtualmente inexistentes. En base a esta necesidad se encuentra en marcha el programa mexicano **Flujos de Carbono (FLUCAR)** cuyo objetivo principal es desarrollar las bases para generar información que enriquezca la toma de decisión acerca del manejo de los gases invernadero en México. Como parte de este esfuerzo se encuentra este trabajo concerniente a la distribución y variación del metano en las costas mexicanas.

La costa de Baja California, México, se caracteriza por ser una zona con importantes procesos biogeoquímicos como producto de la intensa actividad física, química y biológica. Se trata de una región influenciada por el Sistema de la Corriente de California, sistema que forma parte de aquellas corrientes con flujos hacia el ecuador conocidas como *corrientes de frontera Este* (Carr, 2002). Este tipo de corrientes son reconocidas por su alta productividad oceánica debido a la presencia de surgencias costeras que proveen altas concentraciones de nutrientes inorgánicos a la zona fótica (Hernández de la Torre *et al.*, 2004). Esta característica promueve el crecimiento de diversas comunidades marinas con la posible formación de importantes gases de invernadero como el CO₂ y el CH₄, cuya importancia climática global son indiscutibles. La costa Pacífico de Baja California se distingue por estar ubicada en la zona de transición entre la masa de agua de origen subártico fría, rica en nutrientes y oxígeno; y la tropical caracterizada por agua cálida, reducida en nutrientes y oxígeno (Roden, 1971). Esta zona de transición resulta atractiva para el estudio de diversos campos en la oceanografía por las fuertes interacciones físicas, químicas y biológicas propias de esta frontera; y se acentúa su interés debido a que presenta importantes variaciones estacionales e interanuales (Durazo *et al.*, 2005), las cuales se ven manifestadas mediante ajustes horizontales y verticales en las propiedades hidrográficas (Roemmich, 1989). Es posible que estas fluctuaciones lleven consigo variaciones en los flujos de gases oceano-

atmósfera y en la concentración de estos en la columna de agua. Por ejemplo, una característica de la zona, en cuanto a la dinámica de gases disueltos se refiere, son las variaciones estacionales en la intensidad y dirección del viento. Se considera que la intensidad del viento juega un papel fundamental en la transferencia de gases desde la superficie del océano a la atmósfera (Barber *et al.*, 1986). Otras variaciones estacionales en la hidrografía de la región, con posibles repercusiones en la dinámica de gases disueltos, son los cambios en las contribuciones de las distintas masas de agua que se encuentran presentes; debido a que estas presentan orígenes y características distintas. Estos son algunos motivos que resaltan el interés en conocer como varían los flujos de metano océano-atmósfera y la concentración del mismo en la columna de agua en una zona con cambios estacionales como en la costa Pacífico de la península de Baja California.

2. ANTECEDENTES.

Desde 1967 se han descrito anomalías en la concentración de metano en aguas superficiales del océano, mostrando valores de sobresaturación respecto a los esperados en el equilibrio bajo condiciones específicas de temperatura, presión y salinidad. En muchos de estos casos se ha descartado que los excesos de metano se deban a procesos simples de advección desde la costa y se ha sugerido que pudieran deberse a mecanismos de producción *in situ* (Oremland, 1979; Holmes *et al.*, 2000; Sansone *et al.*, 2004 y otros). El aislamiento de bacterias metanogénicas en aguas oxigenadas en 1970 fue un hecho importante pues se sabe que estos organismos son estrictamente anaerobios y se pensaba que no podían sobrevivir en ambientes oxigenados (Oremland, 1979). Por tal razón se descartó que pudiera darse el proceso de metanogénesis en aguas bien oxigenadas. Sin embargo, hasta la fecha se ha observado repetidamente la presencia de máximos de metano asociados con la picnoclina a profundidades por encima de los 300 metros (Sansone *et al.*, 2004). Se ha sugerido que la existencia de estas bacterias en ambientes oxigenados puede deberse a la presencia de microambientes reductores asociados a partículas y que además, estos organismos utilizan los productos metabólicos del fito- y zooplancton para producir metano mediante la oxidación y reducción de compuestos como hidrógeno y CO₂ respectivamente (Sieburth, 1987).

En lo que respecta a la región del Pacífico mexicano, Burke *et al.* (1983) analizaron muestras de agua en nueve estaciones ubicadas paralelamente a la costa de México entre los 10° y 30° N. Estos autores hallaron concentraciones de metano subsuperficiales sobresaturadas con respecto a las esperadas en equilibrio con la atmósfera, registrándose concentraciones de 2.0-6.5 nmol/L (45-148 nL/L STP) entre los 50 y 150 metros de profundidad. Con la finalidad de determinar el origen del metano, estos autores realizaron mediciones del contenido total de material suspendido, carbono orgánico particulado, clorofila *a* y ATP. Encontraron que existe relación entre la concentración de metano y las variables antes mencionadas solo en algunas estaciones. Con el propósito de dar una explicación completa, los autores concluyeron que la producción de metano en la zona pudiera darse en microambientes reductores asociados a material particulado y/o al zoo- y fitoplancton. Así mismo, fue descartada la posibilidad de que los aportes de metano se debieran a procesos de advección desde aguas costeras o sedimentos.

Por otra parte, Sansone *et al.* (2001) realizaron muestreos en seis estaciones abarcando desde el giro norte del Pacífico, cerca de Hawai, hasta el Pacífico norte tropical mexicano a 110 Km de la costa, entre los 10° y 20° N. Las concentraciones más elevadas de metano se hallaron en las dos estaciones más cercanas a las costas mexicanas; registrándose para la más cercana a tierra, un máximo de 28 nmol/L (636 nL/L STP) a 350 metros de profundidad. Así mismo, se observó que la concentración de metano a esta profundidad se mantuvo constante por encima de los 10 nmol/L (227 nL/L STP) más allá de 1000 Km de la costa. En este trabajo también se realizó un análisis de la composición isotópica del metano a distintas profundidades en las dos estaciones cercanas a las costas mexicanas. La parte entre los 250 y 350 metros de profundidad mostró una composición isotópica $\delta^{13}\text{C-CH}_4$ de -45 a -42‰, mientras que la zona más profunda mostró estar enriquecida con el isótopo pesado en un rango de -30 a -20‰. Esta información llevó a los investigadores a concluir que existe una producción *in situ* en la parte superior de la columna de agua y que el metano enriquecido observado en la capa inferior, pudiera haberse originado en zonas vecinas donde estuvo sujeto a oxidación microbiana y que después fuera transportado a la zona de muestreo. Se concluyó que la fuente de este metano, enriquecido en el isótopo de ^{13}C , fueron sedimentos orgánicos y/o aguas anóxicas.

Del mismo modo, Sansone *et al.* (2004) llevaron a cabo un estudio de distribución de metano tanto en la columna de agua como en el sedimento, a lo largo de la costa oeste de México abarcando desde los 25° a los 21° N, incluyendo localidades en costas del Pacífico y Golfo de California del estado de Baja California Sur. Estos autores hallaron que los flujos de metano provenientes de los sedimentos en todas las estaciones variaron entre 0.24-5.5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{día}^{-1}$ y concluyeron que estos grandes flujos de metano ocurren a pesar de no existir aportes significantes de sedimentos terrígenos, mismo que refleja la importancia de la productividad originada por las surgencias de la zona. Hallaron que las concentraciones de este gas en las aguas superficiales estuvieron sobresaturadas con respecto a las atmosféricas y que la zona presentó un flujo hacia la atmósfera de 0.5-5.9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{día}^{-1}$. En las estaciones más cercanas a la zona de estudio, cercano a Puerto San Carlos, Baja California Sur ($\approx 25^\circ\text{N}$), estos autores hallaron concentraciones máximas entre 2 y 3 nmol L^{-1} (45-68 nL/L STP).

En los estudios antes mencionados, el oxígeno es una variable que presenta cierta relación con la distribución y abundancia del metano. Aunque se sabe actualmente que la metanogénesis puede realizarse en aguas oxigénicas, sigue siendo frecuente hallar que los máximos subsuperficiales de metano están relacionados con la disminución en la concentración de oxígeno. Por ejemplo, al graficar la tabla I del trabajo de Burke *et al.* (1983) se observa frecuentemente la asociación del máximo subsuperficial de metano con la oxiclina, esto a profundidades cercanas a los 200 metros. Mientras tanto, Sansone *et al.* (2004) también mostró cierta relación entre la oxiclina y el aumento en la concentración de metano.

Mas al norte, Castro-Morales (2005) realizó un análisis del metano disuelto en el sur de la cuenca de las Californias que abarcó desde la frontera de México con Estados Unidos hasta la Bahía de Todos Santos, B.C. Encontró que la concentración de metano fluctuó entre 0.035 a 61.8 nM (0.79-1404 nL/L STP) y determinó que la posible fuente de este gas fue la producción biológica *in situ* en microambientes anóxicos o preformado en los efluentes de aguas residuales. El flujo de metano hacia la atmósfera fue de 474.8 y 78×10^7

$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para la primera y segunda etapa del trabajo, respectivamente. El primero de ellos llevado a cabo en un evento de lluvias.

Específicamente para la zona de estudio, no se han realizado trabajos de esta índole mismo que ahonda el interés de conocer cuál es la dinámica del metano en esta zona y el papel de esta en el ciclo biogeoquímico del metano. No obstante, en otros campos oceanográficos como la oceanografía biológica y física, la zona de estudio se encuentra sujeta a constante monitoreo desde 1997; esto gracias al programa mexicano IMECOCAL. Entre los temas mayormente desarrollados en esta zona destaca la productividad primaria, abundancia y diversidad de fitoplancton; y la dinámica física, incluidos en este último campo las variaciones estacionales e interanuales en variables hidrográficas como la salinidad y temperatura. La variabilidad estacional de la zona ha sido estudiada por Ramírez-Manguilar, 2005 que describe la climatología de temperatura y salinidad mediante la integración de la base de datos históricos de CalCOFI (1950-1978) y la base del IMECOCAL (1997-2003). En este estudio se describe el comportamiento promedio de las distintas masas de agua y de las corrientes a lo largo del año y se determinó cuáles son las masas de agua y corrientes dominantes con respecto a la profundidad y periodo del año.

En lo que a variabilidad interanual con alusión al fenómeno de EL NIÑO y/o LA NIÑA se refiere, Durazo y Baumgartner, (2002) y Durazo *et al.* (2005) detallan las anomalías en los distintos parámetros oceanográficos ocurridas durante estos eventos. Asociado a estos últimos trabajos se hallan los análisis de Hernández de la Torre *et al.*, (2004) y Lavaniegos *et al.* (2003) que muestran las variaciones en la productividad primaria y en el zooplancton durante estos fenómenos. Así mismo, trabajos como los de Soto-Mardones *et al.* (2004) ofrecen una descripción acerca de la circulación estacional de la región aludido a la formación de remolinos y meandros cuya influencia en los procesos biológicos y probablemente en la dinámica de gases disueltos es importante. Toda esta información referente a la variabilidad de la zona de estudio es de gran importancia para trata de dar explicación del porqué de la distribución del metano disuelto en la columna de agua.

3. HIPÓTESIS.

Considerando que el principal moderador de la dinámica oceanográfica de la costa Pacífico de Baja California es el Sistema de la Corriente de California, mismo que se considera en términos físicos, químicos y biológicos como altamente dinámico, tanto en el ámbito espacial como temporal; y aunado a la particularidad presentada por este sitio al estar situado en la zona de transición entre una masa de agua tropical y otra templada; resulta factible hallar cambios temporales y espaciales importantes en la concentración de metano así como en los flujos océano-atmósfera de este gas, producto del cambio en la intensidad del viento; velocidad y dirección de las corrientes y en los aportes de las masas de agua de la región ocurrentes en las distintas épocas del año.

De la misma forma, las condiciones de alta productividad y surgencias, las cuales generan importantes cantidades de materia orgánica, hacen factible la presencia de máximos subsuperficiales de metano, mismos que por advección, pudieran representar una fuente de metano hacia la atmósfera en la zona de estudio.

4. OBJETIVO.

4.1. General.

Determinar la distribución del metano disuelto en la columna de agua en la costa Pacífico de la Península de Baja California, México a lo largo del muestreo IME0604 (Abril) e IME0607 (Julio) en la red IMECOCAL durante el 2006.

4.2. Particulares.

- Cuantificar el metano disuelto en la columna de agua de los distintos sitios de muestreo.

- Determinar si existe relación entre la concentración y distribución del metano disuelto con otros parámetros medidos *in situ* como la temperatura, salinidad, clorofila y oxígeno disuelto.
- Determinar los flujos de metano hacia la atmósfera en los diferentes periodos de muestreo.
- Determinar qué zonas constituyen fuentes o sumideros de este gas para la atmósfera.

5. ÁREA DE ESTUDIO.

5.1. Sitios de colecta.

Los sitios de colecta se encuentran ubicados en las costas del Pacífico de la Península de Baja California, México entre los 31.5 y 24° N y los 119 y 112° W (figura 1). Los sitios de muestreo están distribuidos en varias líneas o transectos que corren perpendiculares a la línea de costa. En este trabajo se analizaron las líneas 100, 103, 107, 110, 113, 117, 120, 123, 127, 130, 133 y 137. A su vez, cada una de ellas constan de un conjunto de estaciones que normalmente se enumeran desde el 30 (denota cercano a la costa) hasta el 60 (lejos de la costa) en intervalos de 5. De esta forma la estación 107.40 corresponde a la línea (transecto) 107, estación 40.

Se analizaron muestras correspondientes a dos cruceros, el IME0604 de abril del 2006 y el IME0607 correspondiente a julio del mismo año. Las estaciones analizadas en cada crucero se muestran en la tabla I. En cada estación se tomaron muestras para análisis de metano a las profundidades estándares (0, 10, 20, 50, 100, 150 y 200) o hasta donde la profundidad de fondo lo permitió.

Para la determinación de la temperatura y salinidad se utilizó un sistema CTD modelo SBE-911 *plus*, fabricado por Sea-Bird Electronics, INC, el cual consiste de una unidad submarina y una unidad de control en cubierta. La unidad submarina consta de una caja de presión (con capacidad hasta 3400 m de profundidad), conteniendo en su interior

fuentes de poder y la electrónica para adquisición y telemetría de datos, además del sensor de presión.

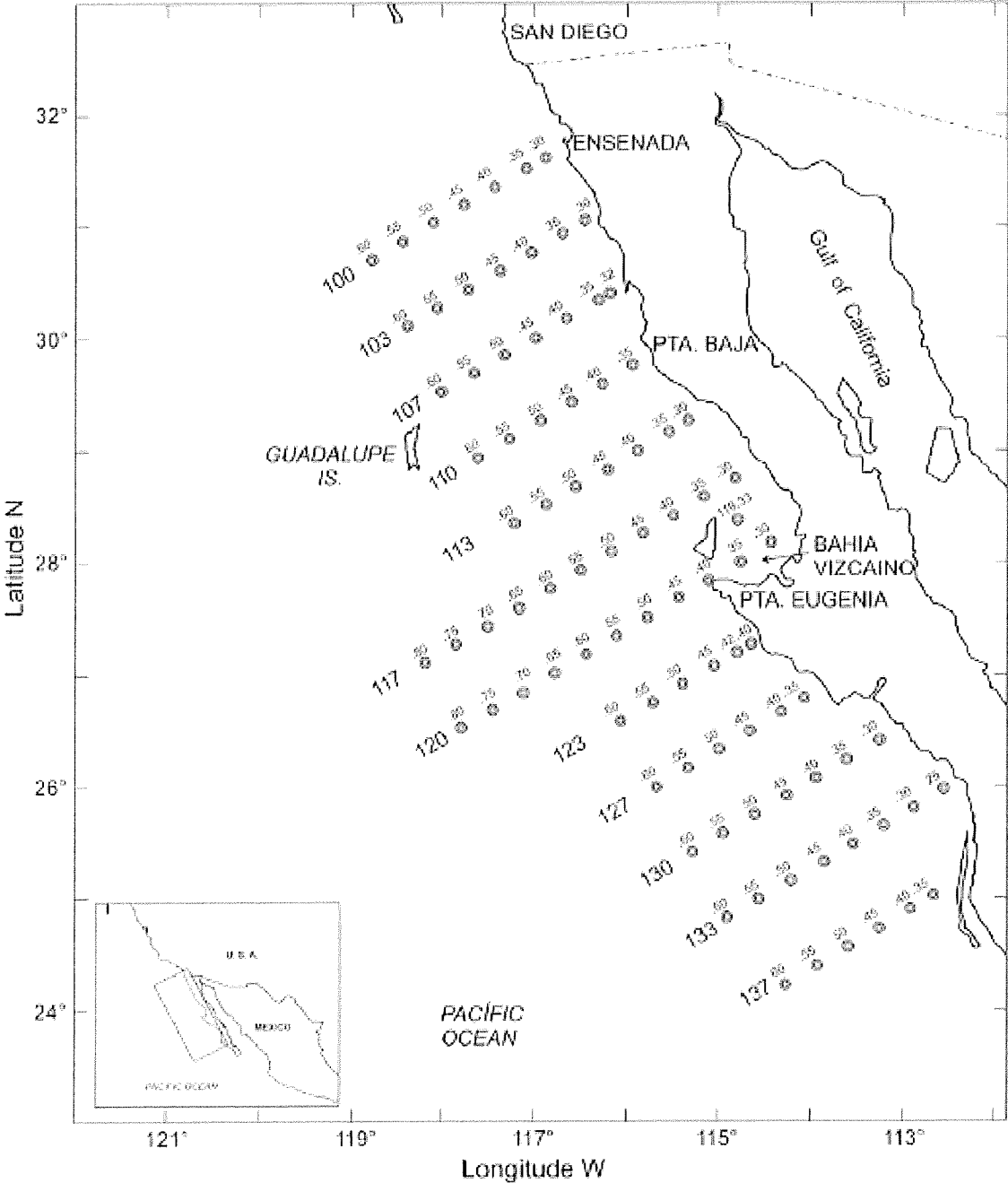


Figura 1. Red de muestreo del programa IMECOCAL en la costa Pacífico de la península de Baja California, México (modificado de Goericke *et al.*, 2005).

Para determinar el oxígeno disuelto se utilizó el método iodométrico microWinkler descrito por Anderson (1971). Este método se basa en la titulación con tiosulfato de sodio el cual es equivalente al yodo liberado en una reacción asociada a la concentración del oxígeno disuelto.

Para determinar la concentración de clorofila-a se filtró un litro de agua de mar de cada profundidad usando para ello filtros de fibra de vidrio Whatman (GF/F) de 25 mm de diámetro, con una capacidad de retención de 0.7 μm . Después de la filtración, los filtros fueron depositados en rejillas de protección debidamente rotuladas y almacenadas a bordo en nitrógeno líquido a -198 °C hasta su análisis en el laboratorio. En el laboratorio, los filtros se colocaron en acetona al 90% por un periodo de 24 h en frío y en oscuridad para extraer la clorofila-a de acuerdo a Venrick y Hayward (1984).

Tabla I. Estaciones analizadas durante cada muestreo. 1°, primer muestreo (IME0604); 2° segundo muestreo (IME0607).

Línea/muestreo	Estación																					
	30		32		35		39		40		42		45		50		55		60			
	1°	2°	1°	2°	1°	2°	1°	2°	1°	2°	1°	2°	1°	2°	1°	2°	1°	2°	1°	2°		
100	x				x				x				x									
103	x				x	x			x	x			x	x								
107			x	x	x	x			x	x			x	x								
110					x				x				x		x							
113	x	x				x			x	x			x	x								
117	x				x				x				x									
119																						
120	x				x		x						x	x		x		x				
123											x		x								x	
127					x				x	x				x							x	
130													x		x		x				x	
133									x	x				x		x						
137		x				x				x												

5.2. Generalidades del área de estudio.

5.2.1. Características generales de la línea costera.

La línea de costa presenta un relieve de intermedio a elevado, con pocos aportes de agua dulce. El clima es seco y árido; la precipitación ocurre en el invierno en la zona norte y en verano en el sur (Zárate-Vidal, 1991). La plataforma continental es estrecha, generalmente menor a 20 Km, aunque la porción más amplia (Bahía Vizcaíno) puede tener entre 50 y 70 Km. Las principales corrientes que influyen en la costa son la corriente de California y la contracorriente ecuatorial. La primera de estas se considera agua subártica de transición mientras que la segunda forma parte de la masa del Pacífico Ecuatorial. Todo lo anterior tiene como consecuencia que tal región sea abundante en nutrientes, como lo muestra la presencia de la zona sardinera y atunera más importante del país (Oropeza-Rosales, 1998).

5.2.2. Vientos.

La fuerza más importante en el movimiento de las aguas superficiales de los océanos es el viento (Reid *et al.*, 1958), y por tal motivo desempeña un papel fundamental en la oceanografía de la costa Pacífico de la Península de Baja California al intervenir en la intensificación y debilitamiento de la Corriente de California, flujo de agua de mayor importancia en la zona. La formación de los vientos en el Sistema de la Corriente de California se atribuye esencialmente a la presencia de una celda de alta presión ubicada al oeste, en mar abierto, y otra de baja presión situada tierra adentro, en el continente Americano. Los vientos hallados sobre la región de la Corriente de California provienen en su mayoría del norte y oeste y son más intensos cuanto más cerca se encuentran estas celdas entre sí. La mayor cercanía de las celdas se presenta durante los meses de primavera y verano la cual promueve la intensificación del flujo en la Corriente de California. Por el contrario, durante los meses de otoño e invierno las celdas de alta y baja presión se alejan provocando un debilitamiento de los vientos y de la Corriente de California (Reid *et al.*, 1958).

5.2.3. Corrientes.

Las principales corrientes marinas presentes en la zona de estudio pertenecen al Sistema de la Corriente de California. Este es a su vez, parte del sistema de circulación anticiclónico del norte del océano Pacífico. En latitudes altas, las aguas del Pacífico Norte Central se mueven con dirección *Este* bajo la influencia de los vientos. Cerca de la costa de Norte América, este flujo de agua se divide, la vertiente de mayor tamaño y con dirección al sur da lugar a la Corriente de California. Cuando esta agua se acerca a los 25 °N comienza a desplazarse hacia el oeste para formar parte de la Corriente Norecuatorial (Reid *et al.*, 1958).

El Sistema de la Corriente de California está constituido por una corriente superficial con dirección al ecuador que lleva el nombre de la Corriente de California, por la Contracorriente Subsuperficial, con dirección hacia el polo, y la Contracorriente de California o Contracorriente Costera (Ramírez-Manguilar, 2005).

Corriente de California.

La corriente de California se considera el brazo *Este* del giro del Pacífico Norte Central. Se trata de una corriente superficial que transporta agua en dirección al ecuador a lo largo de la costa oeste de Norte América durante todo el año. En Baja California, el núcleo de esta corriente (hallado entre los 50 y 100 m de profundidad), el cual ha sido caracterizado por presentar un $\sigma_t=25$ (Durazo y Baumgartner, 2002), es más fuerte a lo largo de la costa con máximos entre marzo y abril (Lynn y Simpson, 1987), época en que los vientos provenientes del noroeste presentan un esfuerzo máximo (aprox. 8 din/cm^2) (Soto-Mardones *et al.*, 2004). Esta corriente se considera de velocidad moderada alcanzando una velocidad máxima en la superficie (20 cm/s) frente a Baja California (Ramírez- Manguilar, 2005).

Contracorriente costera.

Aunque a latitudes mayores al área de estudio es posible observar una contracorriente costera con flujo hacia el polo, especialmente en los meses de enero y octubre, en la región de Baja California es muy débil o ausente a excepción de la línea 130. Cuando llega a presentarse, esta se halla confinada sobre la plataforma y pendiente continental y por lo

general, los periodos de mayor intensidad de esta corresponden con los periodos de máximo flujo de la Contracorriente subsuperficial. (Lynn y Simpson, 1987).

Contracorriente subsuperficial.

Se considera que esta corriente se origina del lado *Este* del Pacífico Ecuatorial y fluye hacia el norte a lo largo de la costa de Norte América Se localiza ente los 150 y 600 m de profundidad y trae consigo agua cálida y salada proveniente del ecuador. Cuando los vientos provenientes del norte se debilitan como ocurre a finales de otoño e invierno, esta corriente se observa más somera hallándosele cerca a los 200 m de profundidad. En contraste, entre los meses de enero y marzo la intensidad de la corriente disminuye y su núcleo, definido como el sitio de flujo máximo hacia el polo y caracterizado por Wooster y Jones (1970) por presentar $\sigma_t=26.5$, se sitúa a mayores profundidades a tal grado que durante esta época, es inexistente o muy débil en sitios cercanos a la costa. (Lynn y Simpson, 1987). Este flujo, llamado en ocasiones corriente de Davidson, puede hallarse desde las costas de Baja California hasta Punta Concepción EUA (Reid *et al.*, 1958).

5.2.4. Masas de aguas.

Las propiedades del agua del Sistema de la Corriente de California observados frente a Baja California son generalmente atribuidas a la presencia de cuatro masas de agua, cada una distintiva por su temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y contenido de nutrientes. Los nombres empleados para distinguirlos han sido tomados de Lynn y Simpson, (1987) y Durazo y Baumgartner, (2002). Las aguas encontradas en esta región son:

Agua del Pacífico Subártico.

Estas aguas se incorporan por el norte al Sistema de la Corriente de California formando un núcleo de agua fría, rica en oxígeno, fósforo y de baja salinidad (Reid *et al.*, 1958; Durazo y Baumgartner, 2002). Esta masa de agua se forma en latitudes altas y de elevada precipitación (Lynn y Simpson, 1987), y se desplaza a través de la Corriente de California. La salinidad y temperatura de esta agua fluctúa entre 33 y 34 y de 8 a 21 °C, respectivamente (Durazo y Baumgartner, 2002).

Agua Superficial Subtropical.

Estas aguas se encuentran generalmente al oeste-suroeste de Baja California fuera de la red de muestreo del IMECOCAL, sin embargo, durante eventos anómalos como El Niño de 1997 es posible hallarla. Esta agua se caracteriza por presentar salinidades y temperaturas entre 34.5-35 y 20-28 °C, respectivamente (Durazo y Baumgartner, 2002).

Agua Ecuatorial Subsuperficial.

Esta se caracteriza por ser cálida y salada. El mayor flujo de esta agua ocurre subsuperficialmente mediante la contracorriente subsuperficial (Reid *et al.*, 1958). Es un tipo de agua que se mueve del ecuador a los polos por debajo de la termoclina hasta los 800 m. Presenta un rango de salinidad entre los 34.3 y 35 y una temperatura entre los 8 y 15 °C. A estas aguas se les halla confinadas a unos 60 Km de la costa central y norte de Baja California (Durazo y Baumgartner, 2002).

Agua de Transición.

Se trata de una masa de agua con características intermedias entre las tres mencionadas anteriormente (Durazo y Baumgartner, 2002).

5.2.5. Surgencias.

En las costas de Baja California los vientos provenientes del norte y noroeste son de peculiar importancia. Bajo la influencia de estos vientos y debido a los efectos de rotación terrestre, la zona costera exhibe afloramientos de aguas profundas (Sverdrup *et al.*, 1942). Los afloramientos (surgencias) más importantes en esta zona ocurren durante abril y mayo, meses en que los vientos provenientes del noroeste son más intensos. Las aguas profundas que afloran mediante estos fenómenos provienen aproximadamente de los 100 metros y por tanto constituyen eventos superficiales. Aunque se sabe que las tasas de afloramiento de agua son lentas, representan un proceso muy importante en la zona por su repercusión en la productividad primaria (Sverdrup *et al.*, 1942).

Después del verano los vientos cambian de dirección e intensidad haciendo que las surgencias desaparezcan gradualmente dando paso a patrones de desplazamiento de agua

irregulares. Es interesante mencionar que en ocasiones estas irregularidades promueven, en algunos sitios, el desplazamiento de agua costera hacia mar adentro dando lugar a otros afloramientos de agua (Sverdrup *et al.*, 1942) tal es el caso de punta Concepción E.U.A y bahía Vizcaíno B.C.S. Este efecto parece intensificarse en la parte sur de los cabos y en puntos de tierra que interfieren con el trayecto de la corriente (Reid *et al.*, 1958).

5.2.6. Oxígeno disuelto.

En general, la Corriente de California se caracteriza por presentar elevadas concentraciones de oxígeno (cerca de la saturación) por encima de la termoclina. Aunque la concentración de cualquier gas en agua de mar varía en función de la salinidad y temperatura, las variaciones en la concentración de especies gaseosas en la capa de mezcla en esta corriente dependen en mayor grado de las variaciones en la temperatura (Reid *et al.*, 1958). Lo anterior significa que las variaciones en la concentración de metano en las aguas superficiales pudieran verse influenciada por los cambios de temperatura en las capas superficiales a lo largo de los muestreos en este trabajo.

Una característica importante de la distribución de oxígeno en las capas superficiales de la Corriente de California es la presencia de máximos subsuperficiales en los meses de verano y otoño. Se piensa que estas elevadas concentraciones pudieran deberse a la producción primaria subsuperficial o a que la capa superficial de agua tiene menor capacidad de solubilizar oxígeno debido a su mayor temperatura (Reid *et al.*, 1958). Específicamente para la península de Baja California se sabe de la existencia de bajas concentraciones de oxígeno en las capas de agua profunda (debajo de los 200 m) hacia afuera y al sur de la península. Estas bajas concentraciones se extienden hacia el norte a lo largo de la costa. Estas aguas parecen haber permanecido en capas profundas durante largo tiempo debido a su baja concentración de oxígeno y a su elevada concentración de fosfatos (Reid *et al.*, 1958).

Zona de mínimo de oxígeno.

Las costas del Pacífico mexicano presentan un estrato intermedio de la columna de agua donde la concentración de oxígeno es <0.5 mL/L, la cuál se ha denominado *zona de*

mínimo de oxígeno. Se cree que los bajos contenidos de oxígeno en estos sitios se deben a la presencia de elevadas cantidades de materia orgánica, producto de surgencias, que se encuentran asociados a sitios con poca circulación (Sarmiento *et al.*, 1998). Las costas mexicanas son particularmente importantes pues en estas el grosor de capa del mínimo puede ser de hasta 1000 metros (Levin, 2003) y abarcar 1000 kilómetros de largo (Fiedler y Talley, 2006). En la costa Pacífico de Baja California el grosor de esta capa se encuentra entre los 650 y 800 metros y se ubica entre los 400 y 550 metros de profundidad (Fiedler y Talley, 2006).

5.2.7. Estructura de mesoescala.

La presencia de remolinos y meandros en la zona de estudio ejerce una importante influencia sobre los procesos biológicos como ha sido demostrado por Aguirre-Hernández *et al.*, (2004). En esta zona es posible encontrar estructuras con variaciones estacionales. Esto parece encontrarse relacionado con la homogeneidad de la circulación oceánica de las capas superficiales. En primavera la circulación es homogénea producto de la persistencia de los vientos y evita la formación de remolinos, aunque es posible observar la formación de meandros paralelos a la línea de costa, p/e frente a Bahía Vizcaíno. El verano se caracteriza por la aparición de pequeños remolinos cercanos la costa. Entre estos encontramos dos de tipo ciclónico frente a Bahía San Quintín (línea 107) y Punta Eugenia (línea 120); y uno anticiclónico entre Isla Guadalupe y la península, entre las líneas 107 y 110 (Soto-Mardones *et al.*, 2004). En otoño los remolinos se encuentran completamente formados y comienzan a alejarse de la costa. En esta época es posible hallar dos remolinos con rotación opuesta, el primero de ellos anticiclónico (frente a Bahía Vizcaíno) y el otro ciclónico (frente a Punta Eugenia).

De forma general se considera que los remolinos encontrados en bahía Vizcaíno, de tipo anticiclónico, son originados por la corriente de California, mientras que aquellos encontrados frente a Punta Eugenia son originados mas bien por influencia de la topografía de la zona y de la contracorriente superficial que fluye desde el sur (Soto-Mardones *et al.*, 2004).

6. MATERIAL Y MÉTODO.

6.1. Colecta y procesamiento de muestra.

A partir de botellas Niskin de 5 litros de capacidad se llenaron completamente botellas de vidrio color ámbar de 348 mL, mismas a las que inmediatamente se adicionó 0.4 mL de una solución saturada de HgCl_2 por cada 100 mL de muestra con la finalidad de detener toda actividad biológica. Las botellas se cerraron, procurando no atrapar aire, con corcholatas nuevas utilizando para esto un aparato diseñado para tal actividad. Finalmente, las botellas se transportaron y almacenaron en la oscuridad hasta su análisis.

6.2. Extracción de gases disueltos en agua mediante el método de equilibrio de fases.

Fundamento.

Este método se basa en la partición del gas disuelto en la muestra en una fase líquida y otra gaseosa. Se llena un contenedor cerrado herméticamente con la muestra líquida dejando un espacio vacío (fase gaseosa). El contenedor se agita de manera que los gases contenidos en la fase líquida comiencen a distribuirse en la fase gaseosa hasta llegar a un equilibrio en la concentración del gas en ambas fases. Este proceso de equilibrio de fases utiliza como fase gaseosa un gas extractor inerte y de menor solubilidad que aquellos que se pretenden analizar (He o Ar). Una vez llegado al estado de equilibrio, se aísla la fase gaseosa y se determina la concentración del gas de interés en ésta. Finalmente, la concentración del gas en la muestra original se deriva de relaciones matemáticas que describen la forma en que se da el equilibrio entre las fases, esto en función de las condiciones de temperatura del experimento y salinidad de la muestra. Esta técnica es especialmente útil en gases con baja solubilidad en agua, categoría en la que se sitúan la mayoría de los gases de interés biogeoquímico como el metano (Capasso e Inguaggiato, 1998; Upstill-Goddard, 2006). Se ha estimado que esta técnica permite una partición de hasta el 96% de los alcanos contenidos en una muestra (McAuliffe, 1971).

Extracción del metano disuelto en las muestras.

Inmediatamente después de ser destapadas las botellas, se utilizó una jeringa de vidrio con capacidad de 50 cc *Popper and Sons, Inc. Perfektum*, diseñada para el manejo de gases, y provista con una válvula luer de 3 vías para extraer 30 mL de cada una de las muestras. Previo a realizar esto la jeringa fue enjuagada por lo menos dos veces con agua de la muestra antes de tomar la alícuota. Las jeringas se colocaron en un baño de agua a 25 °C por 15 minutos. Pasado dicho lapso de aclimatación, se desecharon 10 mL de cada una de las jeringas para así quedar retenido un volumen total de 20 mL, cantidad de muestra efectiva que se sometió a la extracción de gases mediante el método de equilibrio de fases.

Equilibrio de fases.

Una vez ajustada la temperatura de la muestra dentro de la jeringa, se procedió a incorporar la fase gaseosa a esta. La jeringa con muestra se conectó mediante las válvulas, a otras similares que contuvieron 30 mL de helio de alta pureza (99.99%). Antes de inyectar el helio a la jeringa con la muestra y para evitar la entrada de aire, se permitió el paso de aproximadamente 10 mL de He a través de las válvulas, manteniendo en posición de cerrado la válvula de la jeringa que contenía a la muestra; esto con la finalidad de purgar el sistema. Posterior a esto se dejó pasar los 30 mL de helio a la jeringa con la muestra.

Una vez llevado a cabo la incorporación de la fase gaseosa a las jeringas con muestra, y con la finalidad de lograr el equilibrio entre la fase acuosa y gaseosa, las jeringas se colocaron en un agitador durante 15 minutos. Subsecuentemente, se transfirió la fase gaseosa a otra jeringa teniendo los mismos cuidados al realizar la purga de las válvulas. Una vez extraídos los gases de la muestra y aislada la fase líquida de la gaseosa, se analizó esta última en un cromatógrafo de gases.

6.3. Detección y cuantificación del metano.

La detección y cuantificación del metano se realizó mediante cromatografía de gases y para ello se utilizó un aparato *Heulett-packard* modelo *P 6890 GC System* acoplado a un detector de ionización de flama de hidrógeno FID ajustado a 250 °C. Se utilizó una columna capilar HP-PLOT/Molesieve 5A de 15 m x 0.53 mm (ID) y 50 µm de grosor de la capa estacionaria.

Curva de calibración.

Para establecer la relación existente entre el área integrada de las señales del cromatógrafo y la concentración de metano, se construyó una curva de calibración que permitiera estimar la concentración de la fase gaseosa a partir de estándares donde se conoce la concentración exacta de metano. Para realizar esto se emplearon bolsas especiales para la colecta de gases *Calibond Calibrated instruments Inc* de 1 L, en donde se prepararon mezclas de metano en helio en concentraciones de 0.02, 0.04, 0.1, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 y 0.45 ppm, mismos que conformaron los puntos de la calibración. Para la realización de estas mezclas se utilizó un estándar de metano con una concentración de 1 ppm. Cada una de estas mezclas fue inyectada al cromatógrafo y subsecuentemente registrados los valores de integración de las señales. Con esta información, se llevó a cabo un análisis de regresión lineal entre el área integrada y la concentración de metano de las mezclas para obtener una ecuación que predijera la concentración de metano en una muestra, en función del área integrada.

6.4. Determinación de la concentración de metano en la muestra de agua.

La cuantificación de la concentración de metano en la muestra a partir de la concentración observada en la fase gaseosa se realizó mediante la ecuación descrita por Johnson *et al.* (1990). Esta relación matemática está fundamentada en el principio de conservación de la materia aplicada a gases ideales y en la capacidad de cada gas para disolverse en función de la temperatura y salinidad del disolvente (en este caso el agua). La ecuación es la siguiente:

$$C_0 = C_g ((\beta/22.356)RT + V_g/V_l) \quad (1)$$

$$C_0 = (P/RT) ((\beta/22.356)RT + V_g/V_l) \quad (2)$$

Donde:

C_0 = es la concentración del gas disuelto en la muestra

C_g = es la concentración del gas medida en la fase gaseosa

β = es el coeficiente de Bunsen en L/L atm

22.356 = es el volumen molar del metano en L/mol

R = es la constante de los gases (0.082053 L atm/ °K mol)

T = es la temperatura de la muestra al momento del equilibrio en grados Kelvin (°K)

V_g = es el volumen de la fase gaseosa (en este trabajo 0.030 L)

V_l = es el volumen de la fase líquida (en este trabajo 0.020 L), y

P = es la presión parcial (atm) ejercida por el metano en la fase gaseosa después del equilibrio a una atmósfera de presión.

La ecuación 1 se utilizó para calcular la concentración de metano disuelto en la muestra en unidades de volumen de gas por volumen de agua (nL/L) en condiciones estándares (STP). La ecuación 2 se uso para calcular la concentración del gas en moles (nmol/L).

El coeficiente de Bunsen (β), cuyo valor representa el volumen de un gas disuelto en agua medido en condiciones estándares (STP: 0°C y 1 atm) y cuando éste ejerce una presión sobre el agua igual a una atmósfera (Capasso e Inguaggiato, 1998), es un parámetro cuyo valor depende de la naturaleza del gas en cuestión, de la salinidad de la muestra y de la temperatura a la cual se llevo la extracción del gas. Dado que cada una de las muestras presentó una salinidad particular, se requirió calcular este coeficiente para cada una de las muestras. La temperatura de las muestras no representó problema alguno ya que todas ellas se extrajeron a la misma temperatura (25°C).

El cálculo del coeficiente de Bunsen se llevo a cabo mediante la ecuación propuesta por Weiss, (1970) y (1971) (Wiesenburg y Guinasso, 1979).

$$\ln \beta = A_1 + A_2(100/T) + A_3 \ln(T/100) + S\%[B_1 + B_2(T/100) + B_3(T/100)^2] \quad (3)$$

Donde:

β = es el coeficiente de Bunsen

A_1 - A_3 = son constantes (Anexo I).

T = es la temperatura absoluta ($^{\circ}\text{K}$) al momento de la extracción, y

$S\%$ = es la salinidad de la muestra de agua en partes por mil.

6.5. Determinación de los flujos de metano océano-atmósfera.

Para determinar los flujos de metano océano-atmósfera se utilizó la ecuación propuesta por Barber *et al.* (1988).

$$F = K_L (C_o - C_{eq}) \quad (4)$$

Donde:

F = es el flujo de metano en unidades de masa por área por tiempo ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$)

K_L = es el coeficiente de intercambio de la capa de frontera del líquido en unidades de longitud por tiempo ($\text{m}/\text{día}$)

C_o = es la concentración de metano medida en la superficie del mar ($\mu\text{mol}/\text{m}^3$)

C_{eq} = es la concentración de metano que tendría una muestra de agua superficial a la temperatura y salinidad *in situ* en equilibrio con la concentración de metano en la atmósfera ($\mu\text{mol}/\text{m}^3$).

Determinación de la concentración de metano disuelto bajo la condición de equilibrio con la atmósfera (C_{eq})

La estimación de la concentración del gas en una muestra en equilibrio hipotético con la atmósfera (C_{eq}) en condiciones específicas de salinidad y temperatura *in situ* se realizó mediante la ecuación de Weiss (1970) (Wiesenburg y Guinasso, 1979).

$$\ln C_{eq} = \ln f_g + A_1 + A_2(100/T) + A_3 \ln(T/100) + A_4(T/100) + S\%[B_1 + B_2(T/100) + B_3(T/100)^2] \quad (5)$$

Donde:

C_{eq} = es la concentración de metano que presentaría una muestra de agua de mar en equilibrio con la atmósfera en nL/L, o bien, en nmol/L dependiendo de las constantes que se utilicen (ver Anexo II).

f_g = es la fracción molecular atmosférica promedio del metano (Anexo II),

A_1 - A_4 y B_1 - B_3 = Son constantes (Anexo II),

T = es la temperatura absoluta (°K) *in situ* de la muestra, y

$S\%$ = es la salinidad de la muestra en partes por mil.

Determinación del coeficiente de intercambio de la capa de frontera del líquido (K_L)

La estimación del coeficiente de intercambio se basa en la aplicación de un modelo empírico basado en observaciones de campo y laboratorio que depende esencialmente de la velocidad del viento (Barber *et al.*, 1988). Esta relación matemática esta corregida para ser utilizada con la velocidad del viento medida a cualquier altura utilizando la velocidad de fricción del viento (U^*). La ecuación es la siguiente:

$$U^* = k U_z / [(k/C_{DN}^{1/2}) - (\ln 10/z)] \quad (6)$$

Donde:

U^* = es la velocidad de fricción del viento (m/s)

k = es la constante de Kármán ($k=0.4$)

U_z = es la velocidad del viento medida a z metros sobre el nivel del mar

C_{DN} = es el coeficiente de arrastre neutral, para aguas abiertas $C_{DN} = 1 \times 10^{-3}$, y

z = es la altura sobre el nivel del mar a la cual se hizo la medición de la velocidad del viento (m).

Una vez obtenida la velocidad de fricción del viento (U^*), K_L se obtiene según las siguientes desigualdades:

$$U^* \leq 15 \text{ cm/s} \text{ -----} > K_L = 2.0 \text{ cm/h} \quad (7a)$$

$$15 \text{ cm/s} < U^* < 65 \text{ cm/s} \text{ -----} > K_L = U^* - 12.1 \text{ cm/h} \quad (7b)$$

Para las desigualdades anteriores, las unidades deben seguirse tal y como están escritas, es decir, no deberán cambiarse las unidades de U^* de (cm/s) a (cm/h) para que exista concordancia con las unidades de K_L (cm/h), (ver Barber *et al.* 1988).

Estimación del factor de saturación de las muestras superficiales con respecto al equilibrio atmosférico.

La estimación del factor de saturación de las muestras superficiales con respecto a la concentración esperada en el equilibrio con la atmósfera se calculo utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Saturación} = (C_o / C_{eq}) \quad (8)$$

Donde:

C_o = es la concentración de metano medida en la superficie del mar

C_{eq} = es la concentración de metano que presentaría una muestra de agua de mar en equilibrio con la atmósfera

Valores mayores a 1 indicarán la presencia de flujos de metano del océano hacia la atmósfera y viceversa.

7. RESULTADOS.

7.1 Curva de calibración.

La curva de calibración realizada entre las concentraciones estándares y el área integrada por el cromatógrafo mostró un aspecto prácticamente lineal a lo largo de casi todas las concentraciones analizadas (figura 2), no obstante, puede observarse que a concentraciones menores a 0.02 ppm la tendencia no es completamente recta.

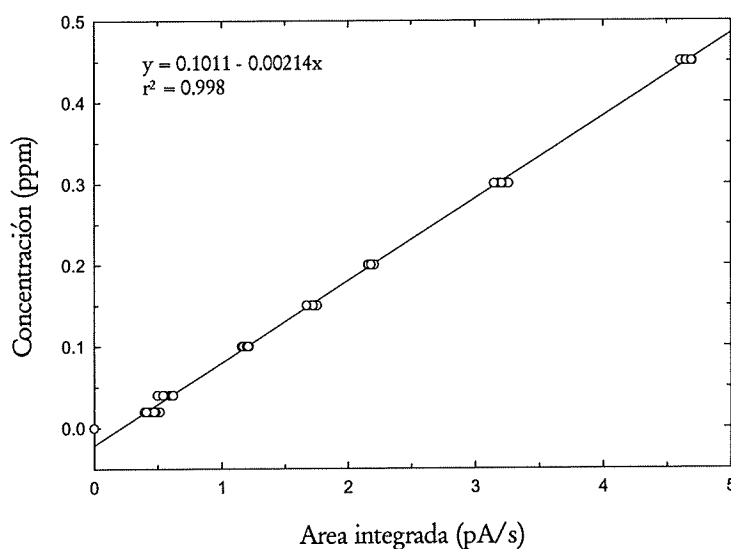


Figura 2. Relación existente entre concentración de metano y el área integrada por el cromatógrafo

7.2. Muestreo IME0604 (abril 2006).

7.2.1. Hidrografía.

Las condiciones de temperatura, salinidad clorofila-a y oxígeno en superficie y a 10 metros de profundidad en el área de estudio pueden observarse en la figura 3. El área cercana a la costa presentó isólinas de temperatura y salinidad paralelas a esta desde la línea 100 (frente a Ensenada) hasta la 120 (Punta Eugenia), y cubrió un área que abarcó con frecuencia desde las estaciones 30 a la 35; todo esto evidenciando la presencia de surgencias.

En las estaciones 30 se observaron valores bajos de temperatura (12.2 °C) y altos de salinidad (33.76). Frente a Punta Eugenia (estación 120.45) se registró un núcleo de alta salinidad y baja temperatura (33.6 y 15.5 °C respectivamente). En la sección sureña, la orientación irregular de los contornos de salinidad y temperatura frente a las líneas 127-133 junto con sus valores (<34 y $<20^{\circ}\text{C}$, respectivamente) no da indicios de intrusión de agua caliente de transición proveniente del sur. Esto podría pensarse debido a la poca disposición perpendicular por parte de las isohalinas en las estaciones mencionadas.

Al igual que la salinidad y temperatura, los contornos de clorofila de las estaciones norteñas cercanas a la costa estuvieron dispuestos de forma paralela a esta. Esta disposición se observó de la línea 100 a la 117 en superficie y hasta la 120 a 10 metros de profundidad. El núcleo de alta salinidad y baja temperatura mencionado anteriormente (estación 120.45), también fue evidente en los contornos de clorofila, en especial a 10 metros de profundidad donde presentó una concentración relativamente elevada ($\approx 5 \text{ mg/m}^3$).

Los contornos de clorofila en la región oceánica fueron irregulares mostrando contenidos promedio entre los 0.5 y 0.25 mg/m^3 , aunque se registraron valores tan bajos como 0.17 mg/m^3 (estación 100.45 y 117.40) en superficie y hasta 0.05 mg/m^3 (estación 117.40) a 10 metros. Por su parte, las concentraciones máximas de clorofila-a fueron 9.4 mg/m^3 (estación 103.30) en superficie y 12.07 mg/m^3 (estación 119.33) a 10 metros. En forma resumida, los máximos y mínimos de clorofila en la capa superficial del océano se hallaron a 10 metros.

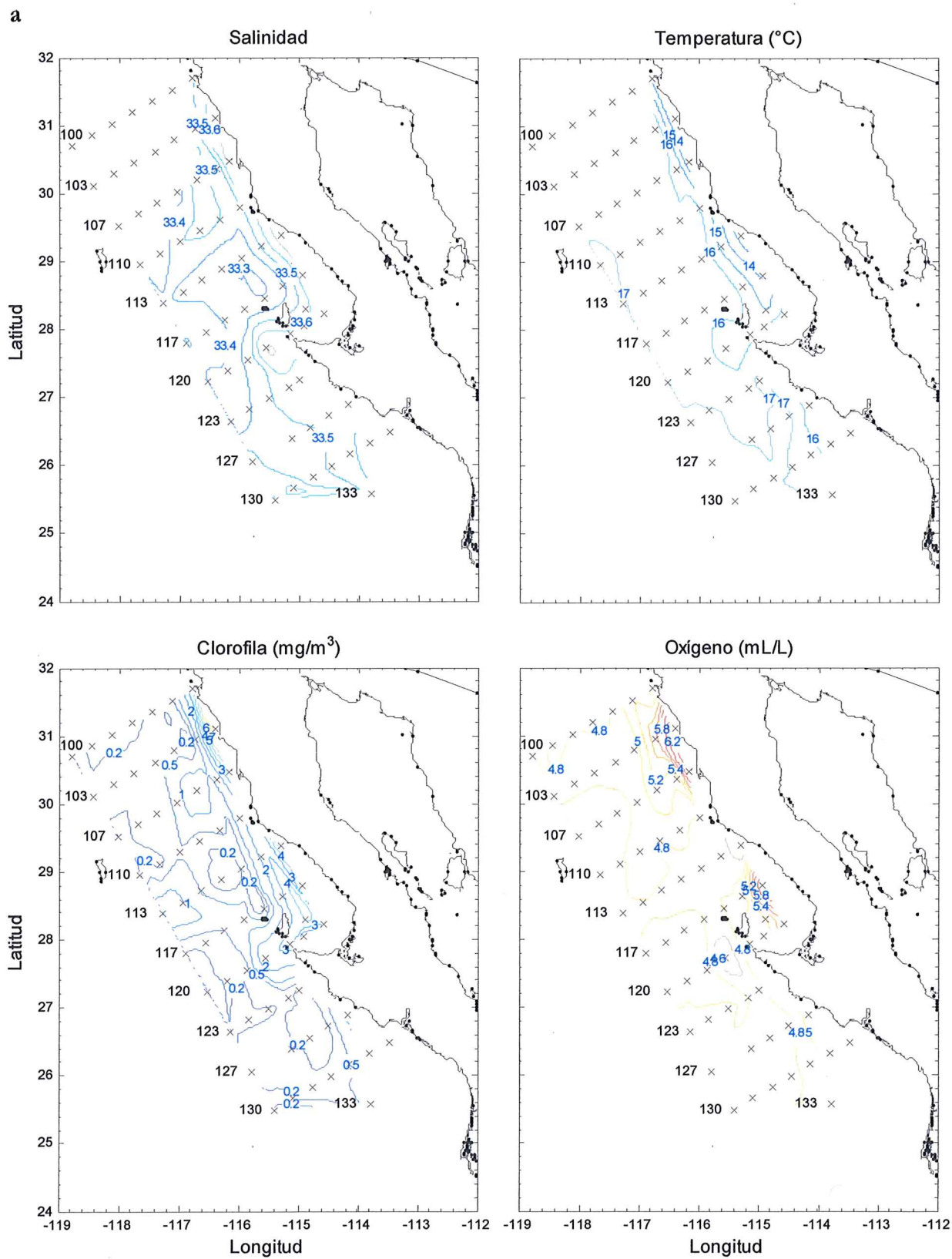


Figura 3. Distribución de la salinidad, temperatura, clorofila-a y oxígeno en a), superficie; y b) 10 metros de profundidad en el crucero IME 0604 (abril 2006).

b

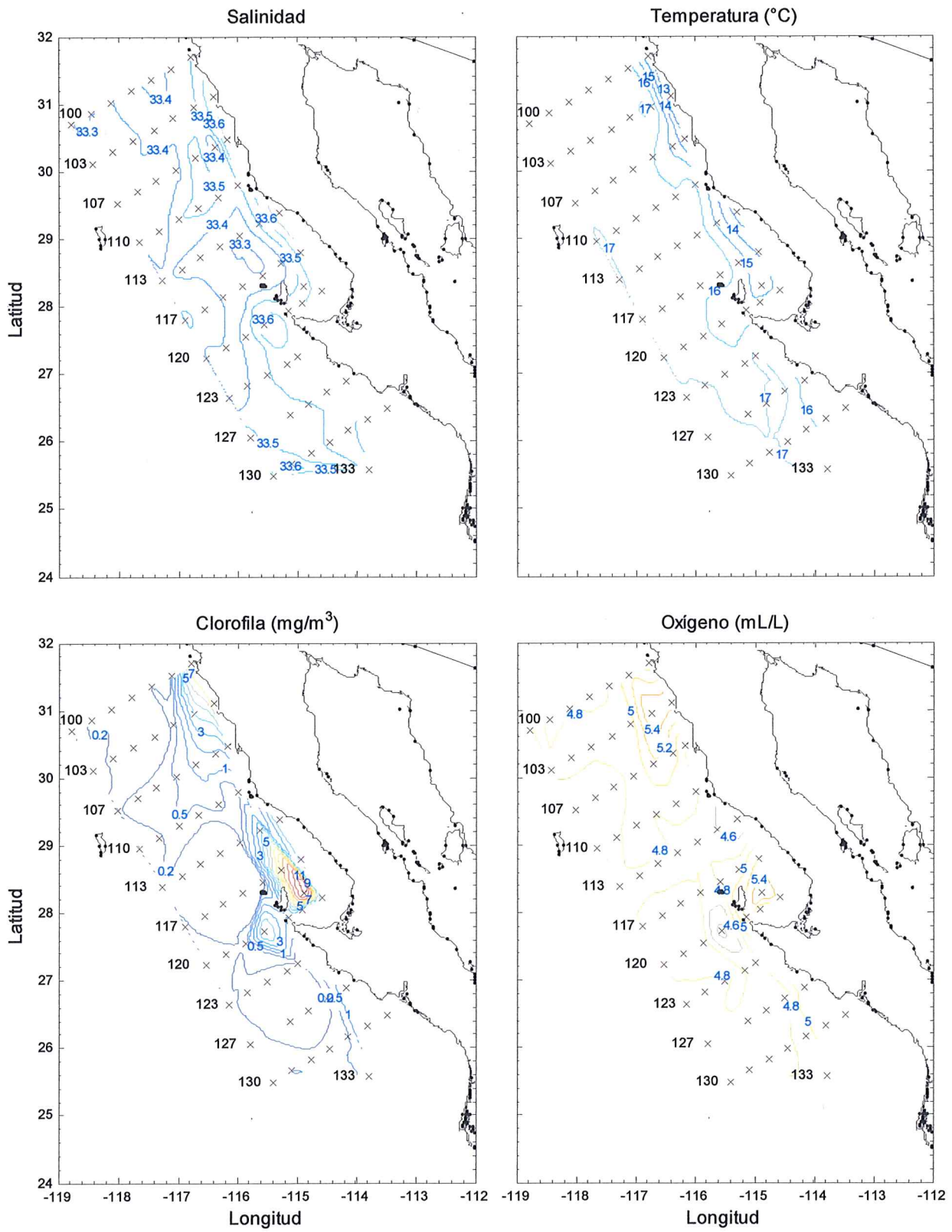


Figura 3. Continuación

Los contornos de oxígeno disuelto presentaron una disposición relativamente similar a los de clorofila. Las zonas de máxima concentración se situaron en la periferia de las estaciones 30 y 35 de las líneas 103-107 y 117-120, ambas zonas coincidieron con las regiones de máxima concentración de clorofila. En forma general, los máximos contenidos de oxígeno se hallaron en la superficie siendo la estación 103.30 la que presentó el mayor valor (≈ 6.2 mL/L). Lejos de la costa la concentración fluctuó entre los 4.6 y 5 mL/L. Aunque la mayoría de las estaciones costeras presentaron concentraciones superiores a 4.8 mL/L, la estación 113.30 y la 120.45 se destacaron por mostrar una concentración de solo 4.48 y 4.47 mL/L, es decir, las concentraciones más bajas en superficie y 10 metros. Esta última estación corresponde al núcleo de alta salinidad y baja temperatura mencionado anteriormente.

Los diagramas T-S de las líneas de muestreo analizadas durante abril del 2006 (figura 4) comprenden sus respectivas estaciones con registro hasta los 200 m. Las estaciones más cercanas a la costa están representadas por familias de puntos con colores calidos mientras que las más retiradas se muestran en colores fríos. Así el orden de estaciones de la más cercana a la más alejada de la costa es: rojo, magenta, amarillo y verde; los nombres de estaciones pueden asignarse cotejando la tabla I.

Durante este periodo de muestreo la masa de agua dominante en los primeros 200 metros fue el Agua Subártica (SAW). En todas las líneas y sus respectivas estaciones, la capa superficial perteneció a este tipo de agua, mientras que la profunda (cerca a los 200 m), se halló dentro del dominio del Agua de Transición (TrW) y en menor grado del Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESsW). En la mayor parte de las líneas, las estaciones que mostraron la presencia de esta última masa de agua resultaron ser las cercanas y/o intermedias a la costa (véase la presencia de puntos con colores cálidos en la zona de dominio del agua ESsW). Esto quiere decir que la masa de agua ecuatorial subsuperficial se encontró durante este muestreo a más de 200 metros de profundidad en aquellas estaciones alejadas de la costa. De manera general se puede decir que la masa de agua Ecuatorial subsuperficial (ESsW) tuvo poca presencia durante este muestreo; las estaciones más sureñas como la 133.40 fueron las que presentaron mayor influencia de esta.

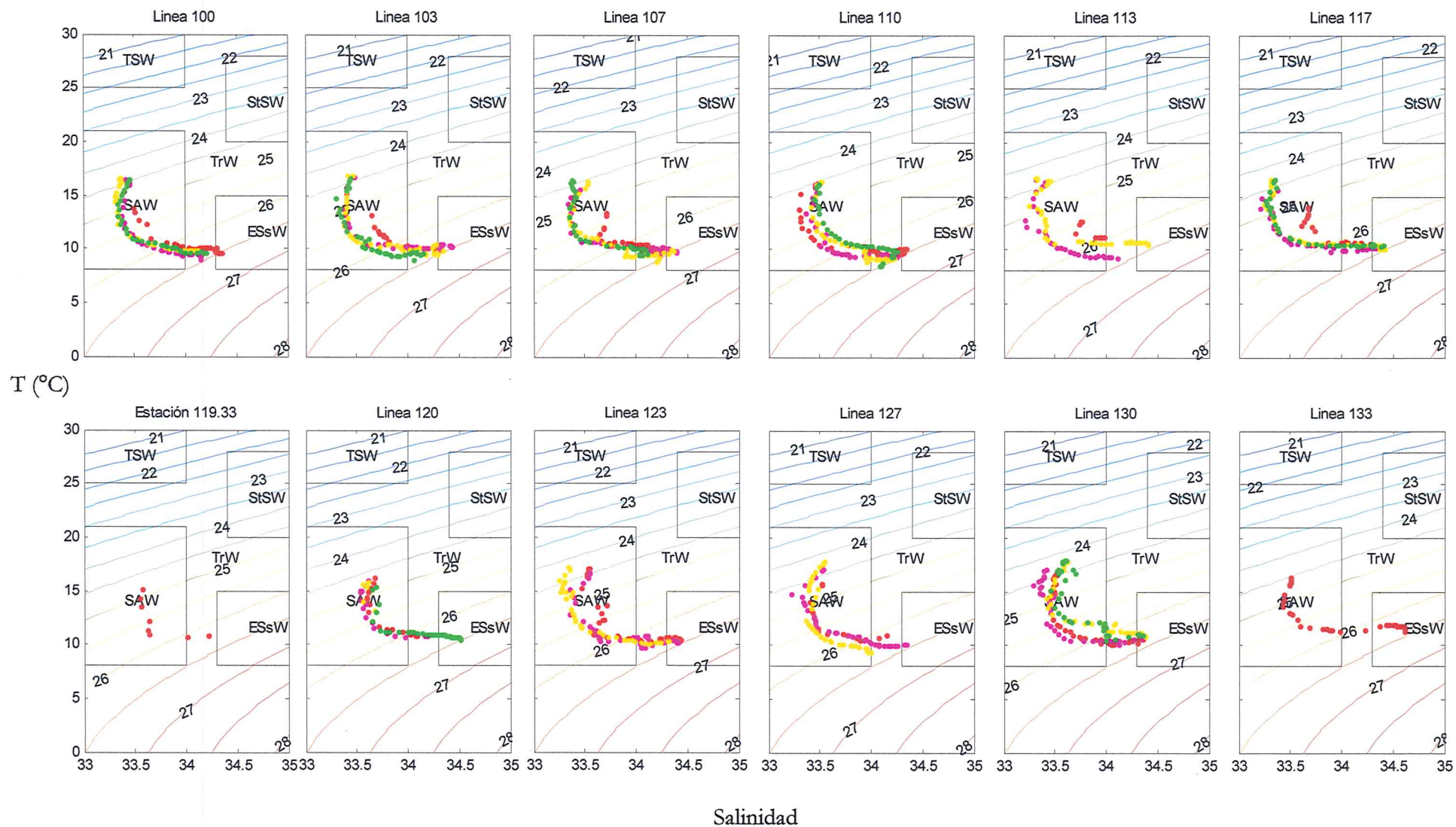


Figura 4. Diagramas T-S de las líneas de muestreo y sus respectivas estaciones cubriendo hasta los 200 m. Cada grupo de puntos en color representa una estación. Las estaciones en colores cálidos son las más cercanas a la costa, colores fríos representan las más alejadas. SAW, Agua Subártica Superficial; TrW, Agua de Transición; ESsW, Agua Ecuatorial Subsuperficial; StSW, Agua Subtropical Superficial; TSW, Agua Tropical Superficial.

La figura 5 muestra mediante contornos en color la distribución vertical y espacial de la salinidad y temperatura (cortes del área de estudio en el plano Este-Oeste) para cada línea de muestreo, así mismo muestra la frontera entre el Agua Subártica (SAW) y el Agua de Transición (TrW) (línea oscura discontinua en los paneles de salinidad); así como la profundidad en la que se encontró el Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESsW) (línea oscura discontinua con asteriscos). Esta figura muestra que en la mayoría de las líneas (100-117 y 127), las estaciones más cercanas a la costa presentaron un plegamiento hacia la superficie por parte de las isolíneas, haciéndose presente en esta zona la termo- y haloclina a menor profundidad en comparación con las regiones más oceánicas. Este hecho provocó que en la capa superficial de estas líneas, las temperaturas más altas y salinidades más bajas se hallaran confinadas lejos de la costa. Este fenómeno se observó de manera más marcada de la línea 100-107 y 113-117. Más allá de la 117 el plegamiento de isolíneas es menos evidente tal como se muestra en líneas como la 123 y 130. Una observación repetitiva en todas las líneas de muestreo fue que la termoclina siempre estuvo a menor profundidad que la haloclina. La pycnoclina, por su parte, se halló en todas las estaciones a una profundidad similar a la de la termoclina (datos no mostrados).

7.2.2. Distribución del metano disuelto.

Todas las concentraciones de metano en este trabajo están dadas en unidades de nL/L en condiciones estándares de temperatura y presión (STP).

La figura 5 muestra además los contornos de concentración de metano (líneas continuas oscuras) traslapados sobre los de salinidad y temperatura. En aquellas estaciones donde la cantidad de muestras no permitió la construcción de contornos de metano, se colocaron estrellas en las estaciones y profundidades donde se llevaron a cabo los muestreos junto con la concentración de metano observada. Al parecer no existió un patrón bien definido entre la concentración de metano y la distribución de salinidad y temperatura a lo largo de las líneas y en la vertical; y por consecuentes razones, tampoco con las masas de agua. No obstante, en algunas estaciones como la 107, 110, 120 y 130 (figura 5b, d, g y j), los máximos subsuperficiales de metano estuvieron asociados con la termoclina. Entre estas líneas, la 107 y 120 destacaron por presentar las concentraciones de metano más elevadas

(>450 nL/L). En general la concentración promedio de metano en toda la red de muestreo estuvo cercana a 88 nL/L (tabla 2). La estadística básica de la concentración de metano muestra que la masa de Agua Subártica (SAW) presentó en promedio un contenido de metano mayor (102.9 nL/L) y más variable (desv. est. 89.8 nL/L) en comparación con las otras masas de agua. Así mismo, se muestra que el contenido promedio de metano en la masa de Agua de Transición (TrW) fue ligeramente mayor (83.5 nL/L) al del Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESsW) (78.2 nL/L).

En la línea 103 (figura 5b) la concentración de metano varió entre los 54 y 105 nL/L, siendo en la 103.35 $z=200$ hallada la máxima concentración. Como lo muestran las líneas discontinuas en el panel de salinidad de la línea 103, la sección profunda de las estaciones 103.35 y -40 se encontró inmersa en la capa superior de la masa de Agua Ecuatorial Subsuperficial, siendo en la primera de estas donde se halló la mayor concentración de metano en toda la línea (105 nL/L). El contenido máximo de metano en superficie se registró cercano a la costa, sitio donde se observó plegamiento hacia la superficie por parte de las isolíneas de temperatura y salinidad. A excepción del valor máximo registrado en toda la línea, las concentraciones más elevadas se hallaron en la periferia de la termoclina. Esto mismo puede observarse en la línea 113 donde las concentraciones máximas se hallaron en los primeros 20 metros de la estación más cercana a la costa (113.30), región donde las isolíneas de salinidad y temperatura son prácticamente perpendiculares al fondo marino.

Los contornos de la línea 123 (figura 5h) muestran como particularidad la presencia de un núcleo de baja concentración de metano ubicado en la estación 123.45 $z=20$. La concentración medida en esta zona fue de 9 nL/L, la menor en todo el muestreo. Se ha omitido la descripción de la línea 100 y 127 debido a la poca disponibilidad de datos.

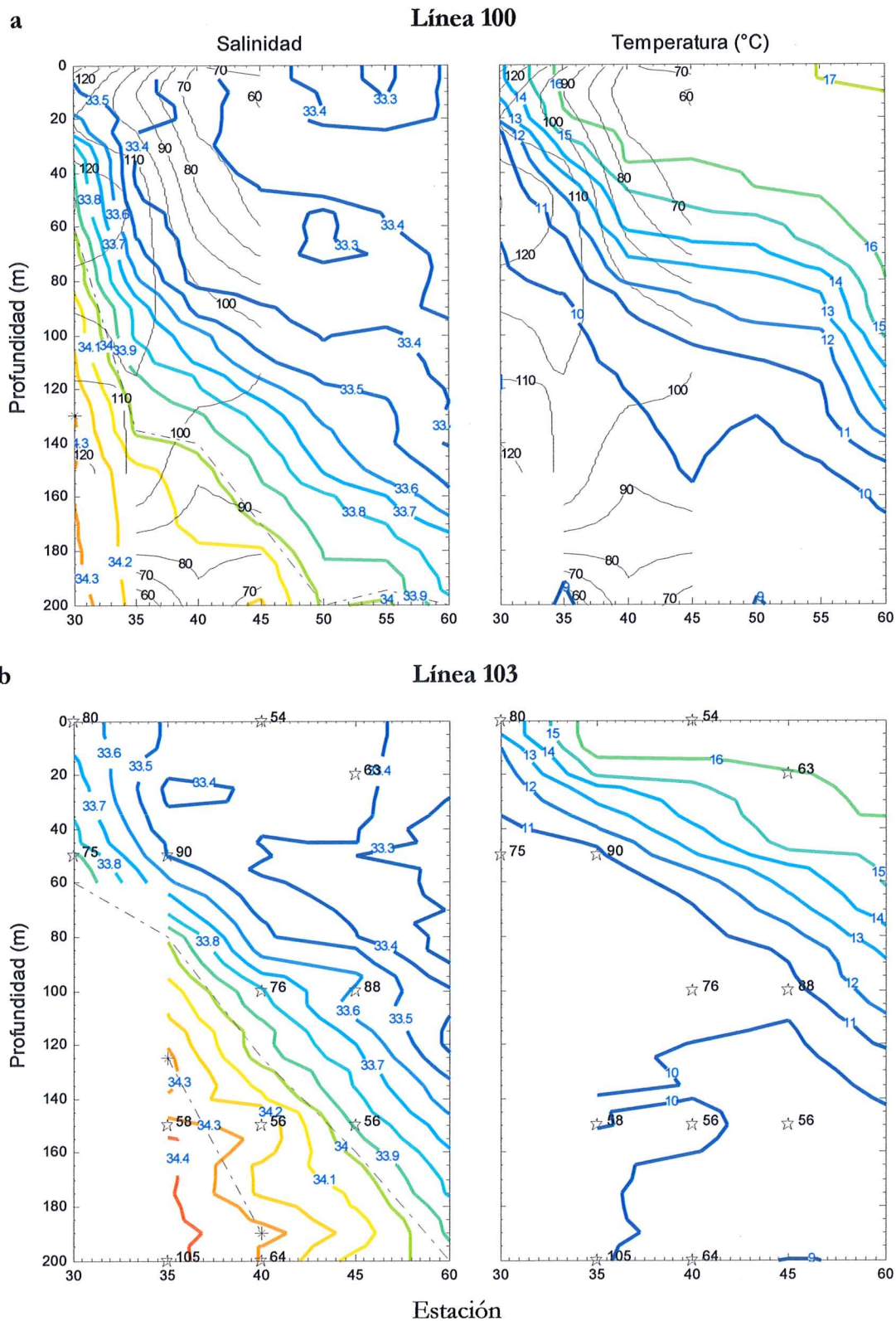
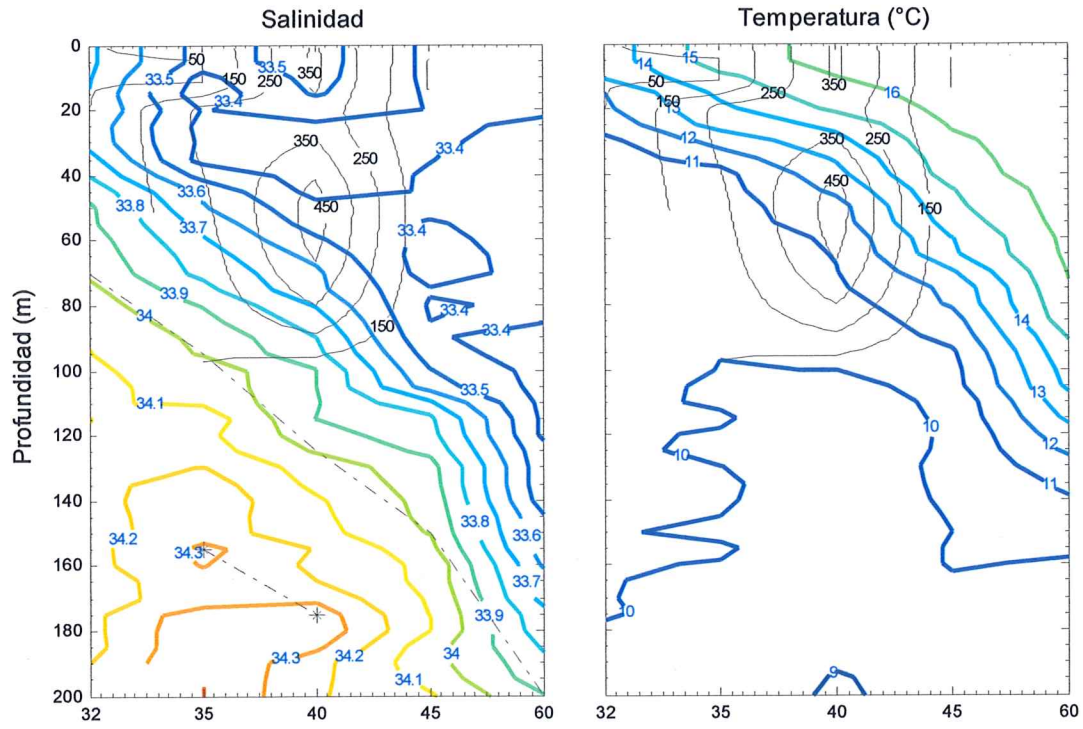


Figura 5. Distribución zonal de salinidad y temperatura (en color) en las líneas de muestreo sobrepuestas sobre los contornos de metano (nL/L) (líneas oscuras continuas). Valores de metano que no pudieron ser representados como contornos se muestran mediante estrellas a la profundidad de la muestra. Las líneas punteadas oscuras muestran el límite entre la masa de agua subártica, de transición y ecuatorial subsuperficial (ver detalles en el texto).

c

Línea 107



d

Línea 110

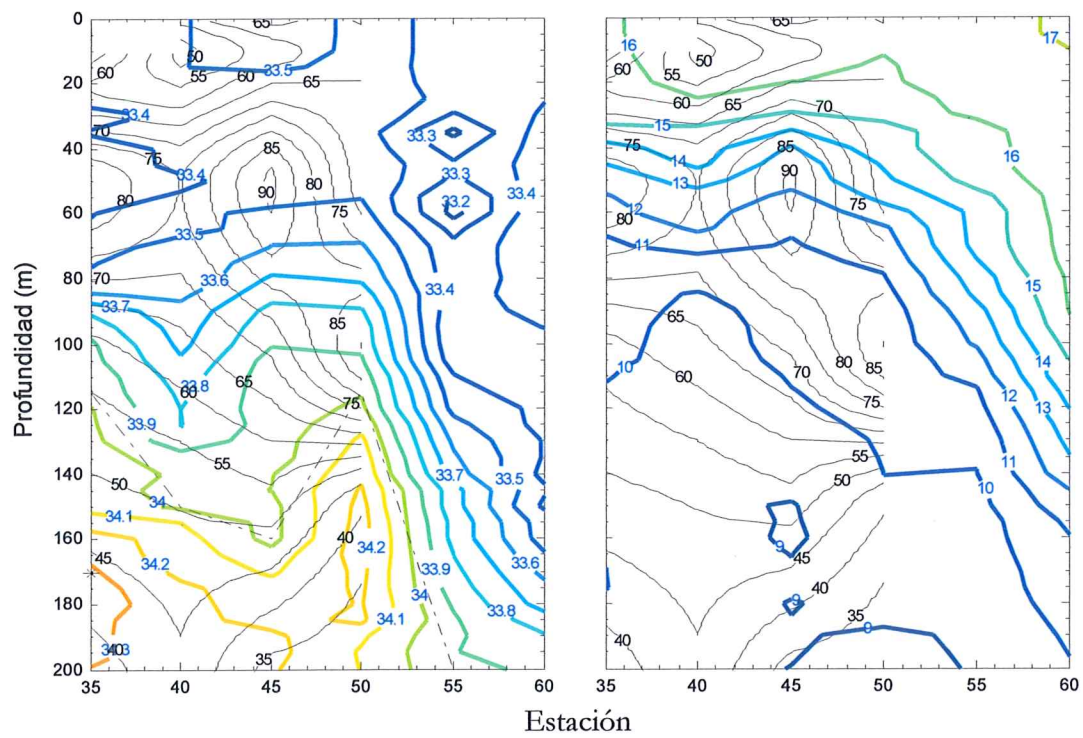


Figura 5. Continuación

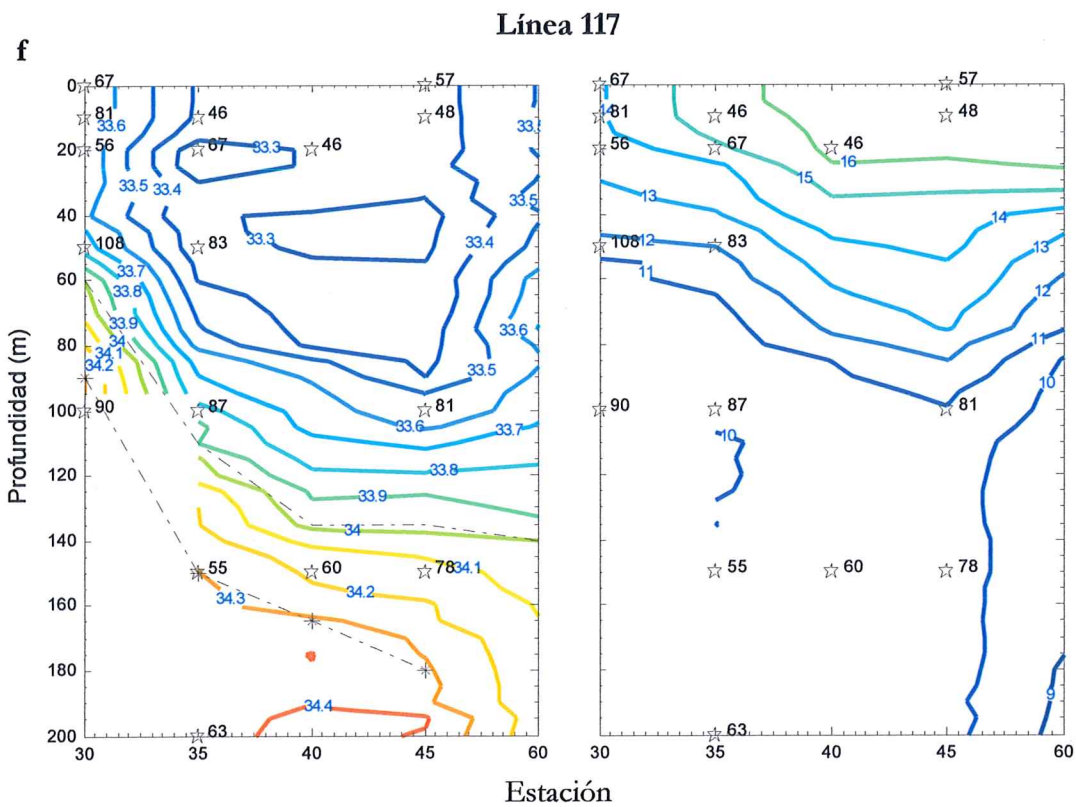
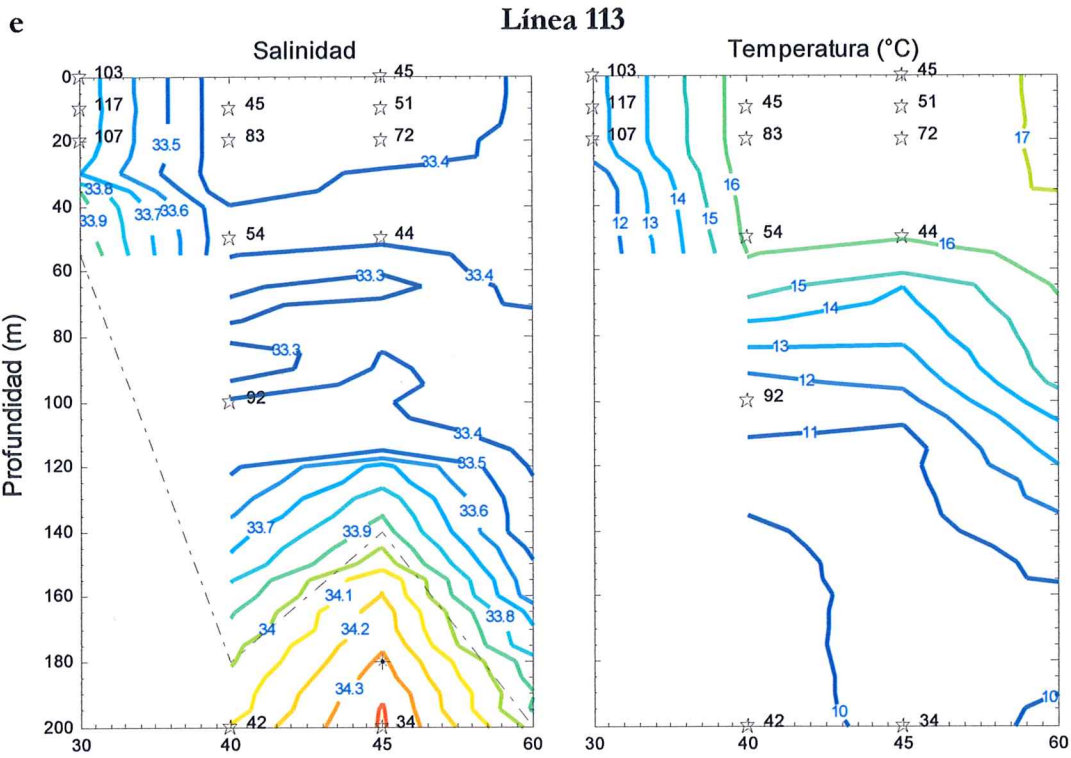


Figura 5. Continuación

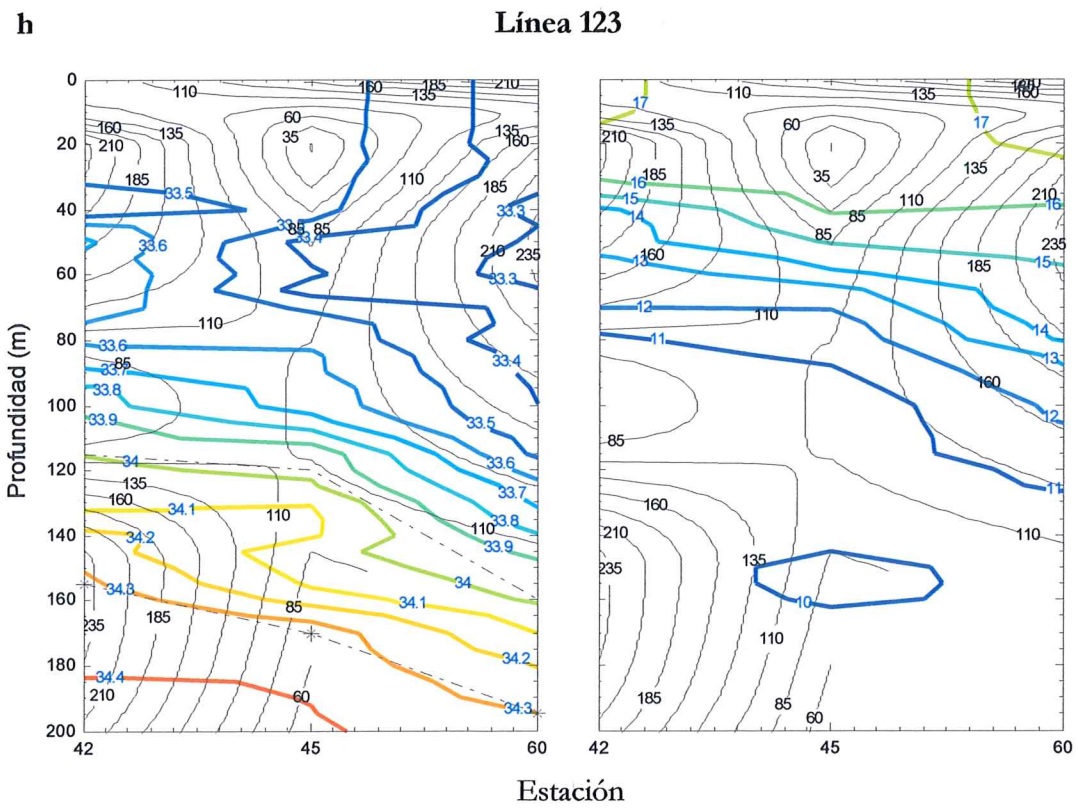
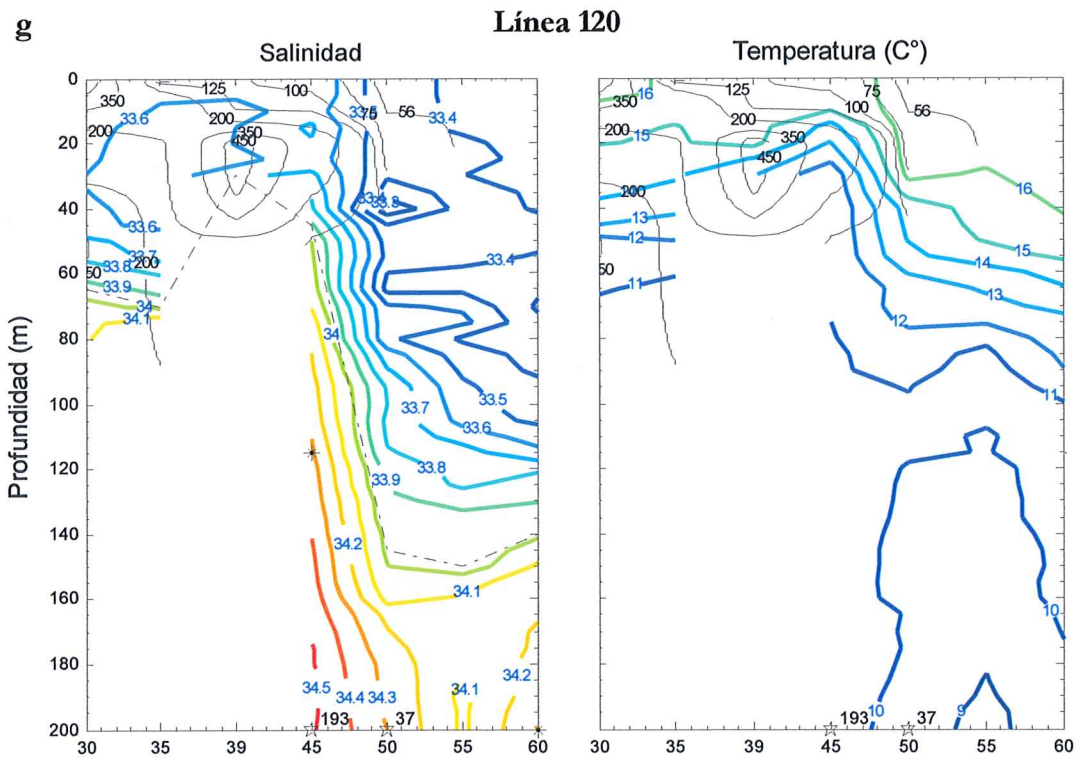


Figura 5. Continuación

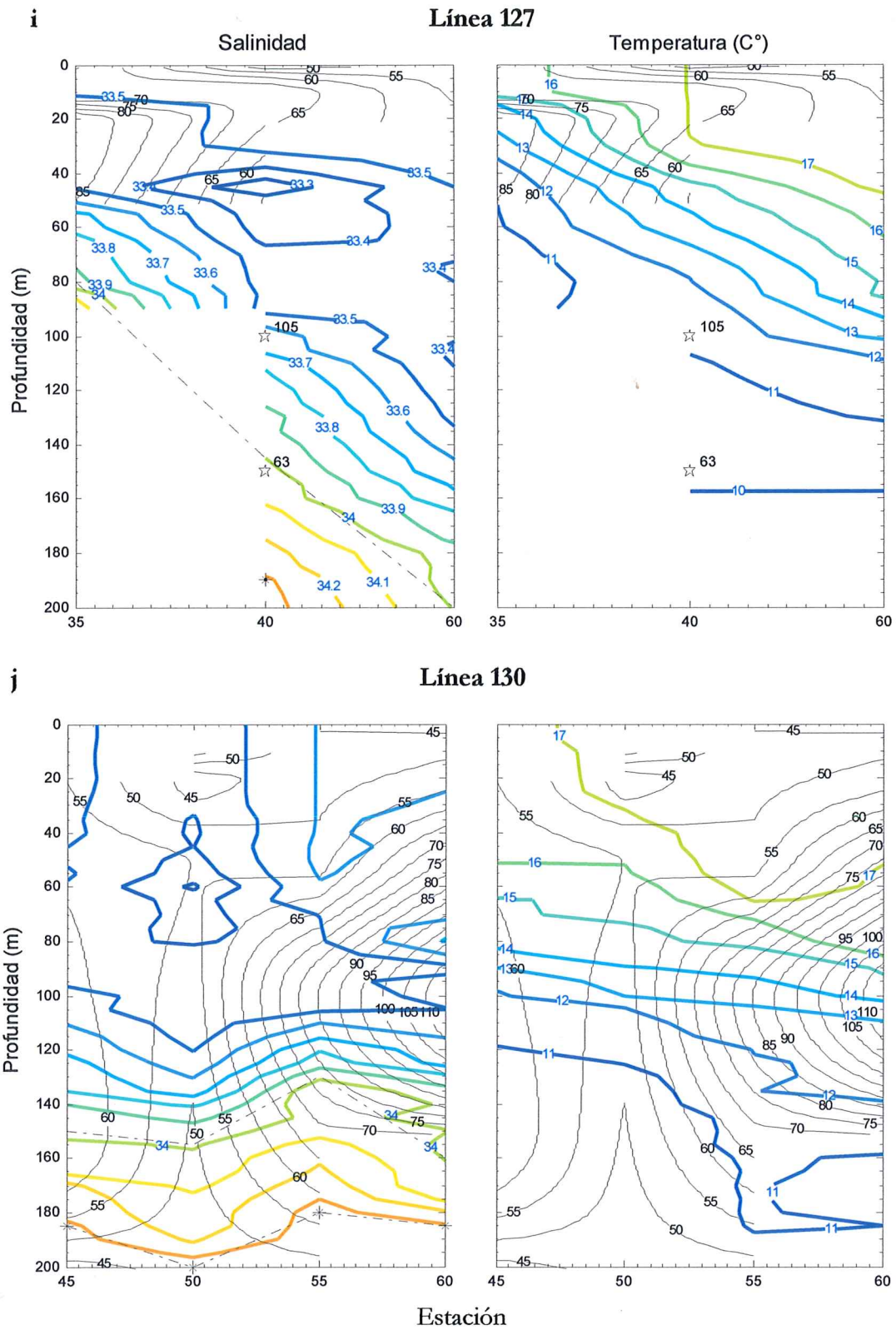


Figura 5. Continuación

Esta concentración es particularmente baja si consideramos que en el resto de los sitios de muestreo en esta línea la concentración superó los 110 nL/L, es decir, más allá del promedio (tabla 2)

Tabla 2. Estadística básica de la concentración de metano (nL/L) según la masa de agua en el muestreo IME 0604. SAW, Agua Subártica Superficial; ESsW, Agua Ecuatorial Subsuperficial; TW, Agua de Transición.

Masa de agua	Media	Máximo	Mínimo	Desv. Est.	No. muestras
SAW	102.9	534.7	9.3	89.8	140
TrW	83.5	243.4	32.2	60.1	26
ESsW	78.2	200.4	34.7	53.6	14
General	88.2	534.7	9.3	67.8	180

Por otra parte, los patrones entre el contenido de metano y la distribución de la salinidad y temperatura con la latitud muestran información interesante. Esto puede observarse en la figura 6 donde se traslapan los contornos de metano con los de salinidad y temperatura en las estaciones 30, 35, 40 y 45 a lo largo de todas las líneas de muestreo. Esta figura es equivalente a hacer un corte meridional (noroeste-sureste) del área de estudio. Las estaciones 35 y 40 muestran cierta similitud al presentarse en ellas dos núcleos de elevado contenido de metano (línea 107 y 120 en la figura 6b y c). El núcleo situado en la línea 107 se halla exactamente a la profundidad de la termoclina en ambas estaciones, mientras el segundo está dispuesta ligeramente por encima de ésta en la estación 35; y centrado en ella en la 40. En la estación 35 ambos núcleos son amplios mientras en la 40 son compactos y de mayor contenido del gas disuelto. La concentración de los núcleos en la estación 40 estuvo por encima de los 450 nL/L mientras que en la estación 35 fueron cercanos a 250 nL/L. Estos núcleos se encontraron en zonas donde se presentó cierto plegamiento hacia arriba por parte de las isóneas de temperatura y salinidad. En el caso particular de la estación 120, este comportamiento se debe a la presencia de la costa de bahía Vizcaíno. Sin embargo, el plegamiento en la línea 107 no tiene relación con la influencia de tierra (ver figura 1).

Un hecho no observado hasta ahora, fue la aparente respuesta de los contornos de metano con las isóneas de salinidad y temperatura en la estación 45 a la altura de la línea

120 (figura 6d). En este sitio, la posición de las isolíneas de metano coincide claramente con el plegamiento de la termohalina evidenciada por las isolíneas, en especial de las isohalinas. Esta fue la estación norteña que presentó la mayor incidencia del Agua Ecuatorial Subsuperficial como lo muestra las líneas discontinuas en el panel de salinidad (ver también figura 4). El máximo contenido de metano (>175 nL/L) en esta estación estuvo claramente asociado a esta masa de agua y contrasta con el bajo contenido de este gas en la periferia (entre 50 y 75 nL/L), que en su mayoría corresponde a Agua Subártica. Resulta interesante notar que la estación 120.45 fue el sitio que presentó, en los mapas de superficie, el núcleo de alta salinidad y clorofila-a, y de baja temperatura y oxígeno disuelto (figura 3a y b).

Los perfiles verticales del contenido de metano, clorofila y oxígeno (figura 7) muestran que en algunas estaciones como la 107.35, -40, 110.35, -40, 119.33, 120.35, y -45, entre otras, los máximos de los primeros dos parámetros se encontraron a profundidades cercanas, el de clorofila con relativa frecuencia por encima del otro. En la mayoría de las estaciones se detectó la presencia de un máximo subsuperficial de metano ubicado entre los 50 y 100 metros; aunque fue posible observar en ocasiones hasta dos (en ciertos sitios entre 10 y 20 metros y en otros entre 100 y 150 m) como en las estaciones 100.30, 113.40, 119.33, 120.35, 123.42 y 127.40.

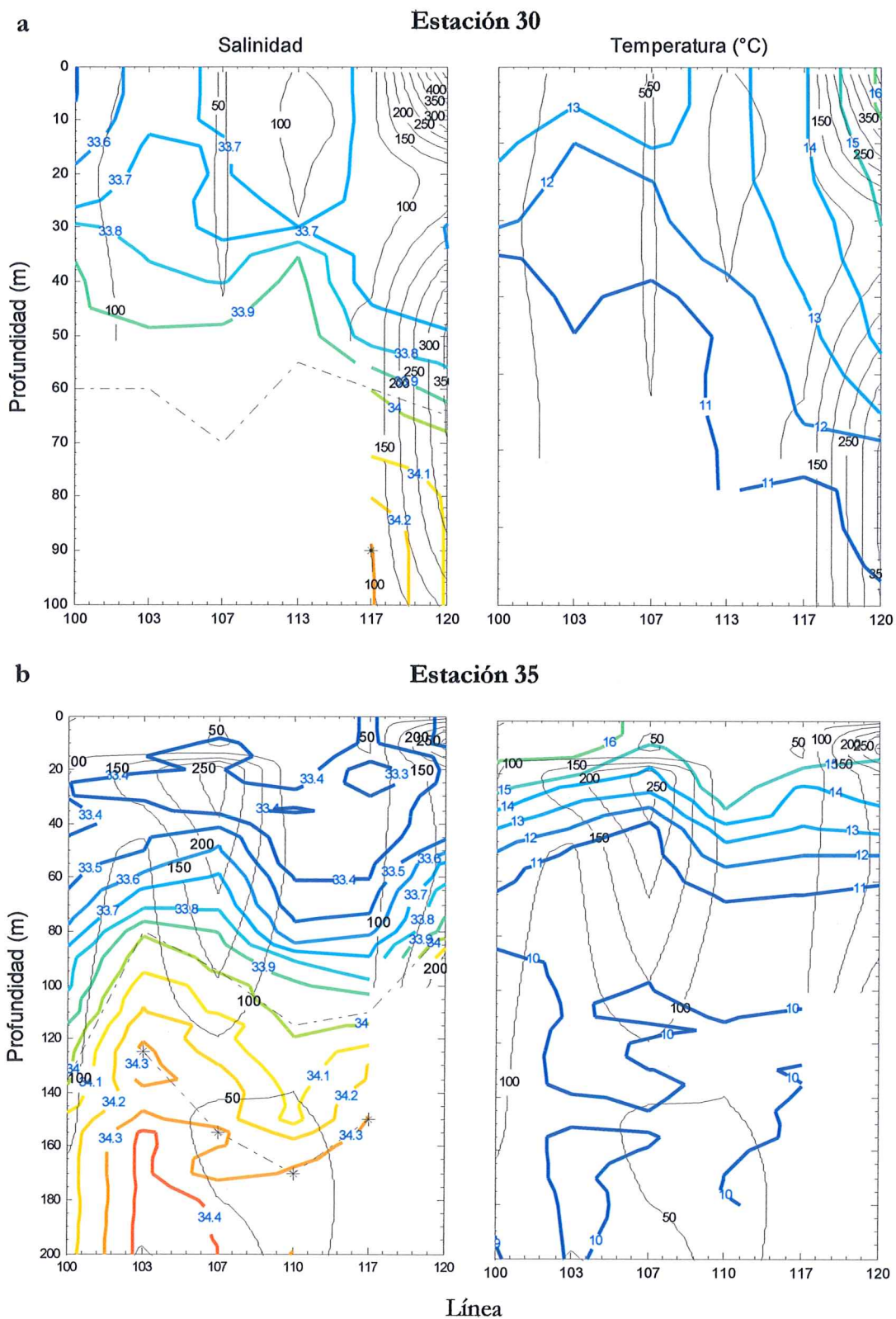


Figura 6. Distribución meridional de la salinidad y temperatura a lo largo de las líneas muestreo (contornos en color) superpuestos sobre los contornos de metano (nL/L) (líneas oscuras continuas). Las líneas punteadas oscura muestra el límite entre la masa de agua subártica, de transición y ecuatorial subsuperficial.

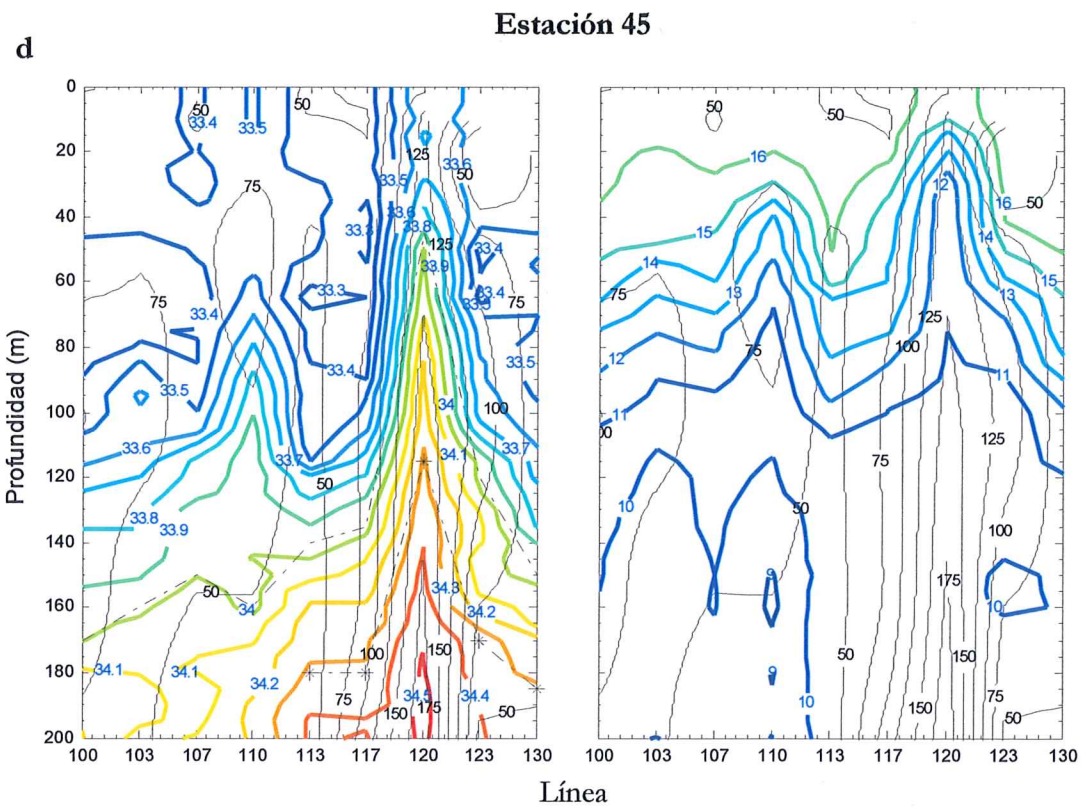
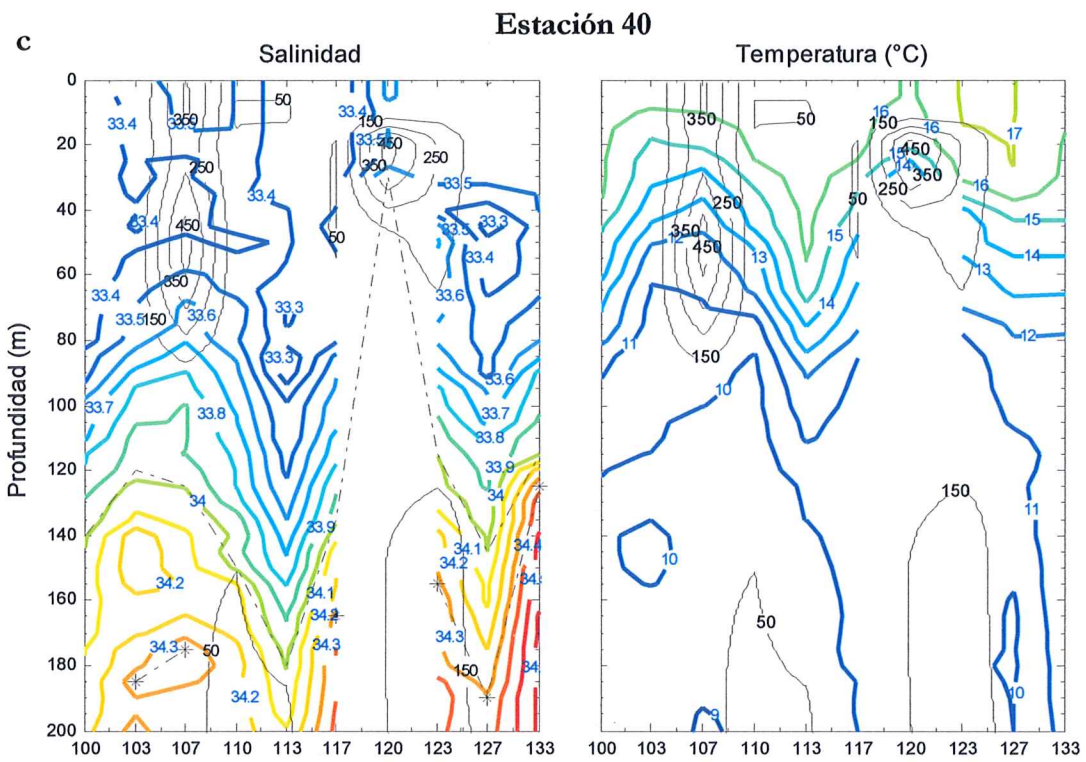


Figura 6. Continuación.

Durante el presente muestreo la mayor parte de las líneas analizadas exhibieron una concentración de metano entre los 50 y 200 nL/L, aunque algunas fluctuaron entre 300 y 550 nL/L como la 107 y 120 (figura 7). En gran parte de las estaciones ubicadas al norte (línea 100-113) puede observarse un gradiente descendente en la concentración de metano desde la superficie hasta los 20 metros, es decir, una reducción en el contenido de metano de superficie hasta esta profundidad (p/e ver estaciones de la línea 100 y 107, figura 7). En estas líneas y dentro de este rango de profundidad, los 10 metros presentaron con frecuencia las concentraciones de metano más bajas. Después de este mínimo de metano, la concentración aumenta hasta alcanzar un máximo que fluctúa frecuentemente entre los 50 y 100 metros.

A partir de la línea 113, los perfiles de clorofila y metano son más variables. En estas zonas puede observarse una alternancia en el comportamiento de la concentración de metano en los primeros 20 metros (figura 7). Mientras en algunas estaciones como la 120.30, 123.45, -60, y 133.40 se presenta una disminución en la concentración con respecto a la existente en la superficie, de la misma forma que en las líneas ubicadas al norte, en otras hay un incremento (estaciones 117.30, 119.33, 120.35, -39, -45, 123.42, entre otras). Una particularidad presentada por algunas estaciones sureñas como la 120.35, 123.42 y 123.60 es la presencia del máximo de metano por encima del de clorofila (figura 7). Son precisamente en estaciones sureñas como la 113.40, 117.30, 119.33, 123.42 y 127.40 donde se presentaron dos máximos superficiales de metano, el primero de ellos situado en los primeros 20 metros y el segundo entre los 100 y 150 m. Las estaciones que presentaron la concentración más alta de metano en todo el muestreo fueron la 107.40, 120.30 y -39 (figura 7). En las primeras dos, el valor máximo coincide con el decremento en la concentración de clorofila. La estación 120.30 fue la zona con mayor contenido de metano (534 nL/L) en todo el muestreo. En contraparte la concentración de metano más baja se registró en la estación 123.45 z=20 con un valor cercano a 9 nL/L (figura 7).

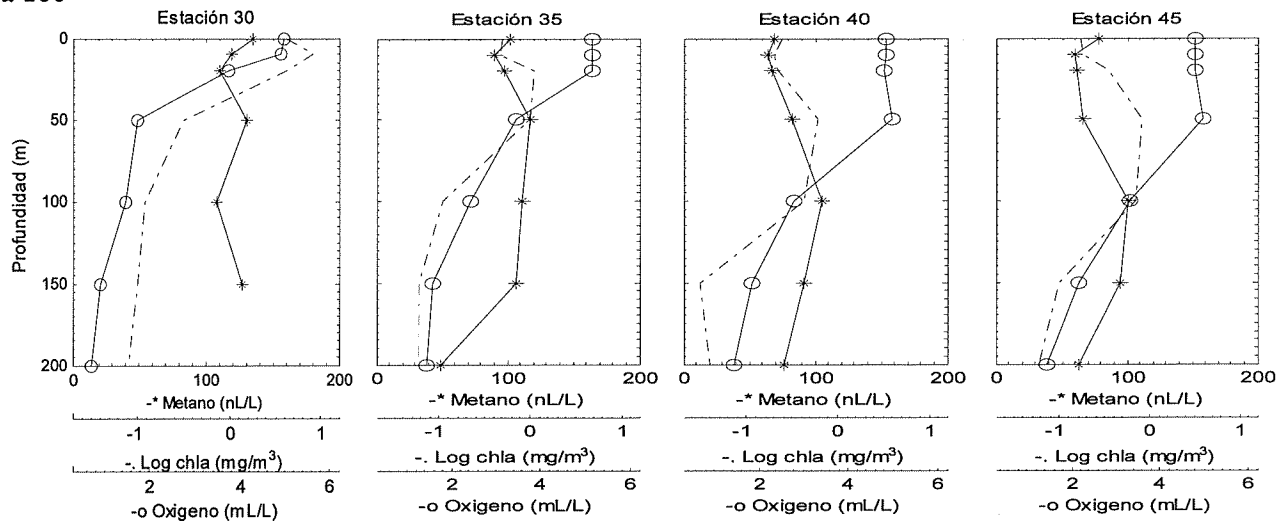
La distribución del oxígeno en la vertical (figura 7) mostró cierta relación con el contenido de metano en la mayoría de las estaciones. Se observó frecuentemente que el máximo subsuperficial de metano se halló a la profundidad de la oxiclina, es decir, en la región que presentó decrementos bruscos en el contenido de oxígeno. Algunas de las

estaciones que presentaron estas características fueron la 100.35, 107.40, 110.50, entre otras. En otras estaciones como las comprendidas en la línea 120 y 123, los patrones son menos consistentes. Por ejemplo, en la estación 120.30 tanto el máximo como el mínimo de metano se halló a la profundidad oxiclina. Mientras tanto, en la estación 123.45 y -60, el mínimo subsuperficial de metano coincide con la región donde la concentración de oxígeno es invariable en los primeros 50 metros, reflejo de la presencia de una capa de agua superficial homogénea en estos sitios (ver isolíneas superficiales de temperatura y salinidad de la línea 123 en la figura 5h).

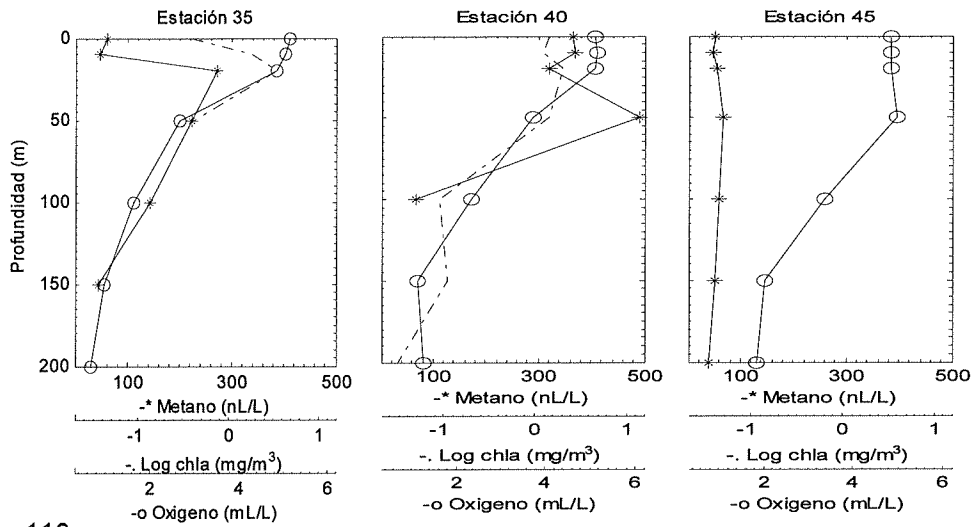
Las estaciones 117.30, 119.33, 120.30, -35 y -39 son particularmente interesantes por su poca profundidad de fondo (ver Anexo III). En estos sitios se realizó la colecta de muestra a una profundidad cercana al fondo lo que permite hacer observaciones acerca de cuál podría ser el papel del sedimento en el contenido de metano en la columna de agua. El perfil vertical de metano en la estación 117.30 y 120.30 y -39 (figura 7), muestra que después del máximo subsuperficial, la concentración disminuye conforme se acerca al fondo. Lo contrario puede observarse en la estación 119.33 y 120.35 en las cuales se observa un aumento en la concentración de metano hacia el fondo. En estos casos, esta información pudiera sugerir que el segundo máximo de metano visible en estas estaciones pudiera originarse en el sedimento.

La figura 8 muestra la forma en que estuvo relacionado el contenido de metano con los de clorofila y oxígeno. Con respecto a clorofila y metano, las concentraciones más frecuentes de este muestreo oscilaron entre 0.25 y 1.5 mg/m³ y de 50 a 150 nL/L respectivamente, como lo evidencia la agrupación de puntos en el panel de clorofila (figura 8a).

Línea 100



Línea 107



Línea 110

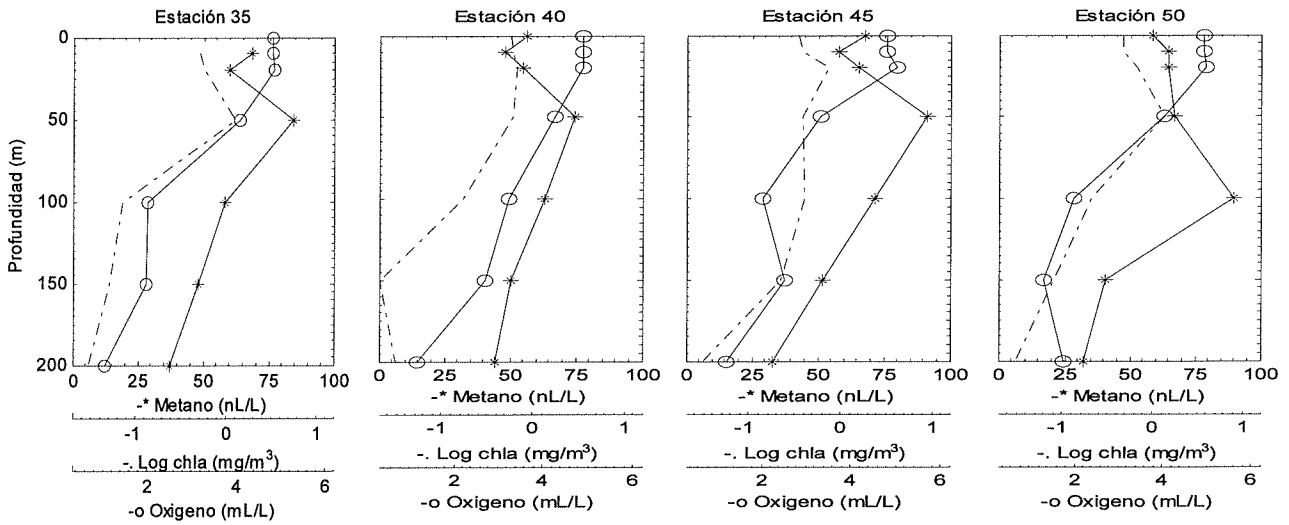
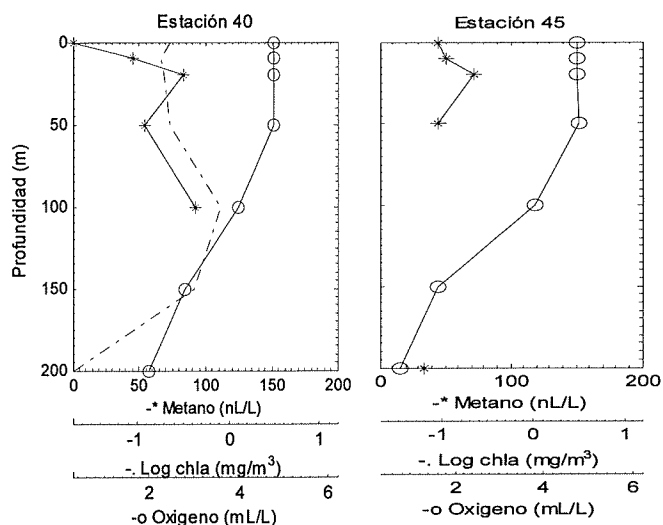
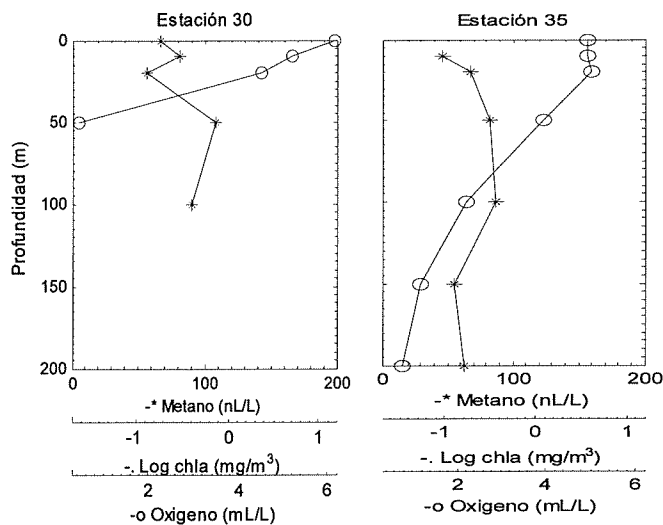


Figura 7. Perfiles verticales de clorofila (-.-), oxígeno (-o) y metano (-*) en las estaciones del muestreo IME 0604 (abril 2006)

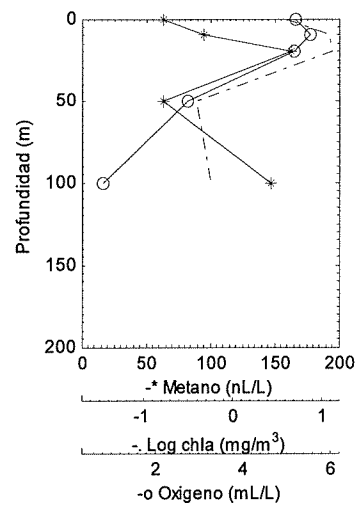
Línea 113



Línea 117



Estación 119.33



Línea 120

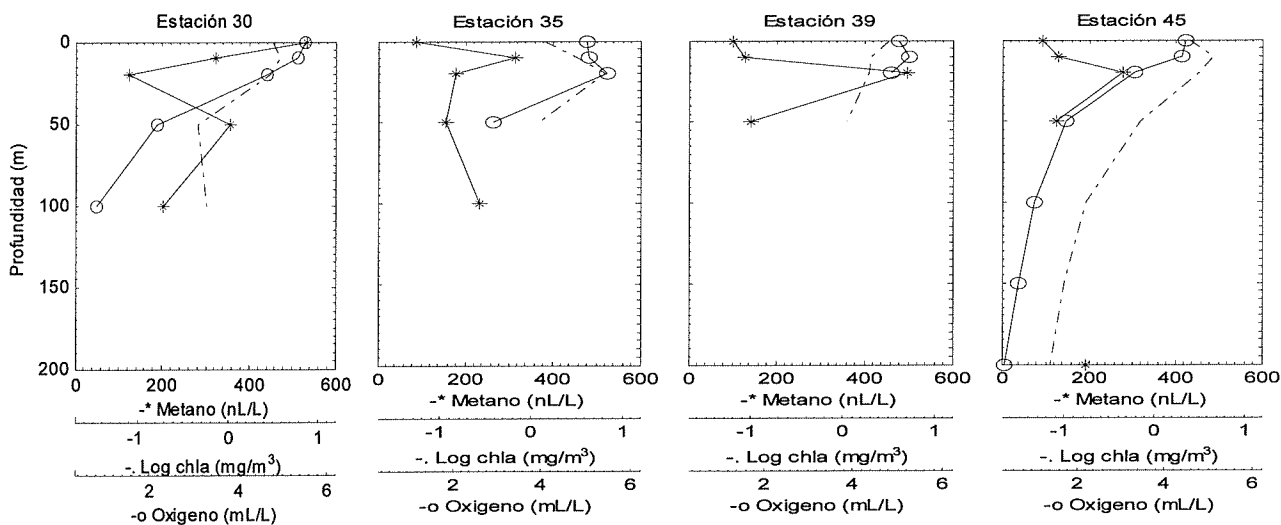
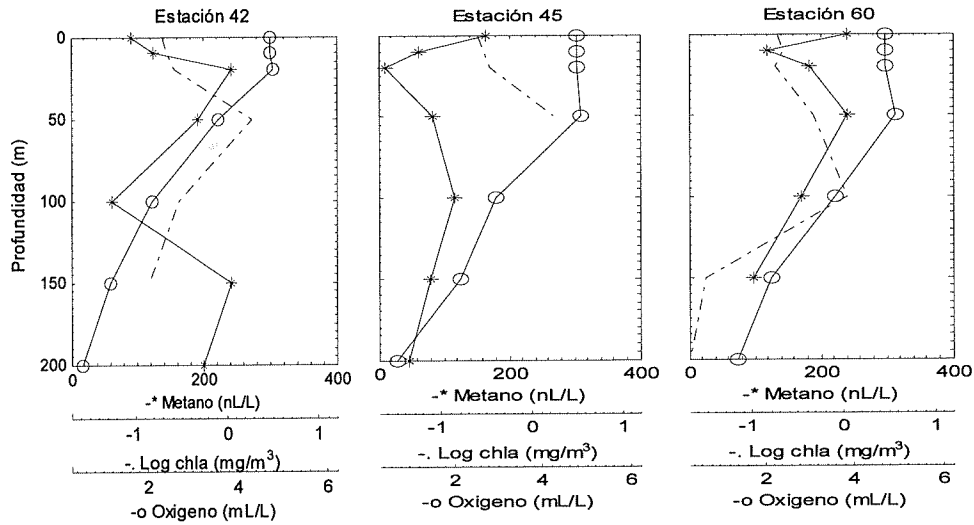
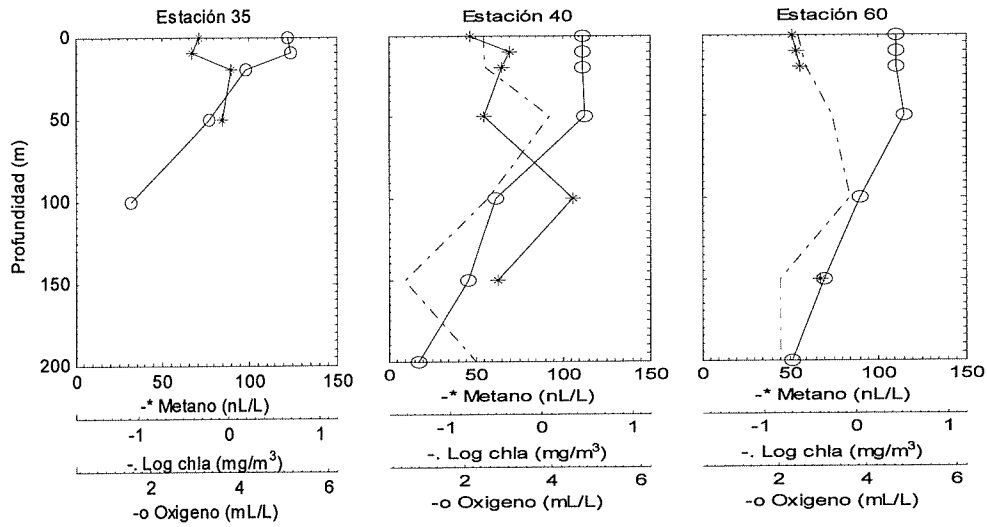


Figura 7. Continuación

Línea 123



Línea 127



Línea 130

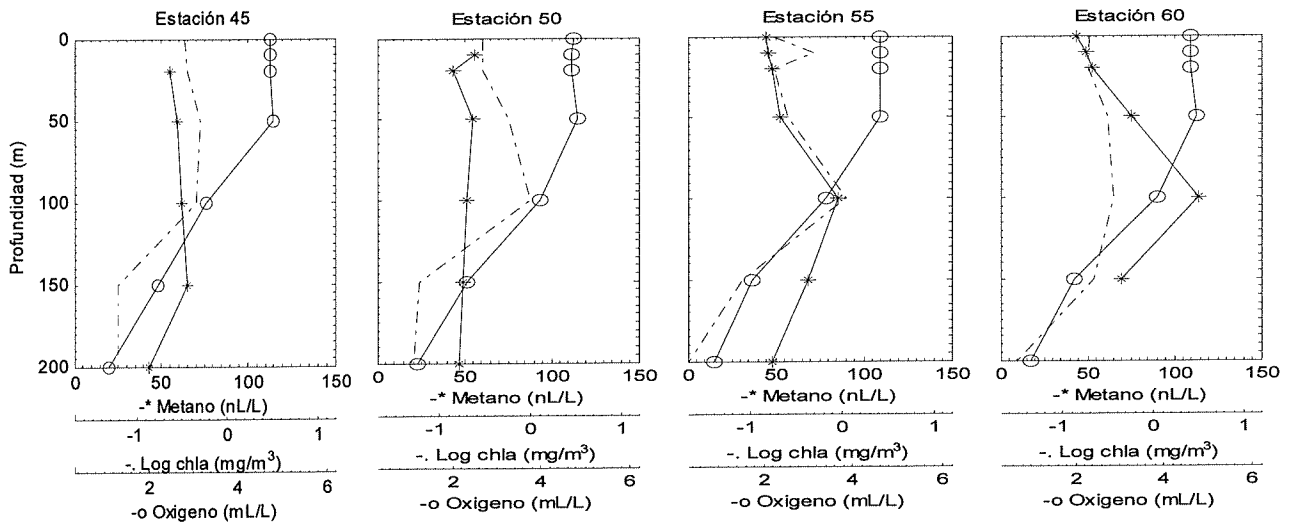


Figura 7. Continuación

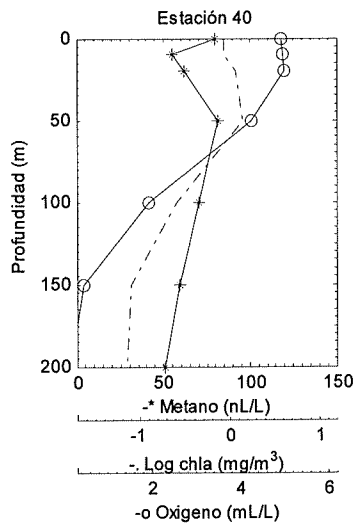


Figura 7. Continuación

Las concentraciones más elevadas de metano (>300 nL/L), se encontraron en sitios que presentaron contenidos de clorofila entre 0.5 y 3.75 mg/m^3 , es decir, concentraciones de clorofila intermedias. Los sitios que presentaron concentraciones de clorofila elevadas (>4 mg/m^3), así como aquellos que no superaron los 0.5 mg/m^3 (concentraciones bajas) presentaron contenidos de metano bajos o intermedios (entre los 50 y 250 nL/L). Con toda esta información podemos resumir diciendo que concentraciones bajas y altas de clorofila estuvieron asociadas a concentraciones bajas-intermedias de metano y que concentraciones intermedias de clorofila estuvieron asociadas a contenidos de metano intermedios y altos.

En cuanto a la relación entre el contenido de metano y oxígeno (figura 8b), esta parece menos clara que la registrada para la clorofila figura 8a. Las mayores concentraciones de metano se observaron diseminadas prácticamente por todo el rango de concentración de oxígeno, a excepción de concentraciones mayores a 6 mL/L donde se registraron valores de metano (<100 nL/L). La acumulación de puntos entre 4.5 y 5.5 mL/L se debe, en parte, a las estaciones superficiales, donde la concentración de oxígeno superficial fluctuó en estos valores de oxígeno.

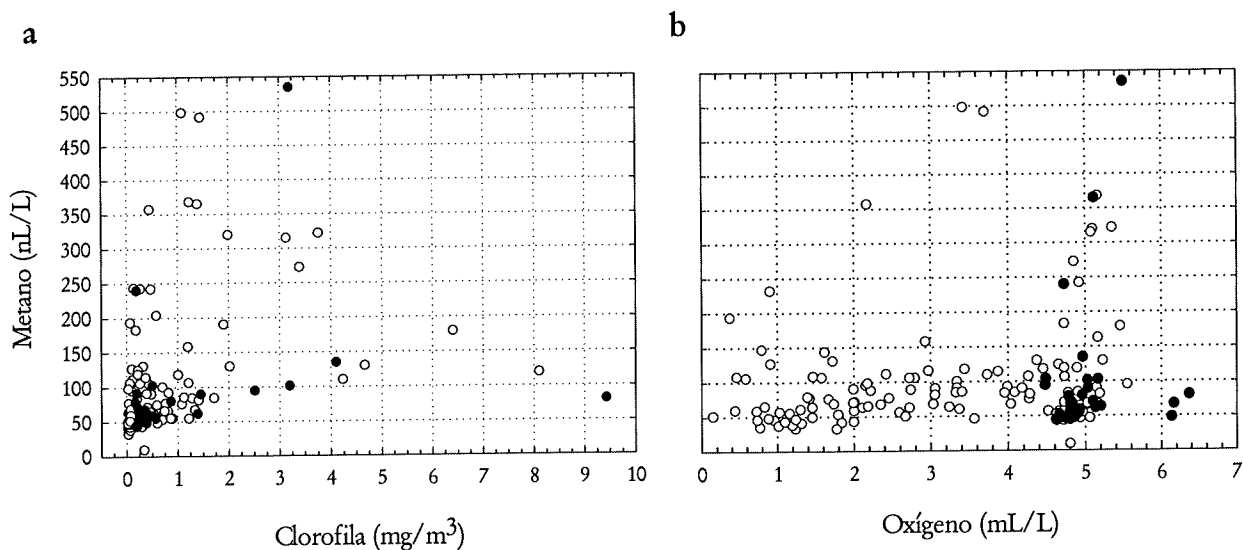


Figura 8. Dispersión de los valores de metano-clorofila, (a); y metano-oxígeno (b); para todas las profundidades. Los puntos oscuros representan las estaciones superficiales (0 metros).

Por otra parte, la dispersión de los datos de metano con respecto a variables hidrográficas como la temperatura y salinidad mostró algunos aspectos importantes (figura 9). Durante este muestreo los sitios con salinidad intermedia (entre 33.3 y 33.7) mostraron elevados contenidos de metano. En sitios con salinidades superiores a 33.7, la concentración de metano nunca sobrepasó los 250 nL/L.

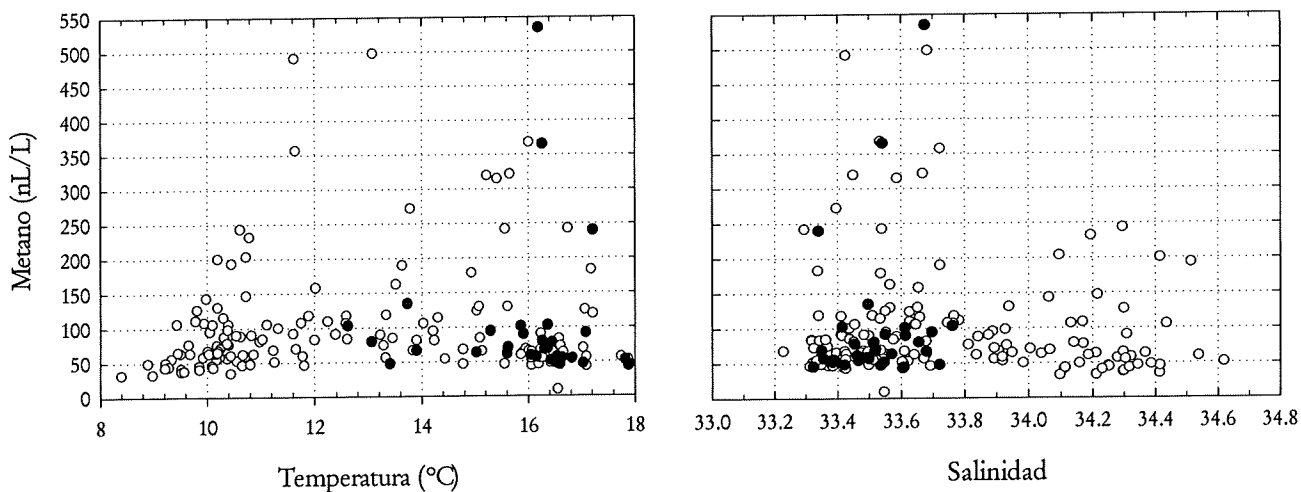


Figura 9. Dispersión de los valores de metano-temperatura y metano-salinidad para todos los sitios del muestreo IME0604 (abril 2006). Los puntos oscuros representan las estaciones superficiales (0 metros).

Esto en contraste con lo observado en el panel de temperatura, donde los sitios con mayor contenido de metano (>250 nL/L) se hallaron prácticamente en todo el rango de temperaturas (figura 9).

Por otra parte, el análisis de la distribución del metano en estaciones costeras y oceánicas, y separadas en líneas norteñas (100-120) y sureñas (123-133) (figura 10), mostró que en las estaciones oceánicas de las líneas norteñas (figura 10a) fue clara la presencia de contenidos de metano similares (entre 50 y 100 nL/L) en todas las profundidades analizadas. Mientras tanto, las estaciones costeras de estas mismas líneas mostraron concentraciones de metano más variables, en especial en los primeros 50 metros, lugar donde se presentaron los mayores contenidos registrados en estaciones norteñas. Por su parte, las estaciones costeras ubicadas en líneas sureñas mostraron, de la misma forma que en sus homólogas norteñas, los mayores contenidos de metano en los primeros 50 metros (figura 10b). En general, los contenidos de metano encontrados en estaciones costeras y oceánicas ubicadas en líneas sureñas exhibieron concentraciones de metano más variables que las observadas en líneas norteñas. Los contenidos de metano en sitios oceánicos situados en líneas sureñas (figura 10b) no fueron tan bajos ni homogéneos como los observados en las estaciones oceánicas norteñas (figura 10a). Con esta información resulta claro puntualizar que: a) los mayores contenidos de metano se hallaron en estaciones costeras sin importar si estas se ubicaron en líneas norteñas o sureñas y b) parece observarse una mayor variabilidad en los contenidos de metano en líneas sureñas con respecto a las norteñas.

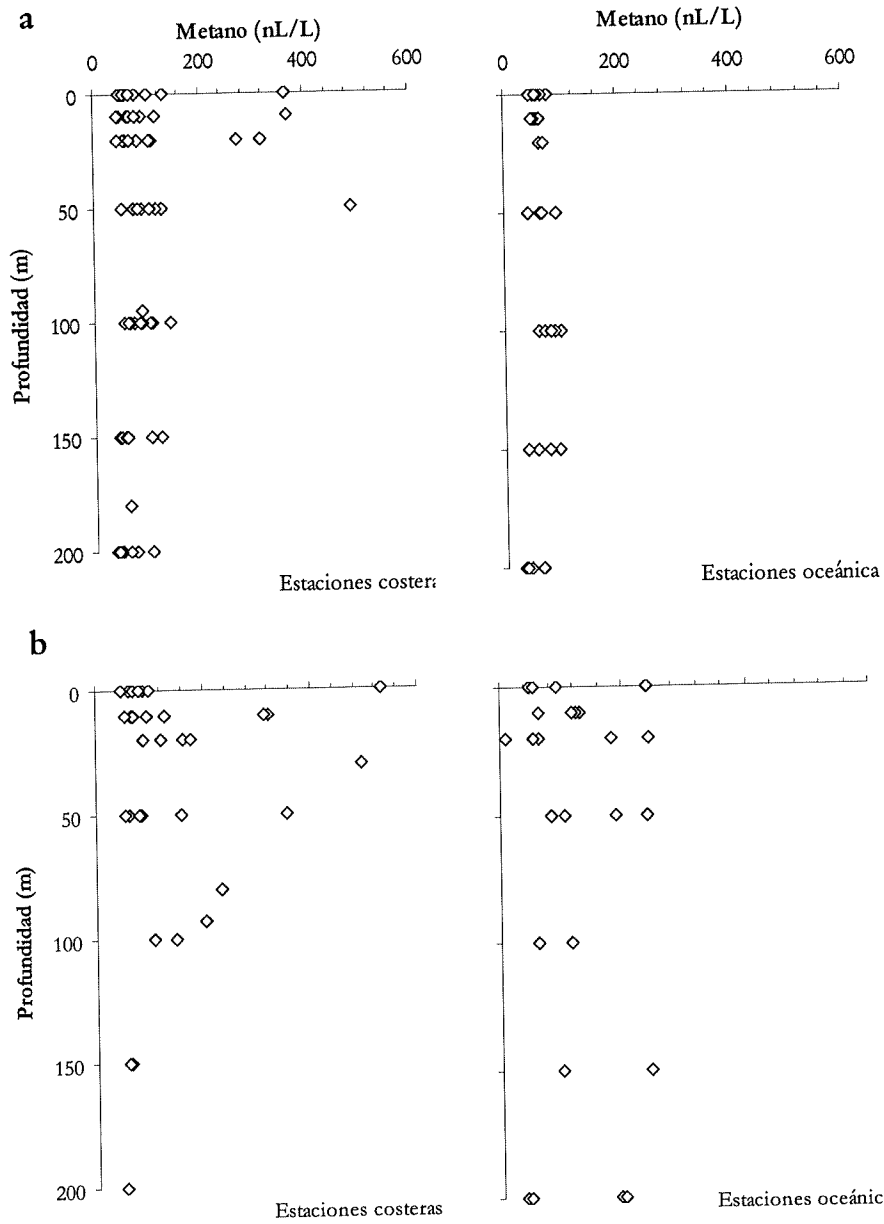


Figura 10. Distribución del metano respecto a la profundidad en estaciones costeras (estaciones -30, -35 y -40) y oceánicas (estaciones mayores a -40) en a) líneas norteñas (100-120) y b) líneas sureñas (120-133) durante abril del 2006.

7.2.3. Factor de saturación y flujos de metano océano-atmósfera.

El factor de saturación calculado para cada estación junto con la magnitud y dirección de los flujos de metano en la interfase océano-atmósfera se muestran en la figura 11. Las principales zonas que presentaron sobresaturación en el contenido de metano con respecto al esperado en el equilibrio atmosférico fueron, en orden de intensidad descendente fueron: la estación 120.30 (ubicadas en el interior de Bahía Vizcaíno), la 107.40 (frente a Bahía San Quintín), la región cercana a la estación 123.60 (región alejada de la costa situada frente a Punta Eugenia) y la periferia de la estación 113.30 figura 11a. Se observaron dos áreas subsaturadas (valores <1): toda la sección oceánica de las línea 100-120 y la periferia de la líneas 127 y 130.

Las zonas con mayor flujo de metano hacia la atmósfera (valores positivos) fueron, en orden de intensidad la estación 120.30 (frente a Bahía Vizcaíno), 107.40 (frente a San Quintín), las zonas aledañas a la línea 123 (Punta Eugenia), y en menor grado la zona costera cercana a la estación 113.30 figura 11b. Para la estación situada en Bahía de Vizcaíno (120.30), se observó un flujo máximo de $52 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$, mientras que para las demás estaciones los flujos variaron entre los 5 y $25 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$. Las zonas que presentaron flujos en dirección al océano (valores negativos) se encontraron alejados de la costa, entre estas regiones destacan la estación 113.45 y la periferia de las líneas 127 y 130. La estación 113.45 mostró el valor más bajo en todo el muestreo ($-2 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$). Aunque la mayoría de los sitios que mostraron flujos hacia la atmósfera - valores positivos - se encontraron cercanos o intermedios a la costa, la zona contigua la línea 123 mostró flujos positivos, aun en las estaciones más alejadas de la costa (estación 123.60).

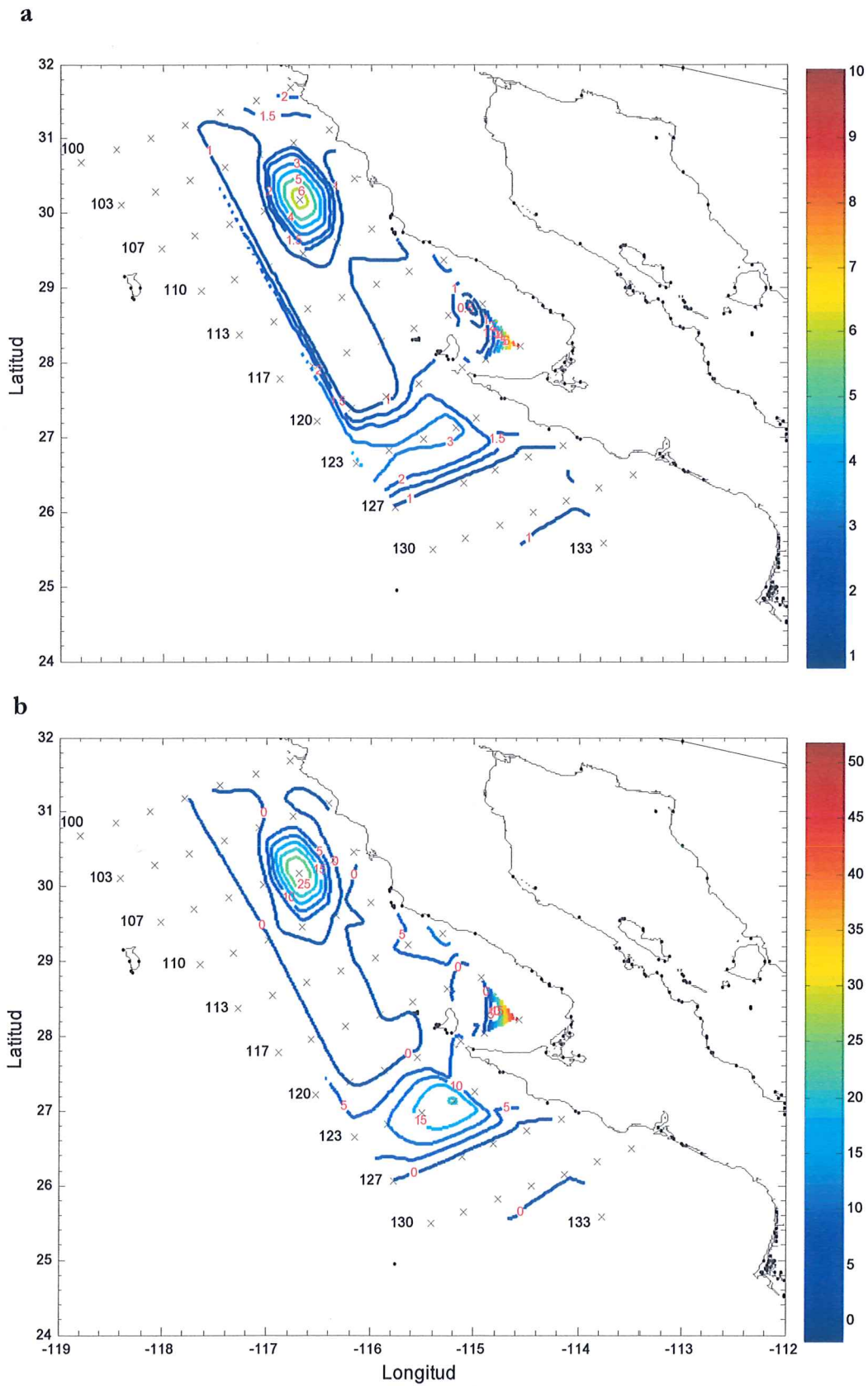


Figura 11. (a) Factor de saturación del metano respecto al equilibrio atmosférico; y (b) flujos de metano océano-atmósfera ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$) obtenidos durante abril del 2006. Factores de saturación >1 indican sobresaturación. Valores positivos en b indican flujos en dirección a la atmósfera, negativos hacia el océano.

Aunque los mapas de flujos y saturación son muy similares, el último de estos permite hacer observaciones importantes en las estaciones 123.45 y -60. En la primera de estas, se observó una saturación cercana a 3 y un flujo $>15 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$; mientras que para la segunda estación se registró una saturación cercana a 5 y un flujo de solo $(5-10 \mu\text{mol}/\text{m}^2)$ (figura 11b). Es decir, la estación 123.45 presentó mayor flujo hacia la atmósfera en comparación con la estación 123.60 a pesar de encontrarse menos saturada que esta última. Esto nos indica que no siempre es válido considerar que aquella estación que presenta la mayor saturación tendrá que presentar el mayor flujo.

7.3. Muestreo IME0607 (julio 2006).

7.3.1. Hidrografía.

Durante julio del 2006 parece observarse una reducción en la intensidad de las surgencias, esto a juzgar de la presencia de agua menos fría y salada en el margen costero (figura 12), en comparación con las observaciones de abril (figura 3). Las zonas cercanas a la costa que presentaron eventos de surgencias fueron las líneas 103, 113-120 y 127 como lo indica la presencia de fuertes gradientes térmicos a 10 metros de profundidad (figura 12b). En julio la salinidad superficial máxima en la zona costera de la sección norte del área de estudio (línea 100-120), mostró valores entre 33.4 y 33.6, similares a los encontrados en las estaciones oceánicas (figura 12a). Esto último a diferencia de lo registrado durante abril en donde se observó una clara diferencia en la salinidad de las aguas costeras (mayor) en comparación con las oceánicas, todo ello reflejo de intensos procesos de afloramiento de agua fría y salada (figura 3).

Por su parte la sección costera de la parte sur (línea 127-137), mostró la presencia de agua más salada en comparación con la parte norte (figura 12a). En esta zona sureña, tanto en superficie como a 10 metros de profundidad, la zona costera presentó valores de salinidad y temperatura significativamente diferentes a los registrados en su contraparte oceánica.

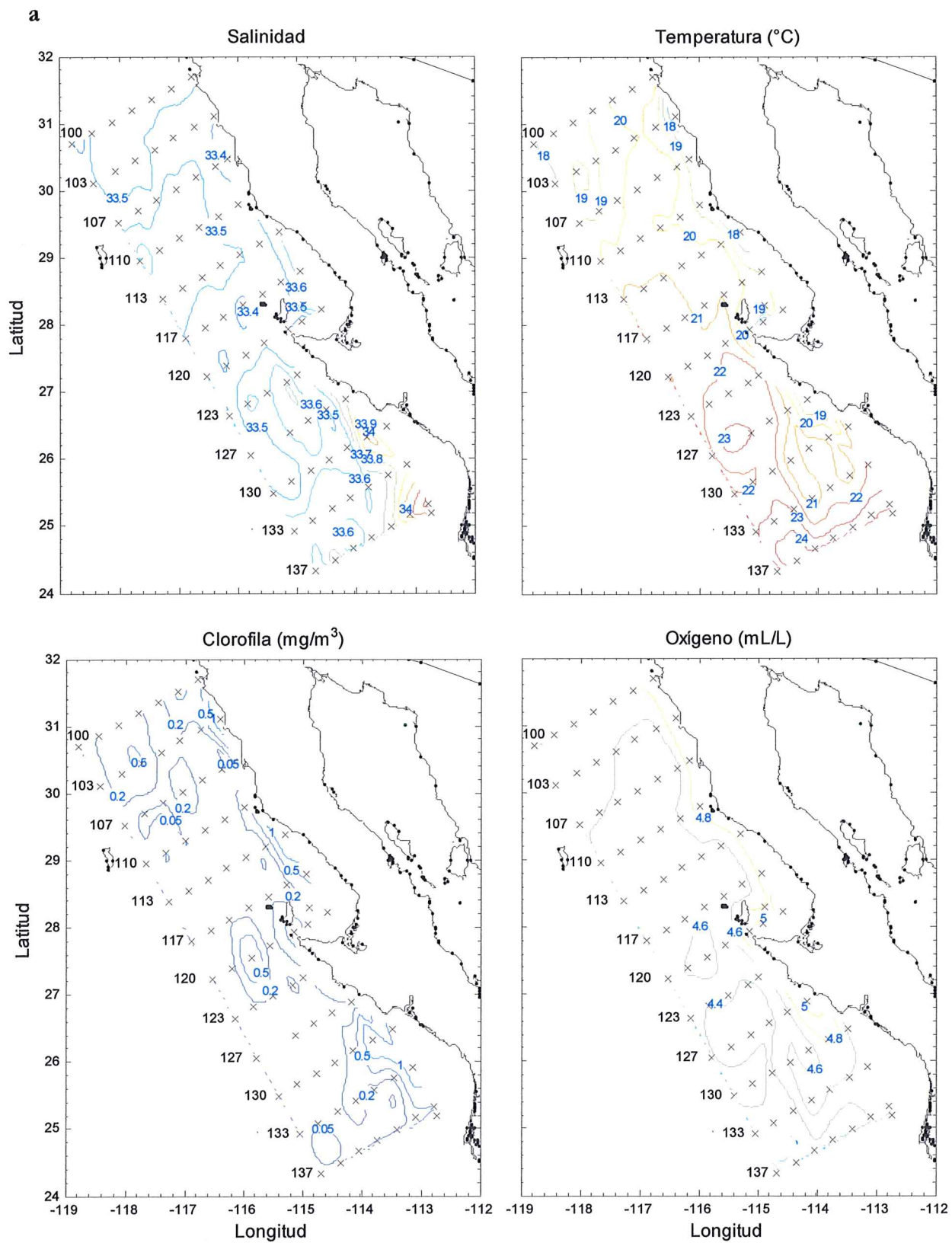


Figura 12. Distribución de la salinidad, temperatura, clorofila y oxígeno en a) superficie; y b) a 10 metros de profundidad en el crucero IME 0607 (julio 2006).

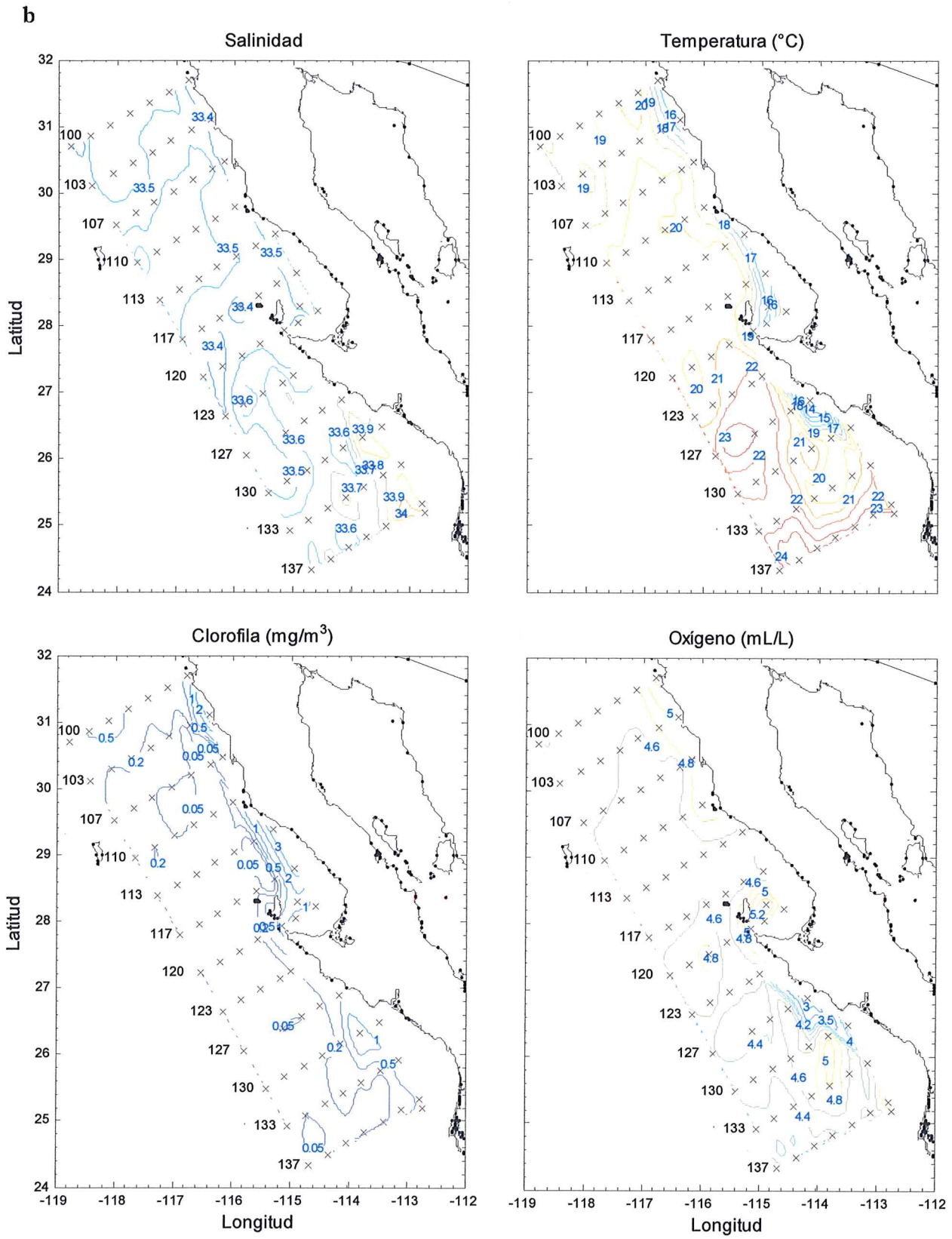


Figura 12. Continuación.

A 10 metros de profundidad, el área cercana a la costa comprendida entre la línea 127 y 130 presentó un fuerte gradiente de temperatura evidenciado por la presencia de contornos relativamente paralelos a la línea de costa (figura 12b). En esta zona resulta clara la presencia de un núcleo de baja temperatura $\approx 14^{\circ}\text{C}$ en la estación 127.30. Durante el presente muestreo los contornos superficiales de temperatura mostraron con poca claridad la presencia de afloramientos de agua en comparación con los datos de 10 metros. Más al sur, en líneas como la 133 y 137 las isolíneas de temperatura son perpendiculares a la línea costera, sugiriendo la presencia de un frente de agua caliente y con densidad de hasta 22.6 (ver campo de densidades Anexo IV), valor que se encuentra dentro del agua de transición entre las masas de Agua Subártica, Subtropical Superficial y Tropical Superficial (figura 13). Los contornos de temperatura en dichas estaciones sureñas muestran tanto en superficie, como a 10 metros, la presencia de una lengüeta de agua cálida con temperatura superior a 21°C que abarca desde la línea 137 hasta la 120. Todo este cuerpo de agua, puesto que su temperatura sobrepasa el límite superior de la masa de agua subártica (figura 13), representa una intrusión de aguas de transición a la zona de estudio. El campo de densidad (Anexo IV), muestra también la presencia de un núcleo de bajo valor de hasta $\sigma_t=22.8$, que claramente corresponde a Aguas de Transición.

En cuanto al oxígeno disuelto, en este muestreo destaca la presencia de bajas concentraciones contrastando con los registros de abril. En julio se observaron en la región cercana a la costa, valores máximos superficiales entre 4.8 y 5 mL/L (figura 12), esto a diferencia de la hallado durante abril (algunos sitios presentaron valores cercanos a 6.2 mL/L ver figura 3a). A diferencia de las observaciones en superficie durante abril, en julio no fueron frecuentes núcleos de alta concentración de oxígeno en zonas cercanas a la costa; estos presumiblemente originados por el crecimiento de fitoplancton asociado al afloramiento de aguas ricas en nutrientes.

Durante este muestreo la concentración de oxígeno a 10 metros fue, en general, ligeramente superior a la encontrada en superficie, hecho opuesto a lo registrado durante abril. La concentración de oxígeno superficial más baja se halló en la zona oceánica de la sección sur (líneas 130-137), mostrando valores de hasta 4.2 mL/L. Esta zona de baja concentración de oxígeno resultó ser relativamente amplia, formando una lengüeta delgada

desde la línea 137 a la 123 la cual está delineada por la oxilínea de 4.4 mL/L en la figura 12a. Esta zona se encuentra en la región mencionada anteriormente donde se registraron valores de densidad bajos y temperaturas superiores a los 21°C, atribuidos a la presencia de Aguas de Transición (Anexo IV). A 10 metros de profundidad destaca la presencia de concentraciones extremadamente bajas de oxígeno en estaciones costeras como la 127.30 cuyo valor fue cercano a 3.5 mL/L (figura 12b). Esta zona corresponde exactamente con un plegamiento en el campo de temperatura atribuida a afloramientos de agua (ver panel de temperatura en figura 12b)

Los diagramas T-S de las estaciones a las cuales se les determinó su contenido de metano (figura 13), muestra que las líneas 103, 107 y 113 presentaron, hasta antes de los 200 metros, agua cuyo origen fue esencialmente Subártico (SAW). En dichas líneas, y a profundidades cercanas a los 200 metros, las aguas son más saladas haciendo con esto que los punto cercanos a esta profundidad se hallen fuera del dominio del Agua Subártica, situándose en Aguas de Transición con la masa de agua Ecuatorial Subsuperficial (ESsW). Por otro lado, en las estaciones de la línea 120, 127, 133 y 137 no solo es posible observar la presencia del Agua Ecuatorial Subsuperficial, sino además, en las primeras profundidades, es clara la presencia de agua de transición entre la masa de Agua Subártica (SAW) y el Agua Tropical Superficial (TSW), misma que presenta salinidades similares a la primera pero con temperaturas superiores a 21 °C. En el caso particular de la línea 137, las aguas superficiales mostraron la presencia de agua de transición entre la masa de Agua Subártica (SAW) y la Subtropical Superficial (StSW).

Los diagramas T-S de las estaciones comprendidas en las líneas 127, 133 y 137 (figura 13), indican que la capa superficial presentó características termohalinas que se sitúan fuera del dominio del Agua Subártica. Así mismo, en los estratos intermedios de la línea 137, en la estación representada con la línea magenta (estación 137.35), se distingue un plegamiento de la línea T-S hacia la izquierda en dirección a la masa de Agua Subtropical Superficial (StSW), sugiriendo una posible influencia de esta masa de agua en la estación. Toda esta información indica que durante el presente muestreo se dio una intrusión de agua calida debido al debilitamiento de la Corriente de California.

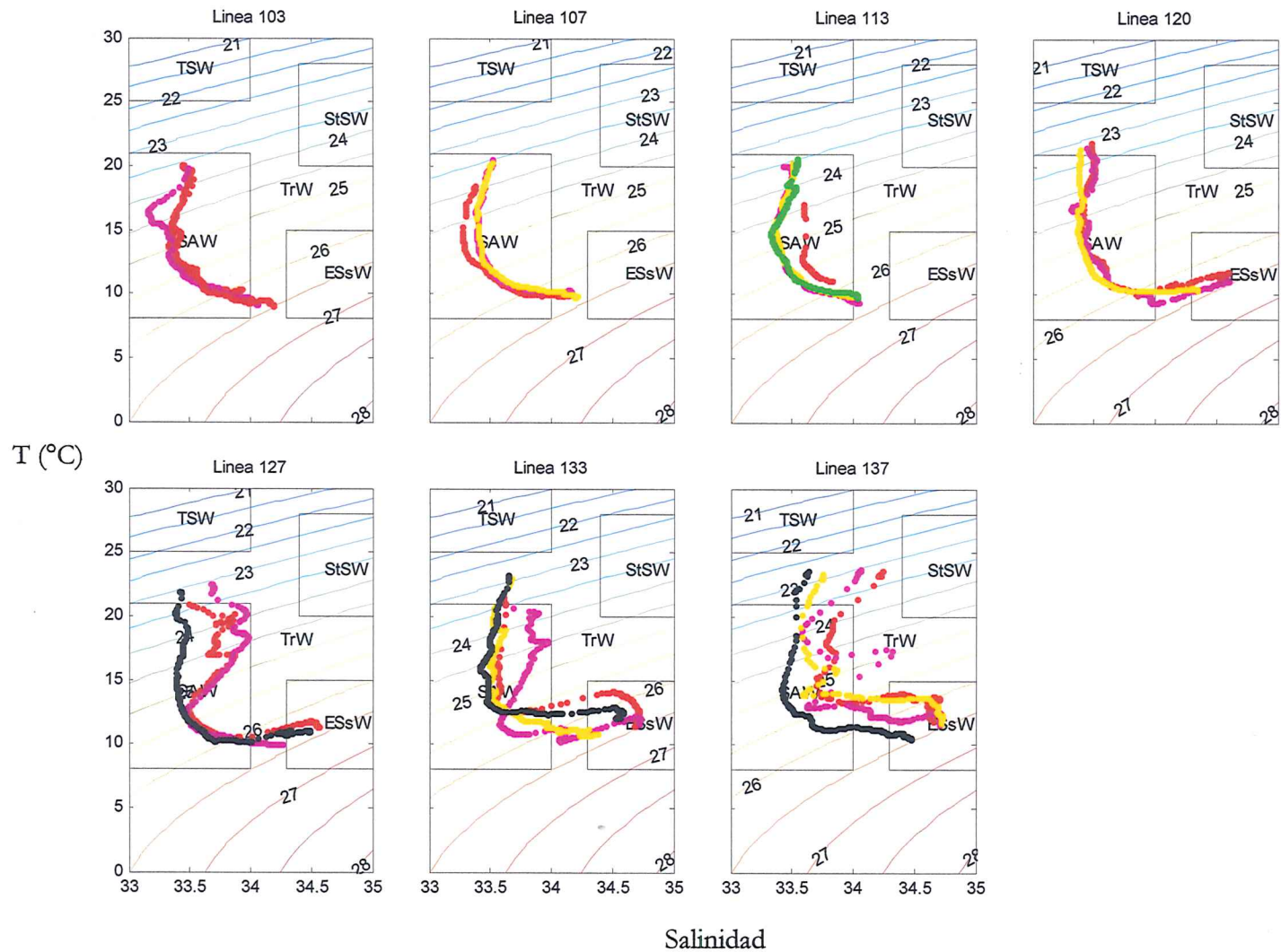


Figura 13. Diagramas T-S de las líneas de muestreo analizadas durante julio del 2006 y sus respectivas estaciones cubriendo hasta los 200 m. Cada grupo de puntos en color representa una estación. Las estaciones en colores calidos son las más cercanas a la costa, colores fríos representan las más alejadas. Las estaciones en color negro no fueron analizadas para su contenido de metano (ver mas adelante en texto). SAW, agua subártica superficial; TrW, agua de transición; ESsW, agua ecuatorial subsuperficial; StSW, agua subtropical superficial; TSW, agua tropical superficial.

7.3.2. Distribución del metano disuelto.

Durante el presente muestreo el número de estaciones donde se analizó el contenido de metano se redujo (ver tabla I). La distribución del metano en la horizontal a lo largo de las diferentes estaciones contenidas en cada línea se muestra en la figura 14. En la mayoría de los casos, los núcleos de alta concentración se hallaron en la parte baja de la termoclina o a la profundidad de la haloclina, esto último no registrado en abril. Ejemplo de núcleos observados a la profundidad de la haloclina son las estaciones 103.35 $z=100$, 113.40 $z=150$ y 133.45 $z=150$ (figura 14a, c y f). Las estaciones que presentaron núcleos en la parte baja de la termoclina fueron la 107.45 $z=100$ y 120.45 $z=50$ (figura 14b y d). La estación 113.40 $z=50$, también presentó un núcleo a la profundidad de la termoclina aunque este destacó por ser de gradiente negativo. En general la concentración de metano en la superficie fue baja, entre 40 y 80 nL/L figura 13, aunque figuraron excepciones (estación 113.30, ≈ 220 nL/L, figura 14c). Del total de las estaciones analizadas durante julio, las líneas 107 y 113 fueron las únicas donde se llevaron a cabo mediciones de metano en zonas aledañas a la costa (estaciones 107.32 y 113.30).

Con respecto a la línea 107 (figura 14b), en las estaciones 107.32 y -45 se observaron dos núcleos de elevado contenido de metano. De estos, el ubicado en la estación 107.32 $z=150$ se encuentra en la parte baja de la haloclina, en una zona donde las isohalinas de 34 y 34.1 divergen; y donde según indican la línea punteada oscura, esta zona se encuentra en el dominio de Aguas de Transición (TrW). A partir de la línea 120 en la figura 14d se dejó de mostrar las líneas oscuras divisorias entre masas de agua, esto debido a que, más al sur de esta línea, se observó la presencia de aguas de transición por encima de la masa de Agua Subártica (figura 13), lo cual dificulta la separación de las masas de agua en esta figura.

Las estaciones comprendidas en las líneas 127 y 133 se caracterizaron por presentar una distribución de metano donde sus contornos corrieron de forma casi perpendicular al fondo, mostrando con esto cierta homogeneidad, en cuanto a contenido de metano, en la columna de agua (figura 14e y f). Los contornos de salinidad en las estaciones cercanas a la costa de ambas líneas, mostraron un ascenso escalonado. Así mismo, estas dos líneas presentan otra particularidad interesante el panel de salinidad. En los primeros 80 metros de

profundidad de las estaciones más alejadas de la costa, es decir, estaciones -60 y -45 para la línea 127 (figura 14e) y de la -55 a la -45 para la línea 133 (figura 14f) se observan contornos de salinidad prácticamente perpendiculares al fondo como si se tratara de una corriente de agua que entra desde las estaciones oceánicas y que obliga a la haloclina a elongarse. Resulta claro que el núcleo de esta posible corriente está representada en ambas líneas por la isohalina de 33.5, la de menor salinidad. La presencia de este mínimo de salinidad, así como su temperatura (entre 12 y 17°C) sugiere que se trata de la Corriente de California. Esto puede corroborarse mediante dos argumentos con los diagramas T-S de ambas líneas (figura 13). Primero, las estaciones que fueron analizadas para determinar su contenido de metano (líneas en color) y que se encontraron cerca de este núcleo de salinidad mínima (familias de puntos roja y magenta en el diagrama T-S de la línea 127 y la de color magenta en la línea 133), mostraron una forma elongada y cuyo vértice se orientó en dirección al centro del dominio de la masa de Agua Subártica (SAW). Esto quiere decir que se presentó cierta mezcla con Agua Subártica. Y segundo, las familias de puntos en color negro de las líneas 127 y 133 (figura 13), fueron las estaciones más alejadas de la costa a las que no se les analizó su contenido de metano pero que presentaron este núcleo de bajo contenido de sal. En ambas estaciones y a profundidades intermedias, estas presentaron características termohalinas que se sitúan en el centro de la masa de agua subártica.

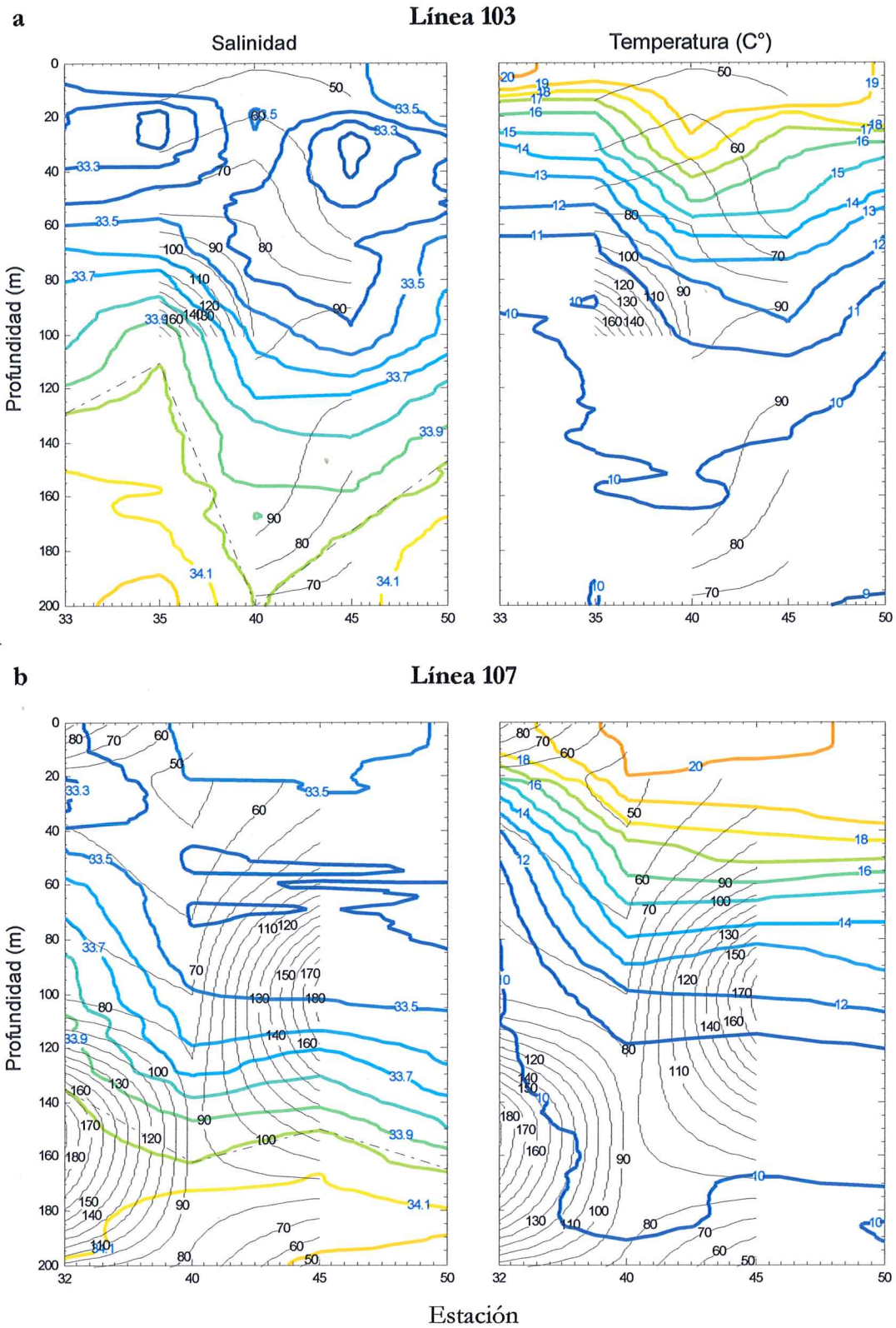
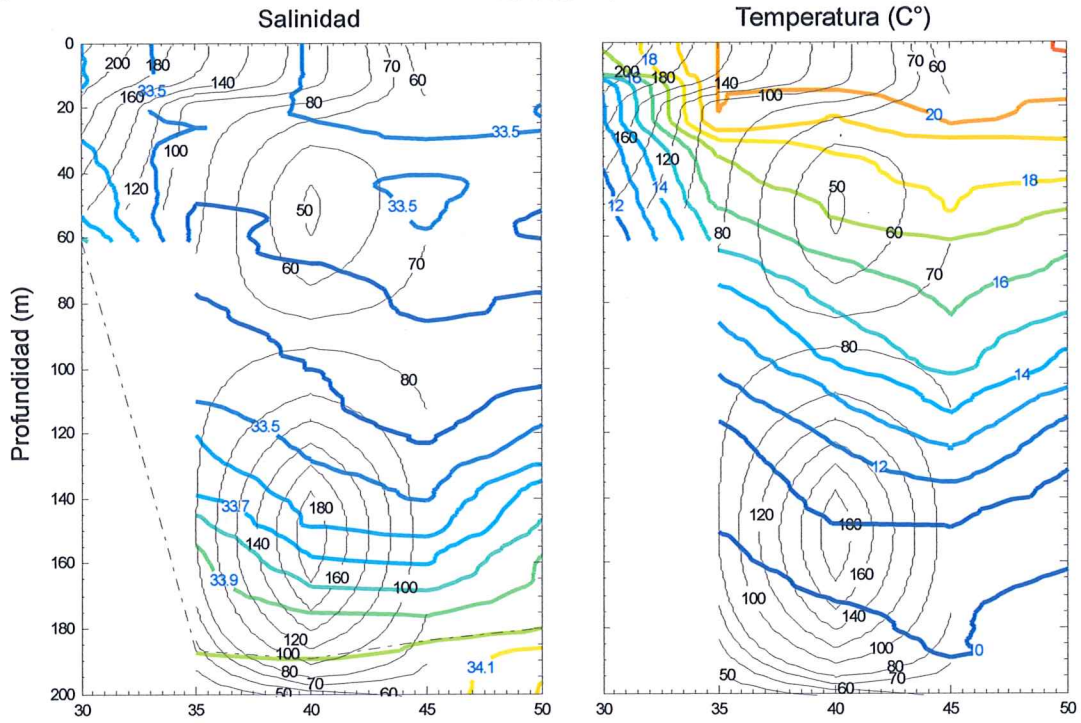


Figura 14. Distribución zonal de la salinidad y temperatura en las líneas de muestreo analizadas durante julio del 2006 (contornos en color) sobrepuestas sobre los contornos de metano (nL/L) (líneas oscuras continuas). Valores de metano que no pudieron ser representados como contornos se muestran mediante estrellas a la profundidad de la muestra. Las líneas punteadas oscuras muestran el límite entre la masa de agua subártica.

c

Línea 113



d

Línea 120

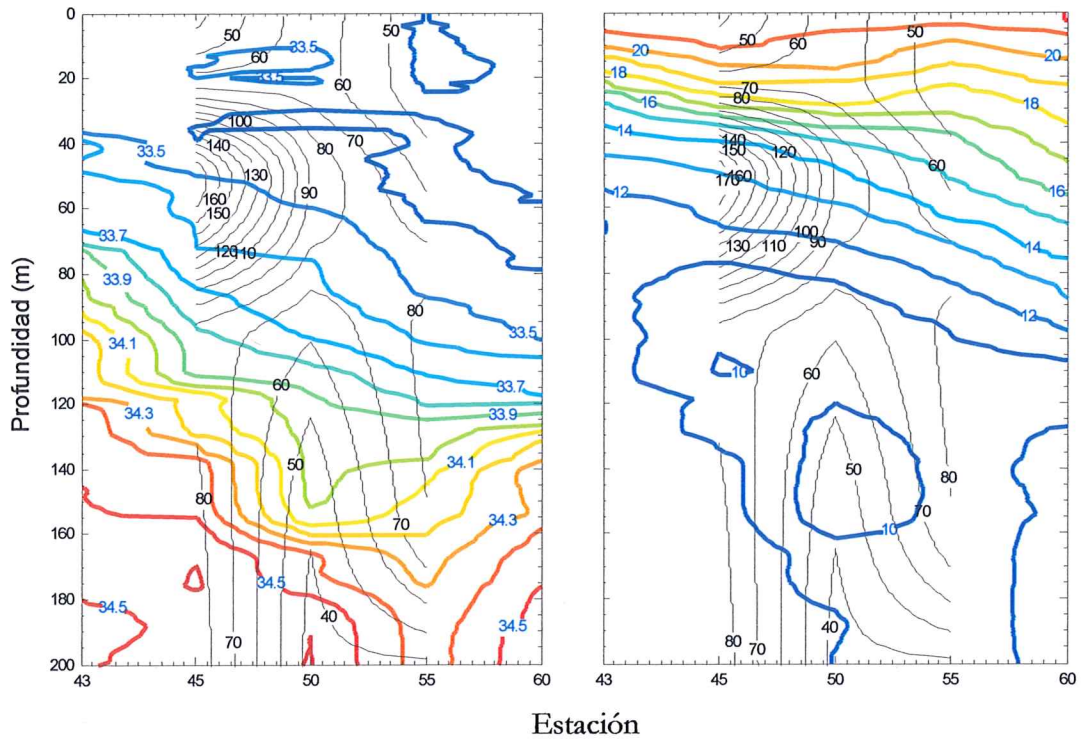
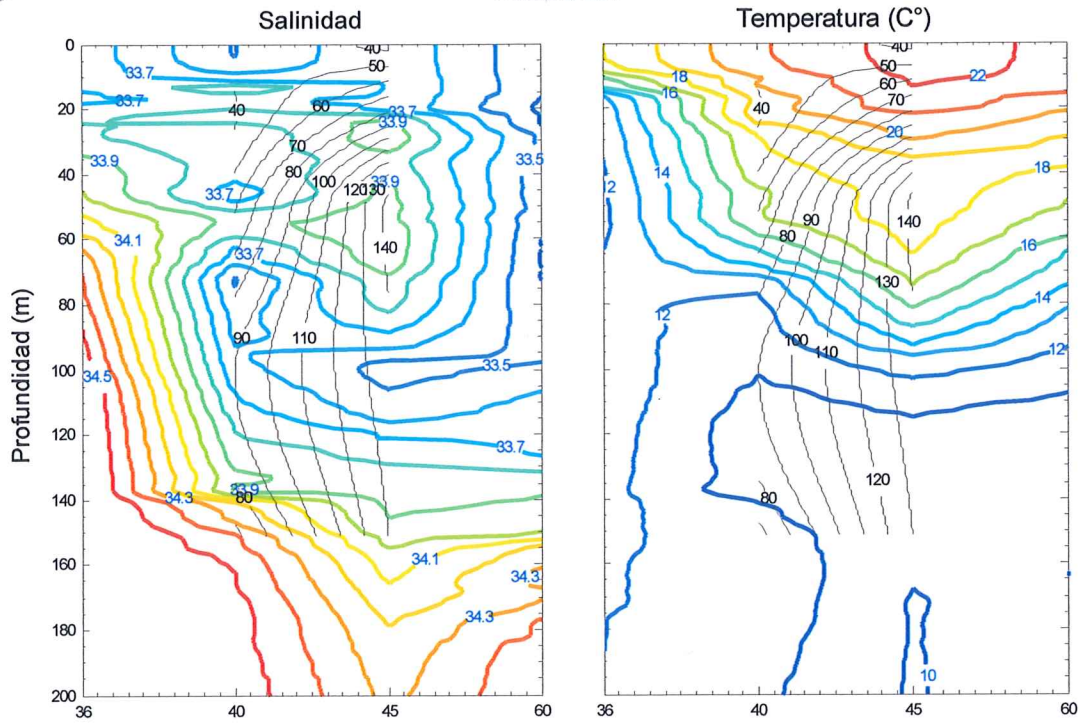


Figura 14. Continuación.

e

Línea 127



f

Línea 133

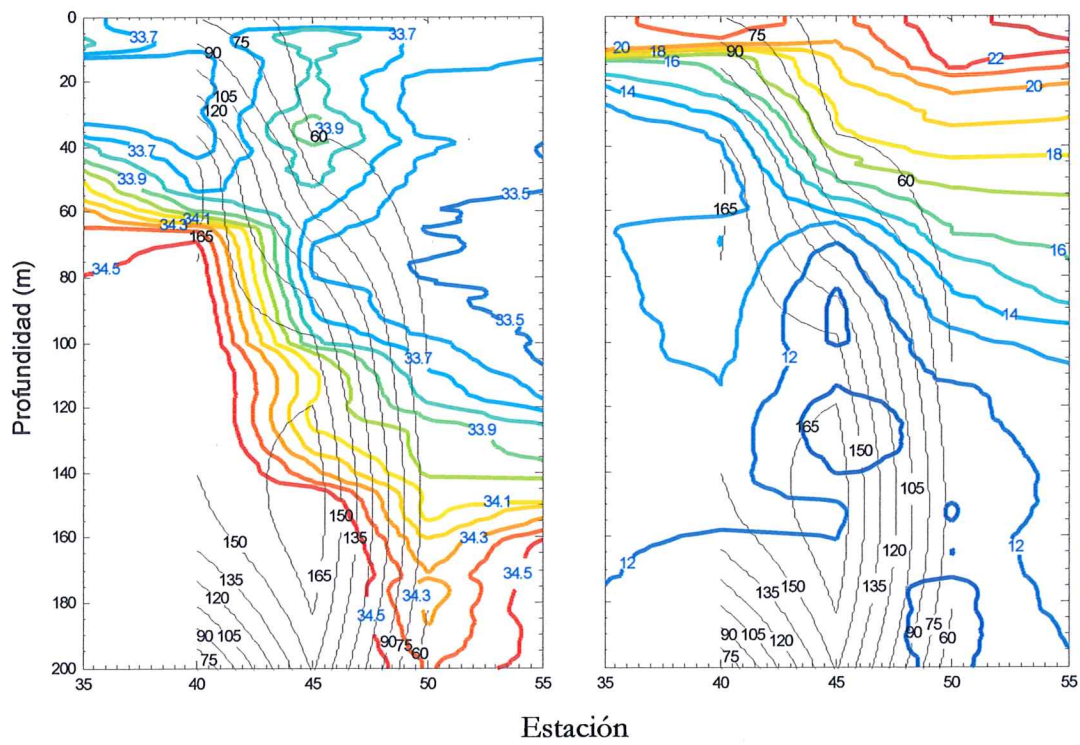


Figura 14. Continuación.

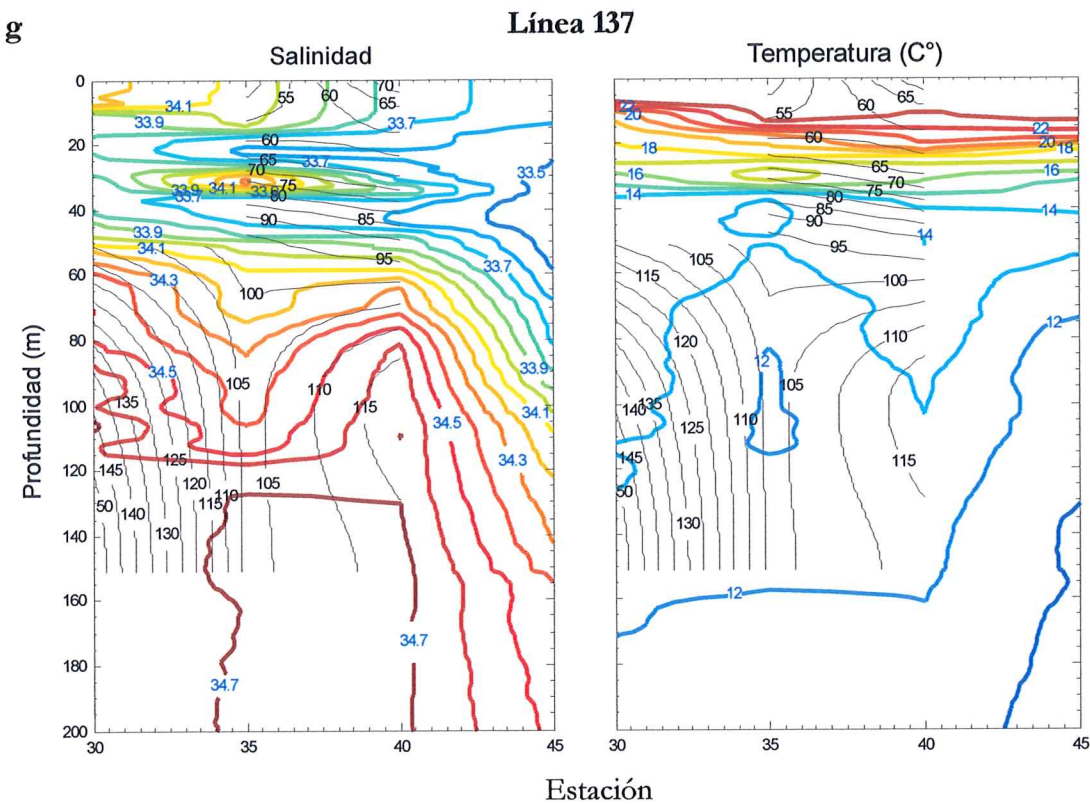


Figura 14. Continuación.

Finalmente las estaciones ubicadas en la línea 137 (figura 14g) muestran condiciones termohalinas peculiares. La termoclina se mostró compacta y virtualmente paralela al fondo, al igual que los contornos de metano generados en aquella zona. La haloclina por su parte, se observó, en las estaciones cercanas e intermedias a la costa, paralela al fondo. Los contornos de metano más allá de la profundidad de la haloclina corren de manera perpendicular al fondo formando un núcleo profundo de alta concentración cercano a la costa (estación 137.30 $z=150$ m) (figura 14g). Al igual que las líneas 127 y 133, la 137 presentó una intrusión de agua poco salada (33.5) desde la estación más oceánica (137.45) a una profundidad entre los 20 y 50 metros, misma que puede ser atribuida a la Corriente de California. Además de esta intrusión de agua poco salada en la línea 137, es posible detectar un núcleo de elevada salinidad (≈ 34.2) entre los 20 y 40 metros de profundidad ubicado en las estaciones 137.30 y -40 (figura 14g). Es este cuerpo de agua el causante del elongamiento del diagrama T-S de la estación 137.35 (familia de puntos magenta) en dirección hacia la masa de Agua Subtropical (StSW) (figura 13).

De forma general, la concentración de metano en superficie fue baja, no sobrepasando, en la mayoría de las ocasiones, los 100 nL/L (figura 15), esto a excepción de lo registrado en la estación 113.30, en la que se observó la concentración más elevada de todo el muestreo (225 nL/L). Este sitio se halló inmerso en una zona influenciada por surgencias, esto a juzgar de la disposición de las isolíneas de temperatura y salinidad (figura 14c). Una generalidad relativamente consistente fue que los sitios con el mayor contenido de metano (>100 nL/L) se hallaron vinculadas frecuentemente a sitios cuya temperatura no sobrepasó los 14°C (figura 14 y 15). Solo se registraron dos excepciones, estas fueron la estación 113.30 z=0, (17°C, 225 nL/L) y la 127.45 z=50 (18.6°C, 142 nL/L) (figura 14c y e) A diferencia de lo registrado en el muestreo pasado, donde pareció existir una relación más clara entre los sitios con alto contenido de metano y su salinidad, durante el periodo de julio fue más clara la relación entre contenido de metano y temperatura.

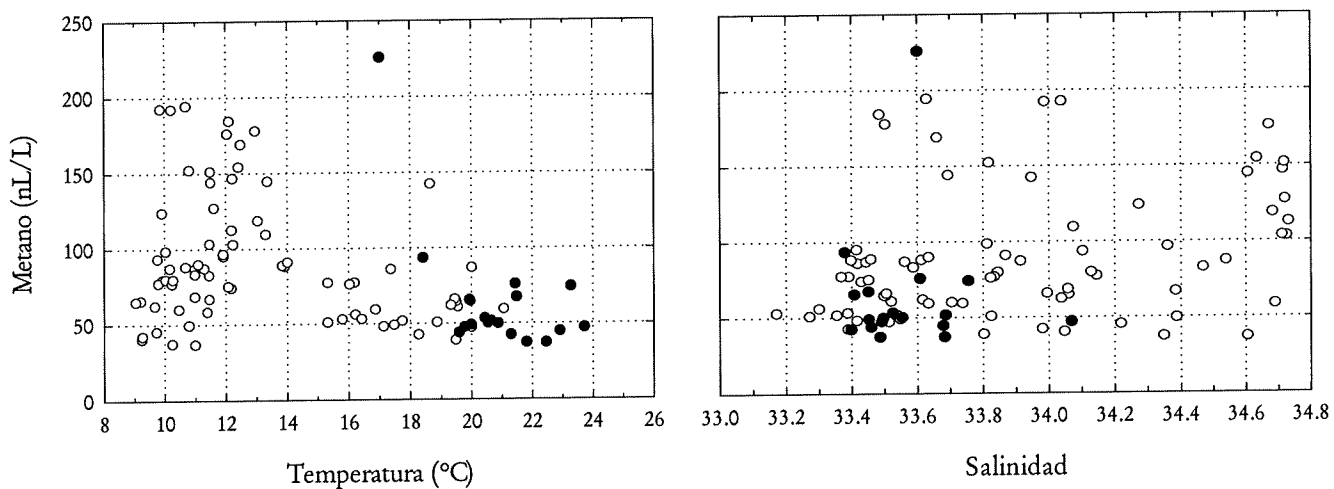


Figura 15. Dispersión de los valores de metano vs. temperatura y metano vs. salinidad para todos los sitios del muestreo IME0607 (julio 2006). Los puntos oscuros corresponden a las estaciones superficiales (0 metros).

Por otra parte, la figura 16 muestra la distribución de metano con respecto a los datos de temperatura y salinidad en un corte meridional del área de estudio (Norte-Sur). En esta figura fue evidente la presencia de núcleos de alto contenido de metano situados a la misma profundidad donde se observaron plegamientos de la termo- y haloclina, similares a los registrados durante el mes de abril. En los paneles correspondientes a las estaciones 35 y

40 fue posible observar altos contenidos de metano asociados a sitios con plegamientos de la haloclina. El núcleo observado en la estación 103.45 $z = 100$ (figura 16d) se encontró a la misma profundidad que la de una flexión de esta capa en dirección a superficie; mientras que el núcleo detectado en la estación 113.40 $z = 150$ (figura 16b) se encontró en una zona donde el plegamiento se dio en dirección al fondo. Continuando con el panel de la estación 40, a partir de la línea 123 (figura 16c), se observó una disminución en la profundidad de la halo- y termoclina. De tal forma que, mientras en la línea 123 la haloclina se halló cercana a los 200 metros, en la línea más sureña (137) esta estuvo cercana a los 60 metros.

En lo que respecta a la estación 45 (figura 16d), se observó al igual que en abril (figura 6d), núcleos de alto contenido de metano centrados en las líneas 107 y 120. De nueva cuenta ambos sitios corresponden con regiones que presentaron plegamiento de la termo- y haloclina en dirección hacia superficie, aunque durante julio fueron menos intensos. El núcleo localizado en la línea 120 a juzgar por el panel de salinidad (figura 16d), parece encontrarse justamente en un frente salino que divide la zona norte (líneas 103-120), cuyos valores de salinidad son inferiores a 33.5 en los primeros 100 metros; y la zona sur (líneas 123-137) con valores entre los 33.7 y 34 (véase la diferencia de coloración de los contornos de salinidad en los primeros 100 metros entre la parte norte y sur).

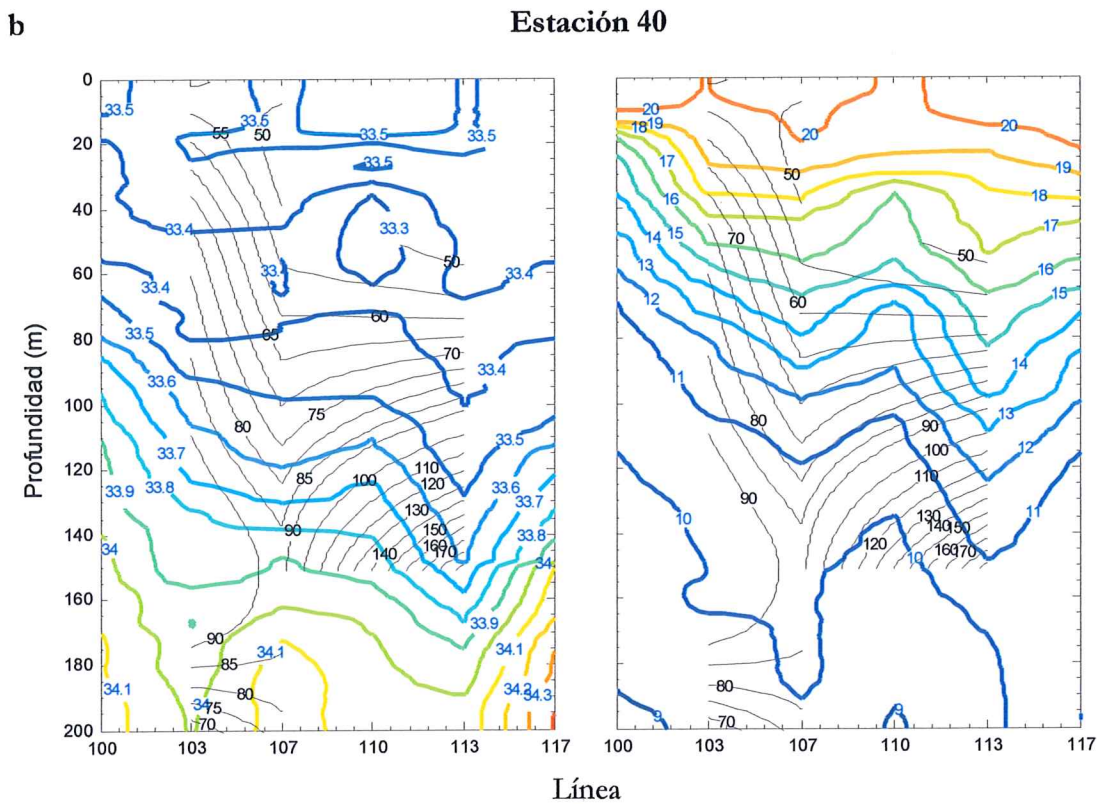
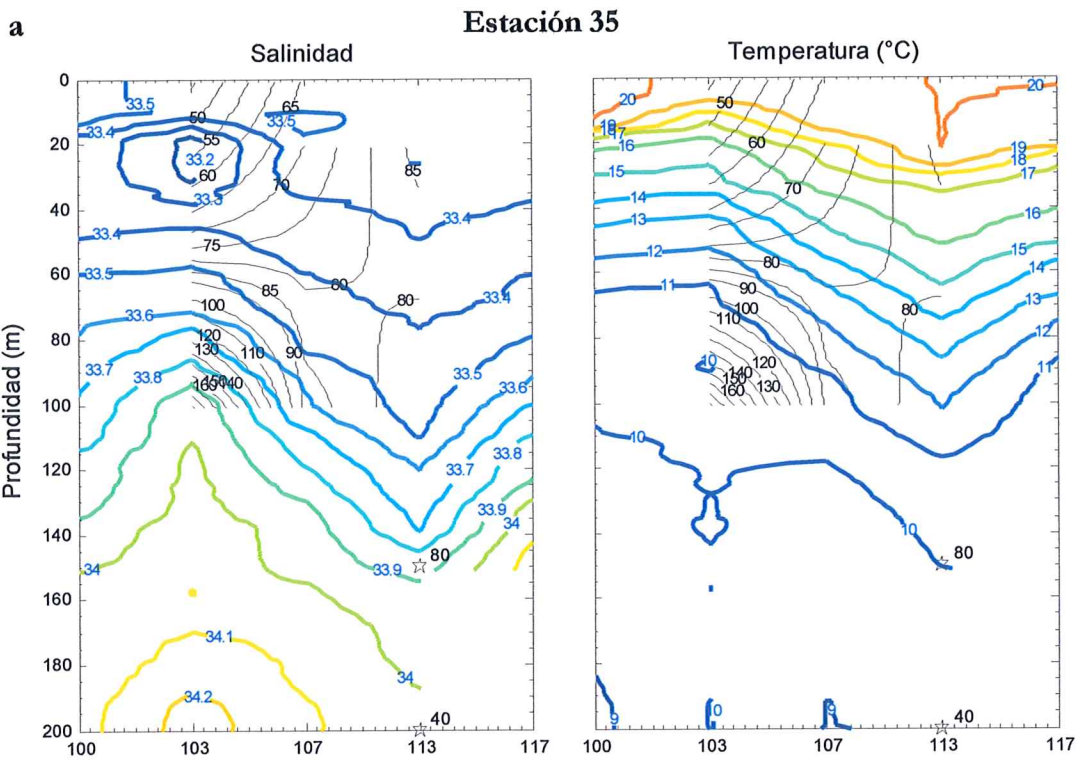


Figura 16. Distribución meridional de la salinidad y temperatura a lo largo de las líneas muestreo (contornos en color) superpuestas sobre los contornos (líneas oscuras continuas) de metano (nL/L).

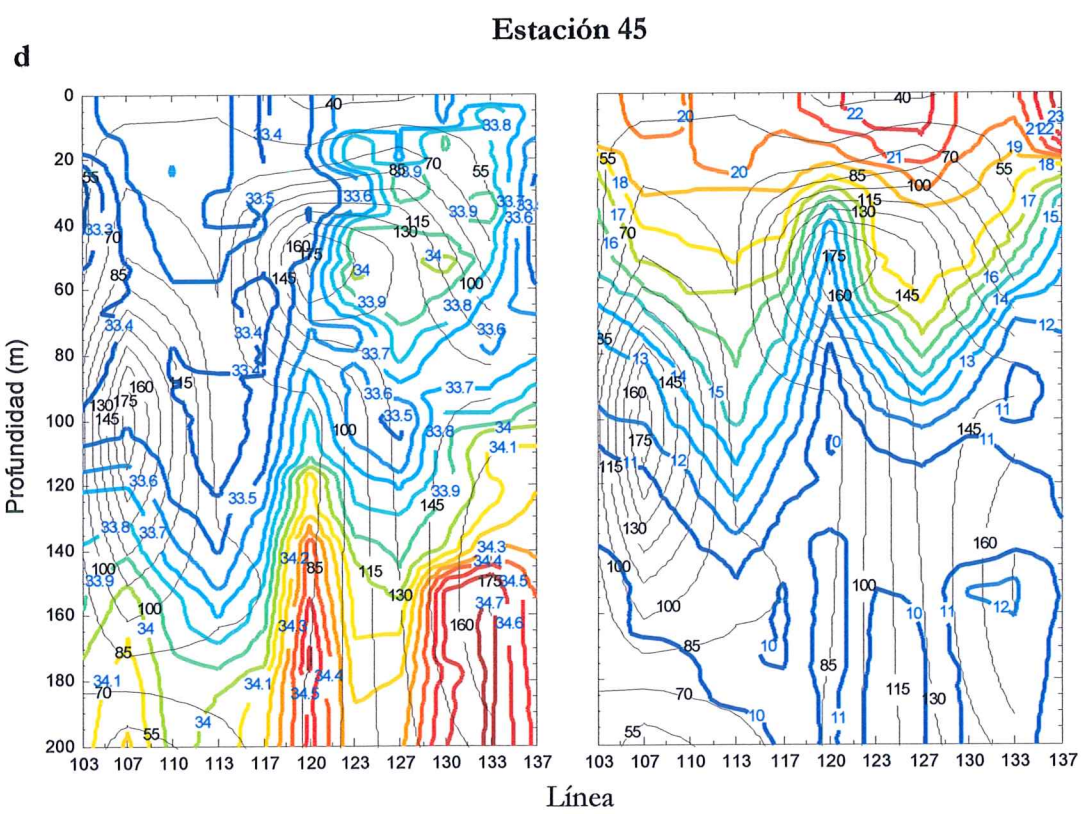
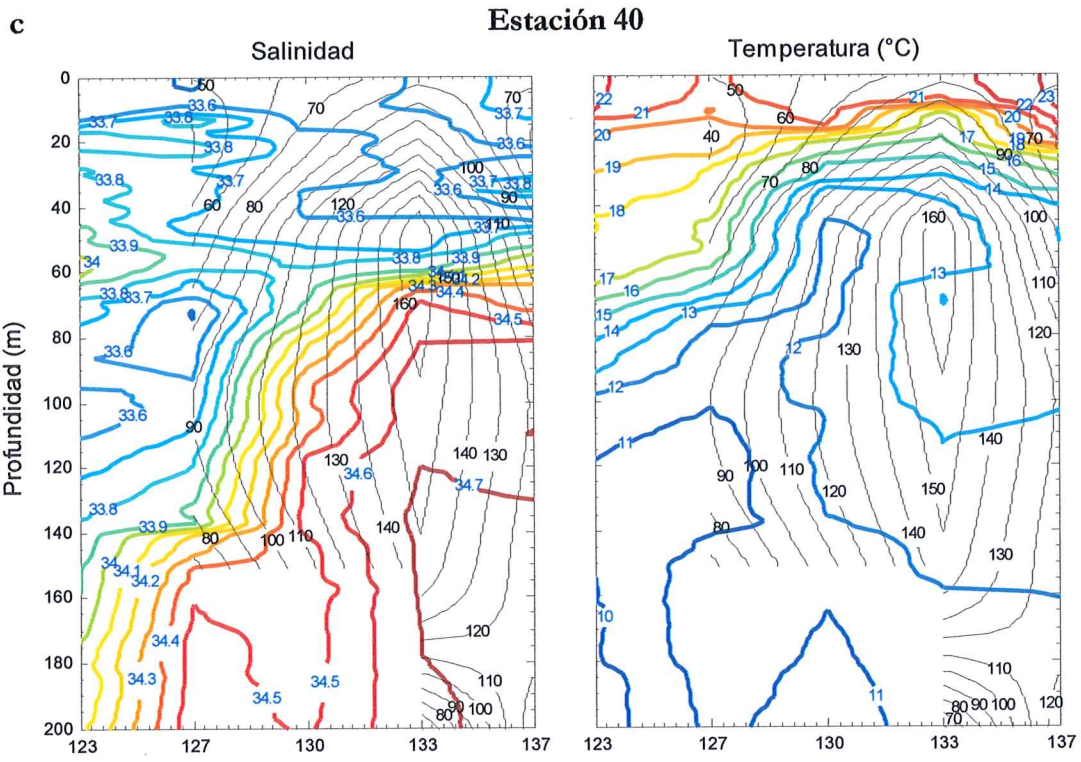


Figura 16. Continuación.

La estadística básica del presente muestreo tabla III muestra que la masa de Agua Subártica Superficial (SAW) presentó, en promedio, menor contenido de metano (82.9 nL/L) que el observado en abril (102.9 nL/L, ver tabla II). Sin embargo, durante el presente muestreo no se registraron valores tan bajos en esta masa de agua como los descritos en abril (9.3 nL/L). En general, durante julio, esta masa de agua no presentó valores tan extremos como los referidos en abril. Por su parte, los contenidos de metano en la masa de Aguas de Transición (TrW) durante julio fueron, en promedio, ligeramente inferiores a los de abril, mostrando para julio concentraciones promedio de 72.2 nL/L. No obstante, aunque los mínimos hallados en ambos muestreos fueron similares, el máximo durante julio fue apreciablemente inferior (192.5 nL/L) al descrito en abril (243.4 nL/L). Finalmente para la masa de Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESsW) se observó en promedio un mayor contenido de metano durante julio (102.9 nL/L) que en abril (78.2 nL/L).

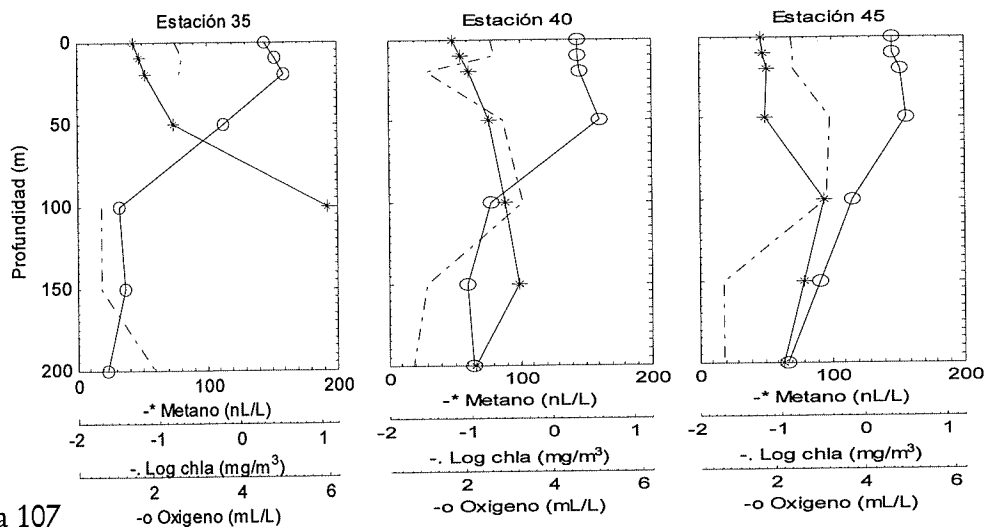
Tabla III. Estadística básica de la concentración de metano (nL/L) según la masa de agua en el muestreo IME 0607. SAW, Agua Subártica Superficial; ESsW, Agua Ecuatorial Subsuperficial; TW, Agua de Transición.

Masa de agua	Promedio	Máximo	Mínimo	Desv. Est.	No. muestras
SAW	82.9	225.9	38.9	43.6	60
TrW	72.2	192.5	37.2	37.0	20
ESsW	102.9	176.0	36.7	42.3	18
General	84.4	225.9	36.7	42.8	98

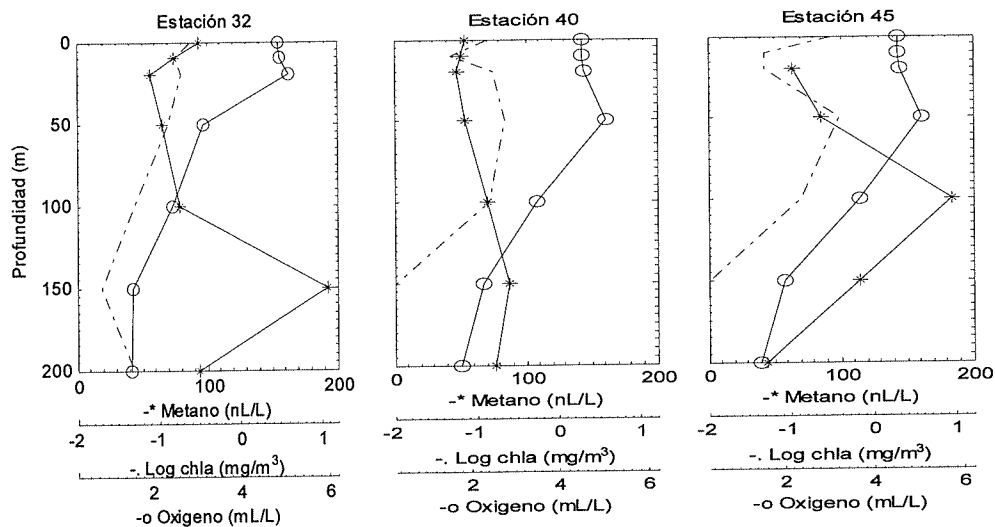
En lo referente a la distribución de metano en el plano vertical figura 17, la curva de este gas mostró generalmente un aumento de concentración desde superficie hasta llegar a un solo máximo, esto a diferencia de lo hallado en abril, en donde algunas estaciones como la 113.40 y 127.40 presentaron dos máximos (figura 7). Otra diferencia entre los perfiles de metano del actual muestreo con los de abril se observa a 20 metros. En julio fue muy frecuente que la concentración de metano a 20 metros fuera superior a la registrada en superficie (la excepción fue la estación 113.30 y 137.40), mientras que durante abril fue observado lo inverso (aunque existieron estaciones que también presentaron esta tendencia).

Al igual que en abril, los perfiles de metano y oxígeno disuelto mostraron una tendencia relativamente clara (figura 17). En la mayoría de los casos se observó un incremento en la concentración de metano desde la superficie hasta los 100 o 150 metros de profundidad asociado a la oxiclina, es decir, a la sección de la columna de agua que presentó un decremento marcado en la concentración de oxígeno. Sin embargo, esto no quiso decir que a bajas concentraciones de oxígeno se hallaran elevados contenidos de metano, pues como se observa en la estación 120.45 (figura 17), a pesar de la disminución de oxígeno con la profundidad hasta valores menores a 0.5 mL/L después de 150 metros, la concentración de metano se mantiene casi constante (≈ 100 nL/L). Una situación similar se registró en la estación 137.40. Los perfiles de oxígeno indican además, la presencia de agua con contenidos extremadamente bajos de este gas en las líneas más sureñas como la 127, 133 y 137. En estos sitios fue común el registro de concentraciones < 0.5 mL/L después de los 150 metros. Las estaciones más cercanas a la costa de las líneas 133 y 137 presentaron incluso, la concentración antes mencionada después de los 100 metros (figura 17).

Línea 103



Línea 107



Línea 113

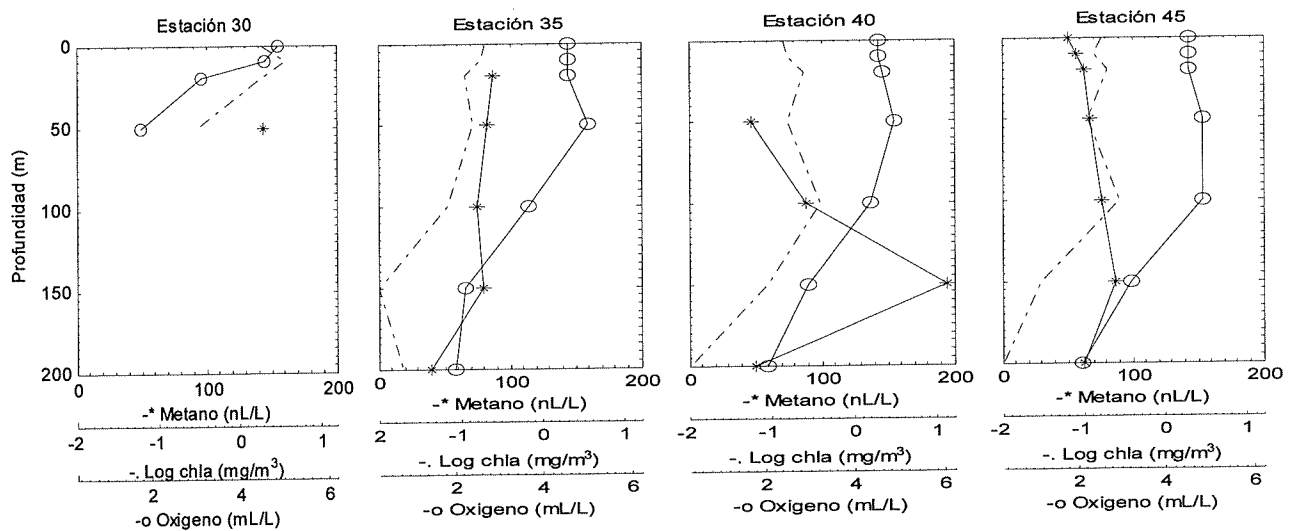
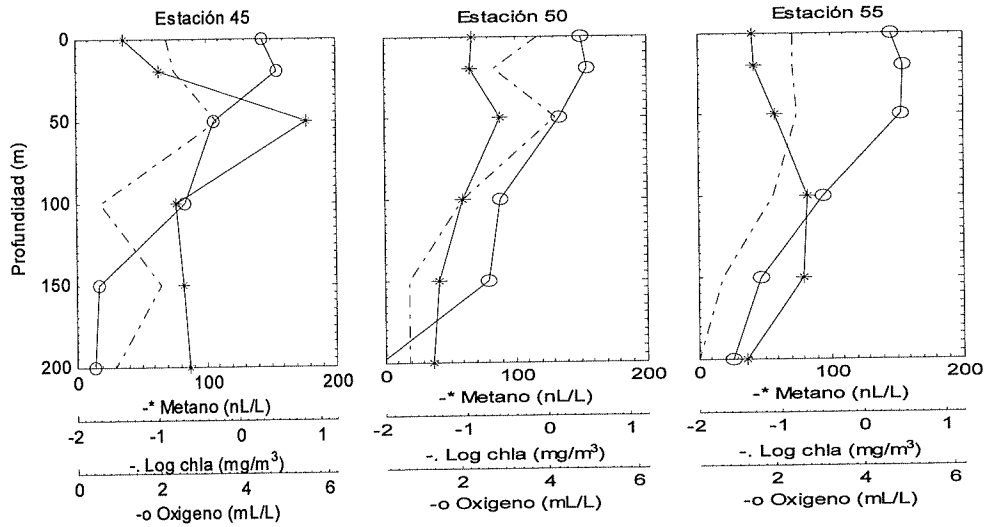
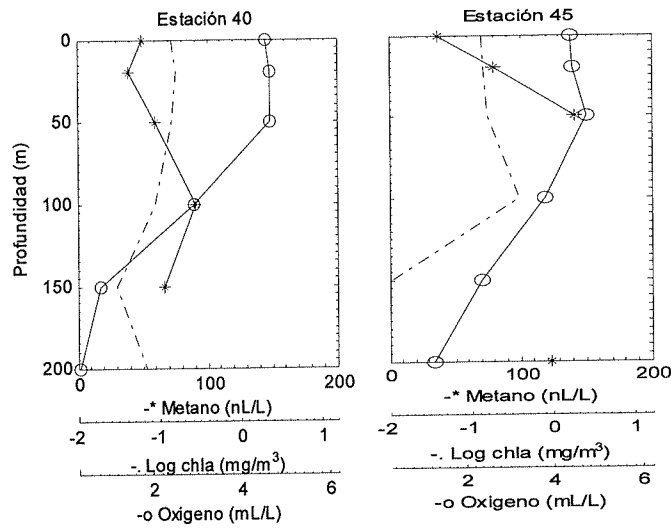


Figura 17. Perfiles verticales de clorofila (-.-), oxígeno (-o), y metano (-*) en las estaciones del muestreo IME 0607 (julio 2006).

Línea 120



Línea 127



Línea 133

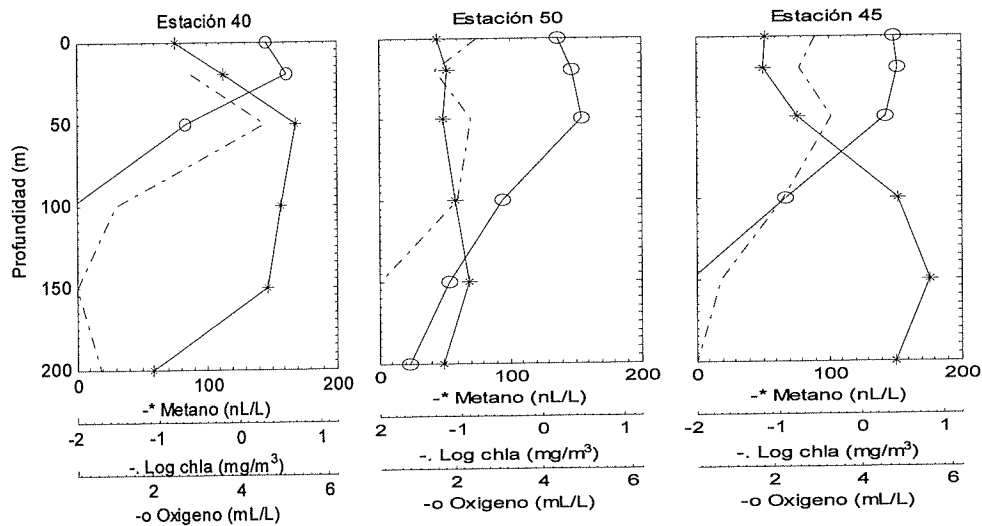


Figura 17. Continuación.

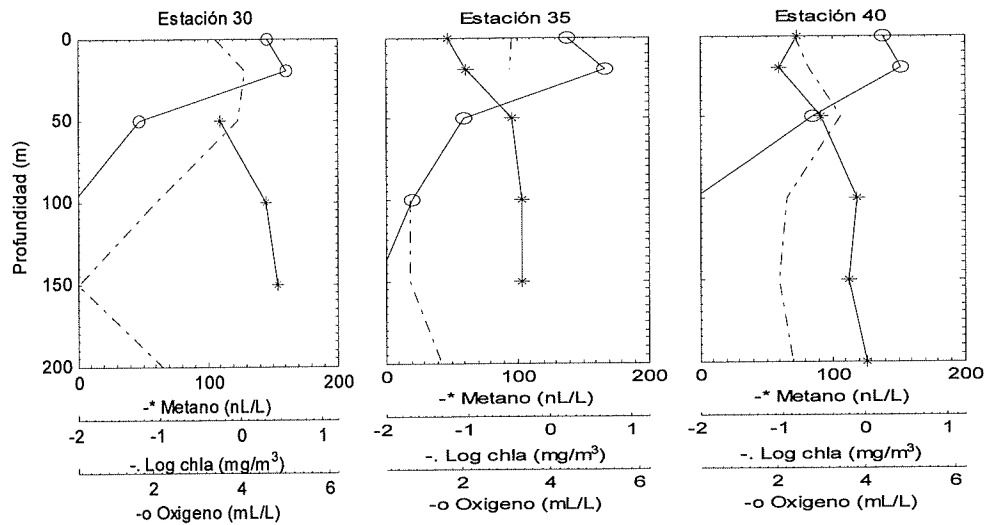


Figura 17. Continuación.

Los perfiles verticales de la concentración de clorofila y los de metano no mostraron tendencia concreta (figura 17). En algunas estaciones como la 103.40, 107.45, 113.40, entre otras, el máximo de metano se halló por debajo del de clorofila; mientras que en otros sitios (103.45, 120.45 y -50 y 133.40), ambos se hallaron a la misma profundidad. Por otra parte, algunas estaciones presentaron el máximo de metano en el sitio donde se registró el mínimo de clorofila (107.32, 113.35 y 133.50). Debido a la poca relación observada entre el contenido de metano-clorofila y metano-oxígeno, los gráficos de dispersión de estas variables para el presente muestreo fueron excluidos del escrito. Lo mismo ocurrió con la distribución del metano en estaciones costeras y oceánicas ubicadas en líneas norteñas y sureñas.

7.3.3. Factor de saturación y flujos de metano océano-atmósfera.

En lo que respecta al factor de saturación y los flujos de metano océano-atmósfera registrados durante julio, la baja concentración de metano en aguas superficiales llevó a mostrar factores de saturación menores a los observados durante abril (figura 18a). Durante el presente muestreo el factor de saturación máximo fue hallado en la estación 113.30 con un valor de 4.25, esto a diferencia de lo encontrado en abril, cuyo máximo fue del orden de 10 y el cual se situó en la estación 120.30. Desafortunadamente durante julio no se analizó esta última estación ni otros sitios que presentaron los factores de saturación y flujos de

metano máximos durante abril (120.35, -39 y la línea 123), con lo que hubiera podido hacerse una comparación entre ambas temporadas. La única estación que presentó un factor y flujo de metano considerable durante abril, y que también fue analizada en julio fue la 107.40. En este sitio, los cambios en el factor de saturación observados entre muestreos fueron importantes. Mientras en abril se determinó un factor de aproximadamente 6 (figura 11a), en julio estuvo entre de 1 y 1.25 (figura 18a). Los sitios que presentaron subsaturación en el contenido de metano con respecto al esperado en el equilibrio (factores <1), resultaron ser las estaciones oceánicas de las líneas 107, 113, 127 y 133 (figura 18a). Esto último fue concordante con las observaciones de abril, donde la mayoría de las estaciones oceánicas mostraron valores de saturación de cercanas a 1 (figura 11a). Durante julio, el área oceánica comprendida entre las líneas 127 y 133, la zona más amplia donde el factor de saturación no supero el valor de 1, es el mismo sitio donde se registró una intrusión de aguas cálidas de transición observada en el campo de temperatura (figura 12), y densidad (Anexo IV).

Durante julio los flujos de metano hacia la atmósfera fueron pequeños comparado con los estimados en abril (comparar figura 11b con figura 18b). El flujo máximo observado durante el presente muestreo fue de $3 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$ (estación 113.30) mientras en abril fue posible observar flujos de 10, 15 o hasta $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$. Sin embargo, aunque a simple vista los flujos de metano durante julio fueron bajos, no se observaron valores tan negativos (flujos en dirección al océano) como los registrados en abril. En julio los valores más bajos estuvieron cercanos a $-1.5 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$ (zona intermedia de la línea 127, lugar donde se presentó la mencionada intrusión de agua caliente), mientras que durante abril se observaron valores de hasta $-2 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$ en zonas aledañas a las líneas 127 y 130, entre otras zonas (figuras 11b). Como consecuencia de las bajas concentraciones de metano observadas en superficie durante julio, los flujos de ese gas con dirección hacia la atmósfera fueron escasos y en muchos sitios cercanos a cero figura flujos 18b. Sin embargo, es importante destacar las limitantes de interpolación de esta figura pues no fue posible analizar líneas de muestreo intermedias como la 110, 117, 123 y 130 (ver tabla I).

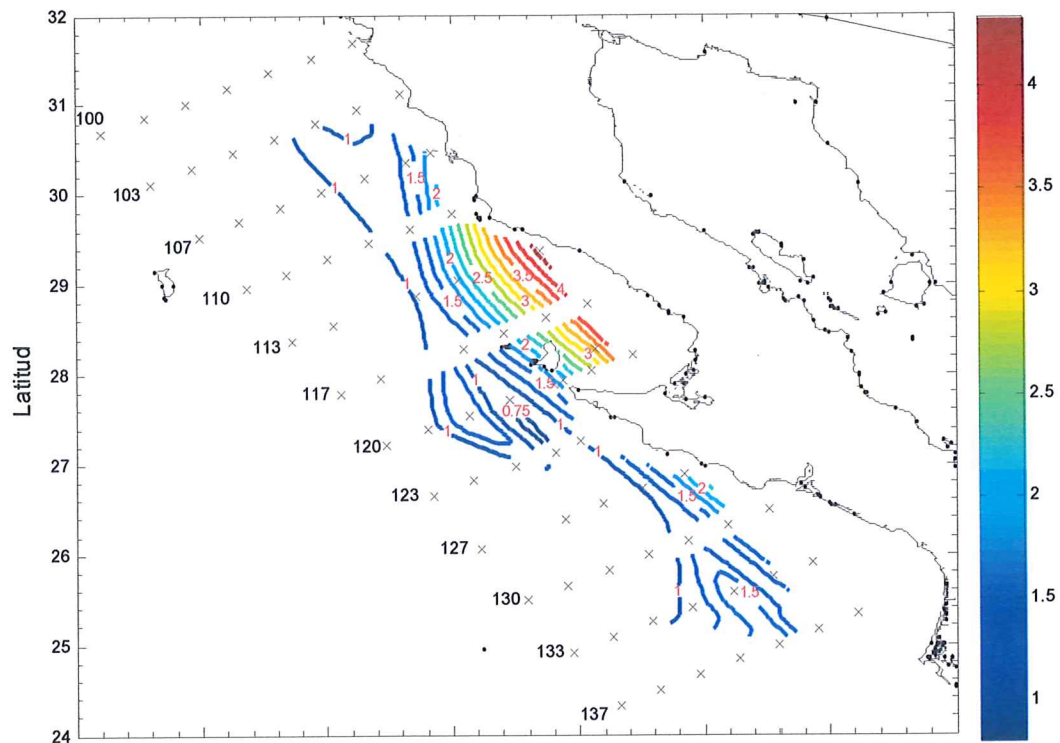
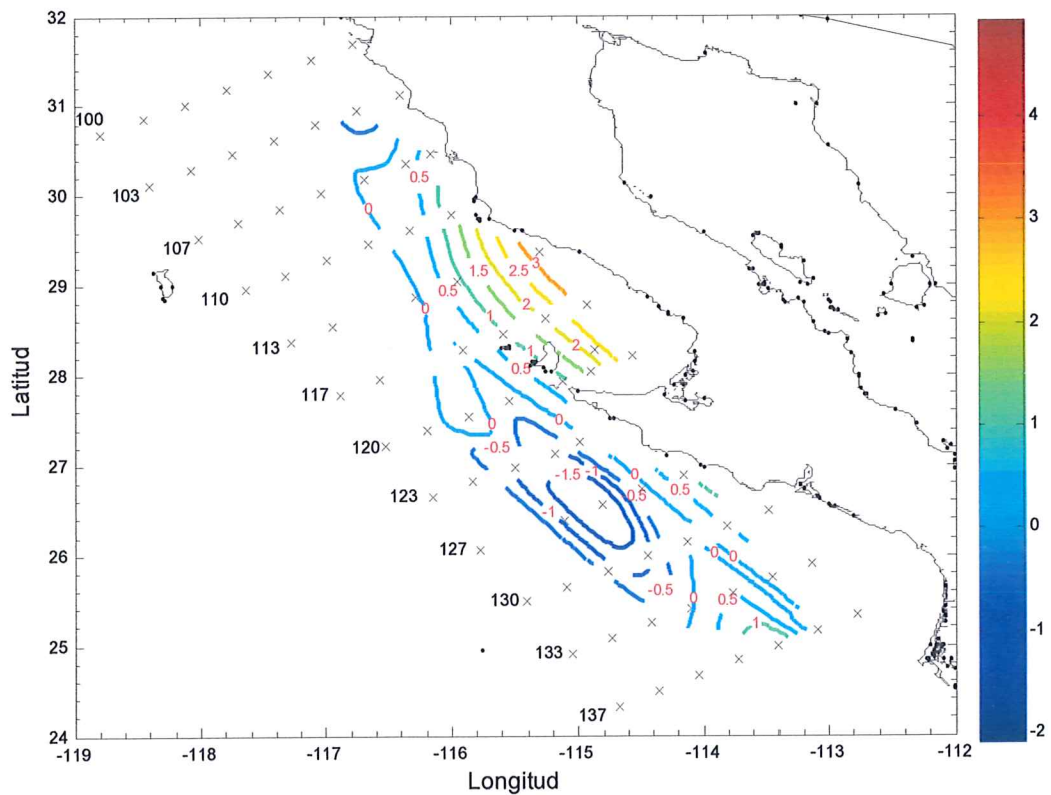
a**b**

Figura 18. (a), Factor de saturación del metano respecto al equilibrio atmosférico; y (b), flujos de metano océano-atmósfera ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$) estimados durante julio del 2006. Factores de saturación >1 indican sobresaturación. Valores positivos en b indican flujos en dirección a la atmósfera; negativos hacia el océano. Los valores de la barra de colores de esta imagen no corresponden con los de la figura 11.

8. DISCUSIÓN.

Antes de discutir acerca de la distribución de metano es necesario conocer cuáles fueron las condiciones hidrográficas de la región para ubicar el contexto en el que se llevaron a cabo los muestreos. La zona de estudio está sujeta a variaciones estacionales e interanuales que tienen como efecto cambios importantes no solo en las propiedades físicas de la columna de agua, sino también en los sistemas biológicos como la distribución y abundancia del fito- y zooplancton (Roemmich, 1989; Lavaniegos *et al.*, 2003; Hernández de la Torre *et al.*, 2004; Durazo *et al.*, 2005; entre otros). De la misma forma, estas perturbaciones biológicas podrían incluir la metanogénesis y/o la oxidación de metano, principales procesos moderadores de este gas en aguas superficiales. Una forma de tratar de reconocer el estado del sistema es comparar las condiciones hidrográficas observadas con las medias climatológicas para esos periodos de tiempo. A continuación se describe dicha comparación para el periodo de abril del 2006 (IME0604)

8.1. MUESTREO IME0604 (abril 2006).

8.1.1. Hidrografía.

La comparación de las características hidrográficas superficiales durante abril del 2006 con la climatología determinada por Ramírez-Manguilar, (2005) para la región IMECOCAL muestra ligeras diferencias en el área comprendida entre las líneas 100 (frente a Ensenada) y 120 (Bahía Vizcaíno). Durante esta temporada se observaron, en regiones cercanas a la costa, temperaturas superficiales cercanas a los 12°C (figura 3) a diferencia de las mostradas por Ramírez-Manguilar, (1995) donde se estimó que la temperatura más baja en la red de muestreo fue en promedio 14 °C. En cuanto a la salinidad, en abril del 2006 se encontró que este parámetro en estaciones cercanas a la costa supero los 33.7 mientras la media climatológica para este periodo muestra valores entre 33.5 y 33.6. Por otra parte, las estaciones sureñas de la red de muestreo (120-133) no mostraron desviaciones importantes con los datos climatológicos.

A 10 metros de profundidad se observaron las mismas tendencias que en superficie (figura 3b). La comparación de la hidrografía en la red de muestreo IMECOCAL durante 2002-2003 en el trabajo de Goericke *et al.*, (2005) con el presente trabajo, muestra la presencia de agua más salada y fría cerca de la costa en abril del 2006. El trabajo de estos investigadores también ha sido utilizado como marco de referencia de las condiciones *normales* de la Corriente de California por autores como Jerónimo y Gómez-Valdéz, (2007). Resulta claro que durante este periodo, la salinidad de las estaciones alejadas de la costa (40-60) fue un poco más alta (aprox. 33.4) (ver figura 21 de Goericke *et al.*, 2005). En el mismo sentido, la comparación de datos de clorofila entre abril del 2006 con los de estos investigadores muestran diferencias importantes. A 10 metros la concentración máxima de clorofila en el presente muestreo (IME0604) rebaso los 12 mg/m³ en la estación 119.33 (figura 3b). En contraste, durante el muestreo de 2002-2003 los contenidos máximos de clorofila no superaron los 6 mg/m³ (ver figura 22 de Goericke *et al.*, 2005). El trabajo de estos investigadores fue utilizado como marco de referencia de las condiciones hidrográficas promedio a 10 metros debido a que, entre las conclusiones de este estudio se destaca que durante su periodo de muestreo (2002-2003), se presentaron condiciones casi normales en las características de la Corriente de California.

Con esta información de las características hidrográficas en superficie y 10 metros de profundidad podemos sugerir que durante abril del 2006 se presentaron afloramientos de agua más intensos de lo normal que llevaron agua más fría, salada y probablemente con mayor contenido de nutrientes a superficie, mismo que a su vez dio paso a concentraciones de clorofila más elevadas. La presencia de isotermas paralelas a la costa en esta temporada es una clara señal del intenso flujo de la Corriente de California hacia el sur (Goericke *et al.*, 2005), típico de esta temporada (Sverdrup *et al.*, 1942; Reid *et al.*, 1958; Lynn y Simpson, 1987; Durazo y Baumgartner, 2002).

Una característica repetitiva en la hidrografía de la zona durante este muestreo fue la presencia de la termoclina a profundidades menores que la haloclina. La picnoclina a su vez, se ubico a una profundidad similar a la de la termoclina (datos no mostrados). Esto coincide con lo expuesto por Gómez-Valdez, (1983) pues indica que, debido a que los cambios en salinidad resultan pequeños en comparación con los de temperatura, el campo de densidad

presenta mejor relación con esta última. Así mismo, la disposición de las isolíneas de temperatura y salinidad durante abril de 2006 mostró que conforme estas se alejan de la costa se hunden, esto, en acuerdo con Gómez-Valdez, (1983).

8.1.2. Distribución del metano disuelto.

Como se observó en la figura 4, la masa de agua dominante en este estudio fue el Agua Subártica (SAW), seguida por la masa de Agua de Transición (TrW). Son pocas las muestras que se encontraron en el dominio del agua Ecuatorial Subsuperficial (ESsW) y por tal motivo, resulta evidente que la mayor parte de la información generada en este trabajo sea concerniente a la masa de Agua Subártica.

La manera en que se registraron los contenidos de metano en estaciones costeras y oceánicas dependiendo si estas se encontraron en líneas norteñas o sureñas (figura 10) mostró claramente que los máximos valores de metano se encontraron confinados en aguas costeras sugiriendo con esto, que probablemente variables como la cantidad de material particulado y/o cantidad de materia orgánica, cuyos valores suelen ser contrastantes entre ambientes costeros y oceánicos, jugaron un papel determinante en la presencia de estos máximos. Así mismo, la figura 10 muestra que en general, los contenidos de metano en las estaciones norteñas (tanto costeras como oceánicas) fueron relativamente homogéneos (figura 10a), en comparación con los encontrados en las estaciones sureñas (figura 10b). La presencia de concentraciones de metano más variables en las estaciones sureñas podría sugerir la existencia de procesos físicos, químicos y biológicos más diversos en aquellos sitios sureños, esto probablemente debido al debilitamiento y/o mayor interacción de la Corriente de California con aguas de características distintas. Es bien conocido el paulatino debilitamiento de la Corriente de California, así como su mayor interacción con otras corrientes, conforme ésta se mueve hacia el sur (Reid, 1958).

La distribución de metano durante abril, mostró también la presencia de núcleos de alto contenido de metano situados a la profundidad de la termoclina. Esto resulta evidente en la figura 5 y 6 donde se encuentra esquematizada el área de estudio mediante cortes zonales, es decir, Este-Oeste (figura 5) y meridionales, o sea Norte-Sur (figura 6). La

ubicación de los máximos de metano a esta profundidad y la presencia de la pycnoclina a esta misma, sugiere la existencia de alguna relación entre el contenido de metano y la zona de cambios drásticos en temperatura y/o densidad, material particulado, nutrientes disueltos, etc. propios de la pycnoclina; aunque esta última, no asociada a cambios drásticos en salinidad pues los máximos de metano solo en una ocasión estuvieron asociados visiblemente a la haloclina (ver figura 6d línea 120). Aunque la relación entre la pycnoclina y los máximos subsuperficiales de metano ha sido mencionada frecuentemente (Scranton y Brewer, 1977; Brooks, 1979; Burke *et al.*, 1983 y referencias ahí, Ward, 1992; Holmes, 2000, entre otros), las investigaciones no han mostrado resultados concluyentes acerca de cuál es la característica de ésta que promueve la acumulación de grandes cantidades de metano.

Los sitios donde se hallaron las mayores cantidades de este gas durante abril fueron la estación 120.30 $z=0$, 120.39 $z=20$ y 107.40 $z=50$, donde se registraron valores de 535, 498 y 491 nL/L respectivamente (figura 7). Refiriéndonos al primero de estos sitios, las estaciones costeras de la línea 107 (frente a bahía San Quintín) junto con otras como la 103 (Punta Colnet), y la 113 (Punta Canoas) son considerados centros de afloramientos de aguas profundas (Goericke *et al.*, 2005). Esto último pudo constatarse plenamente con el plegamiento de isóneas de temperatura y salinidad hacia la superficie en las estaciones más cercanas a la costa (figura 5). Ninguno de estos sitios de máxima concentración de metano se halló asociado a las zonas con los mayores contenidos de clorofila (ver figura 3). Todas las zonas con altos contenidos de este gas se localizaron donde la concentración de clorofila a 10 metros fue entre 1 y 4 mg/m^3 , es decir, concentraciones intermedias (figura 8). Concentraciones de clorofila por encima de los 5 mg/m^3 mostraron contenidos de metano menores a 200 nL/L (concentraciones intermedias-bajas).

En cuanto a los flujos de metano océano-atmósfera durante abril, destaca la presencia de flujos positivos (hacia la atmósfera) máximos en estaciones como la 120.30, 107.40 y 123.45 (figura 11b). Si tratásemos de buscar similitudes o diferencias entre estos sitios encontraríamos que la concentración de clorofila superficial varió entre los 0.25 y 4 mg/m^3 , es decir, presentaron concentraciones de bajas a intermedias y que no se encontraron en las zonas que presentaron las máximas concentraciones de clorofila. En contraparte, las estaciones con flujos de metano negativos más intensos (en dirección al

océano) fueron la 113.45 y la 127.35 y -40, todas ellas ubicadas en zonas con bajo contenido de clorofila (0.25-1 mg/m³).

El panorama general de las observaciones entre concentración de metano y clorofila, es que ni los máximos contenidos de metano subsuperficiales ni los mayores flujos de metano hacia la atmósfera se ubicaron en las zonas con el mayor contenido de clorofila. Es pertinente mencionar que numerosos autores han considerado que el fitoplancton, de manera directa o indirecta, pudiera ser responsable de la producción de metano en las capas superficiales del océano (Burke *et al.*, 1983; Conrad y Seiler, 1988; De Angelis y Lee, 1994; Berner *et al.*, 2003; entre otros). He incluso Scranton y Brewer, (1977) han probado que ciertas especies de fitoplancton producen cantidades pequeñas de metano en cultivos axénicos. Otros más (Scranton y Brewer, 1977; Sieburth, 1987; De Angelis y Lee, 1994) han mostrado que ciertos desechos metabólicos del fitoplancton son substrato utilizable por bacterias metanogénicas. Sin embargo, no siempre ha sido consistente la relación entre el contenido de metano y el de clorofila. Un ejemplo de la ambigüedad de la relación clorofila-metano se muestra en el trabajo de Conrad y Seiler (1988). Ellos midieron el contenido de este gas a lo largo de un transecto que abarcó desde los 50° N hasta los 35° S en el océano Atlántico, cubriendo las costas de Senegal y Mauritania, mismas que son extremadamente productivas debido a que presentan corrientes de frontera *Este*, al igual que las costas de Baja California. Encontraron que en plano horizontal (latitud-longitud) la concentración de clorofila se relacionó directamente con la concentración de metano, sin embargo, en el plano vertical (profundidad) no hubo tal. Los perfiles verticales de metano disponibles en la publicación muestran similitudes a los contruidos en este trabajo: ligeros gradientes negativos entre la superficie y los 20 metros de profundidad y la presencia de un máximo de metano asociado a la termoclina y frecuentemente por debajo del de clorofila.

En el presente trabajo el contenido de clorofila no se relacionó claramente a los de metano, ni en el plano vertical (figura 7) ni en el horizontal (comparar el panel de clorofila en la figura 3 y la figura 11a). Otros estudios como los de Burke *et al* (1983) y Holmes *et al* (2000) tampoco encontraron relación entre estos parámetros. Incluso, autores como Cline *et al* (1986) observaron que las variaciones estacionales en los contenidos de metano estuvieron relacionados inversamente con la magnitud de la producción primaria, pues

registraron los contenidos mínimos de metano en la temporada de máxima productividad. Pudiera ser posible que, la máxima producción de metano se esté dando en los sitios con mayor presencia de fitoplancton pero que además, los procesos de remoción de este gas sean más intensos en esta zona que aquellos llevados en regiones con menor abundancia de fitoplancton. Es decir, se este produciendo gran cantidad del gas pero también se esté oxidando.

Otro aspecto interesante a considerar del porqué los máximos contenidos de metano no se encontraron asociados a los máximos de clorofila, podría ser la generación de algún factor nocivo para la metanogénesis. Si diéramos por hecho que el metano observado en la columna de agua en este trabajo fuera generado por bacterias metanogénicas, como lo han propuesto algunos autores para otros estudios (Oremland; 1979, Burke *et al.*, 1983; Sieburth, 1987; Holmes *et al.*, 2000), podría pensarse que una excesiva concentración de fitoplancton podría dar lugar a la generación de algún metabolito dañino para estas bacterias. Ejemplo de ello podría ser el mismo oxígeno, pues se sabe que las bacterias metanogénicas son anaerobias y no pueden llevar a cabo la síntesis de metano en presencia de oxígeno (Marty, 1993). Durante el presente muestreo los sitios con mayor contenido de clorofila estuvieron consistentemente asociados a las concentraciones más elevadas de oxígeno (figura 3a y b). Hasta el momento no se ha acotado cuál es la verdadera relación entre el contenido de clorofila y metano en aquellos trabajos que han mostrado su presencia. Si existiera una relación directa entre el proceso de fotosíntesis como tal y el metano, es decir, que existiera relación directa entre el metabolismo del fitoplancton y la concentración de metano, la cuál podría traducirse en una relación entre concentración de oxígeno (desecho fotosintético) y metano; sería evidente encontrar variaciones diurnas en la concentración de este último. Sin embargo, estudios como los de Conrad y Seiler (1988) llevados a cabo en el Atlántico; Ward (1992) en las costas centrales de California y los de Holmes *et al* (2000) en el Pacífico *Este Tropical*, han sido incapaces de mostrar dichas variaciones. En este trabajo tampoco se observó una relación consistente entre los máximos de metano y el horario en que fue colectada la muestra (datos no presentados).

Autores como Conrad y Seiler (1988) y Oudot *et al.* (2002) han realizado análisis de la distribución de metano en las costas africanas, zonas con la dominancia de corrientes de

frontera Este, similares a la Corriente de California, y han observado relación entre el contenido de metano en superficie y la cantidad de clorofila de las muestras, situación no registrada en el presente estudio. Es factible pensar que una posible explicación a estas diferencias sea la manera distinta en que se distribuye el oxígeno en el sistema de la Corriente de California comparado con otras corrientes de este tipo. Se sabe que en sitios con eventos intensos de surgencias la materia orgánica llega a ser tan abundante y el contenido de oxígeno tan bajo que pueden darse condiciones suboxicas o anoxicas, entorno óptimo para la síntesis de metano por parte de bacterias metanogénicas. Sin embargo, aunque la mayoría de los sistemas de corrientes de *frontera Este* presentan estas condiciones de baja concentración de oxígeno, que incluso pueden alcanzar solo el 36% de la saturación del oxígeno en el agua (costas peruanas), o hasta 6% en costas africanas, el sistema de la Corriente de California es una de las excepciones (Posner, 1957; Hart y Currie, 1960; ambas en Wooster y Reid, 1960). Esto último fue consistente con lo hallado durante este trabajo en superficie, donde se registró elevada concentración de oxígeno en zonas donde el contenido de clorofila fue mayor (figura 3). Sería factible pensar que las elevadas concentraciones de oxígeno superficiales asociadas a los sitios con máximos de clorofila durante este trabajo fueron las que impidieron que se diera la relación metano-clorofila registrada por otros autores en sistemas de corrientes de *frontera Este*, tal vez inhibiendo la formación de metano o promoviendo su oxidación. Aunque no parece existir relación alguna entre metano y oxígeno en el conjunto de todos los datos (figura 8b), sí es claro que las mayores concentraciones de metano estuvieron asociadas en su totalidad a concentraciones intermedias de oxígeno.

Una diferencia importante entre estaciones que presentaron flujos positivos y negativos se observa en el campo de temperatura en el plano zonal (cortes Este-Oeste) del área de estudio (figura 5). En esta figura puede observarse que la mayoría de las estaciones que presentaron flujos negativos (figura 11b), se encontraron inmersas en sitios donde la capa de mezcla fue más gruesa que la registrada en la mayoría de las estaciones que presentaron flujos positivos. Esto puede observarse claramente en la estación 113.45 $z=0$ (figura 5e). Este punto de muestreo se encontró en una parcela de agua que presentó cambios de temperatura y salinidad pequeños, del orden de 1°C y 0.1 respectivamente. Estas zonas homogéneas de la columna de agua son sitios con fuerte interacción

atmosférica pero con poco intercambio de propiedades con aguas profundas debido a la estabilidad y profundidad de la termoclina. Si diéramos por hecho que la mayoría del metano observado en las estaciones superficiales se generó en aguas situadas en la picnoclina, como ha sugerido Reeburg, (2007), podría sugerirse que los flujos negativos observados en estaciones que presentaron una capa de mezcla gruesa sean debido al poco intercambio de propiedades entre las aguas superficiales y aquellas situadas debajo de la picnoclina. Generalmente las estaciones analizadas durante este muestreo mostraron una capa de mezcla que abarcó aproximadamente los primeros 20 metros (figuras 7), pero aquellas que presentaron flujos negativos se distinguieron por extenderla hasta los 50 metros. Otras estaciones que presentaron flujos negativos junto con esta particularidad son la 117.45 (figura 5f), 127.40 y -60 (figura 5i), y 130.50, -55 y -60 (figura 5j) (cotejar estos sitios con la figura 11b).

A manera de reforzar estas observaciones, resulta interesante notar que las estaciones que presentaron los mayores flujos positivos (flujos en dirección a la atmósfera) se hallaron en lugares donde la termoclina fue somera. Ejemplo de estos son las estaciones 107.40 y 113.30 (figura 5c y e). Excepciones a esta última fueron la estación 120.30 y las comprendidas en la línea 123. La estación 120.30 se distinguió por ser somera (93 m) (véase Anexo III), por lo que podría estar entrando en juego otras variables como el sedimento; mientras que las estaciones de la línea 123, son totalmente inconsistentes con estas conjeturas. Las estaciones ubicadas a lo largo de la línea 123 muestran irregularidades en las isohalinas más que en las isotermas (figura 5h). La disposición de las isohalinas en los primeros 100 metros de las estaciones 123.45 y -60 (dispuestas de forma perpendicular al fondo), así como la presencia de valores mínimos de salinidad (33.3) en un núcleo situado en la estación 123.60 $z=50$, sugiere que la Corriente de California se acerca desde mar abierto, formando un frente salino similar a los observados en julio en las líneas 127 y 133 (figura 14e y f). Precisamente es en este frente salino donde se da la presencia de un núcleo subsuperficial de mínimo contenido de metano (≈ 9 nL/L, la concentración más baja en todo el estudio), centrado en la estación 123.45 $z=20$. Respecto a estas bajas concentraciones, en general en las aguas superficiales de los océanos se registran frecuentemente contenidos entre 50 y 200 nL/L, sin embargo, en regiones como el Golfo

de los Leones al noroeste del mar Mediterráneo se han observado concentraciones menores a los 2 nL/L (Bange, 2006).

Estas observaciones referentes a la relación entre flujos positivos y cambios bruscos en la temperatura y/o densidad, y aquellos entre flujos negativos y regiones donde la columna de agua es homogénea, sugieren, en primera instancia, que las zonas con afloramientos de agua, cuya características principales son el emergimiento de la termo- y pycnoclina, representaron los sitios de mayor aporte de metano a la atmósfera. Sin embargo, esta relación no es del todo consistente si consideramos que las regiones con mayor contenido de clorofila, presumiblemente las más influenciadas por efecto de las surgencias, no presentaron los mayores aportes de metano a la atmósfera.

Un aspecto interesante a observar en la figura 11 es que no todos los sitios que presentaron los porcentajes de saturación mayores en superficie fueron los que presentaron los mayores flujos positivos. Ejemplo de esto fueron las estaciones 123.45 y -60. En la primera de estas, se observó una saturación de 3.1% y un flujo de 20.1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ día; mientras que para la segunda se registró una saturación de 4.6% y solo un flujo de 7.5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$. Esto se debe al efecto de viento, mientras para la primera se registró una velocidad de viento promedio de 8.35 m/s, para la segunda fue de 4.38 m/s (ver Anexo IV). Actualmente se considera que la velocidad del viento juega el papel más importante en la transferencia de gases desde la superficie del océano a la atmósfera (Wanninkhof, 1992) y otros autores como Sansone *et al.* (2004) han descrito casos similares a este.

8.2. MUESTREO IME0607 (julio 2006).

8.2.1. Hidrografía.

La comparación de los campos de salinidad y temperatura entre la climatología de Ramírez-Manguilar, (2005) y las observaciones durante julio del 2006 muestra ciertas diferencias, en especial en la zona sur. En la región norte (línea 100-123) no se registraron diferencias importantes en el campo de salinidad aunque sí en la temperatura. Durante este

mes se observaron temperaturas superficiales de hasta 20°C en la zona central de las líneas 107 y 110 (figuras 12a), siendo que la climatología de esta autora muestra valores de entre 17 y 18°C. Mientras tanto, la zona sur (línea 123-137) mostró salinidades hasta de 34.2 (ver estaciones 130.35 y 137.30 en figura 12a), valores mucho mayores a los presentados en la climatología de Ramírez-Manguilar, (2005) cuyo valor máximo es cercano a 33.8. En lo que respecta a la temperatura, la situación es similar pues se presentaron temperaturas superiores al promedio de la climatología. Durante este muestreo fueron registradas temperaturas de hasta 24 °C a lo largo de la línea 133 (figura 12a), mientras el máximo para esta zona, estimado por esta investigadora, fue de 20 °C. La comparación de los campos de salinidad y temperatura a 10 metros de profundidad con las observaciones de Goericke *et al* (2005) para el periodo 2002-2003 muestra esencialmente lo ya descrito en superficie. Con toda esta información el panorama hidrográfico general fue que en la zona de estudio se presentó agua con temperatura superior a los promedios.

8.2.2. Distribución del metano disuelto.

De manera general podemos decir que la concentración de metano durante julio fue menor a la registrada en abril (comparar tabla II con tabla III), y que los máximos contenidos de metano estuvieron frecuentemente asociados a la parte baja de la termo- o haloclina (esta última se situó, al igual que en abril, debajo de la primera). Los sitios con contenidos elevados de metano en este muestreo (>100 nL/L) se situaron en localidades donde la temperaturas fue inferior a 14°C (figura 15), lo cual sugiere que la temperatura probablemente jugo un papel importante en la distribución de los máximos de metano, al menos durante este muestreo. Es probable que la baja concentración de este gas en aguas cálidas sea un simple reflejo de la relación inversa entre la solubilidad de los gases y la temperatura. Sin embargo, también pudiera deberse a una disminución en la biosíntesis o a un aumento en la oxidación de metano en estos cuerpos de agua.

Un hecho consistente durante los dos muestreos analizados en el presente trabajo fue la presencia de los máximos contenidos de metano asociados a la termo- y/o haloclina y donde estas presentaron perturbaciones en su disposición espacial (plegamientos), como las presentadas en las estación 107.45 y 120.45 (figura 6 y 16). La picnoclina ha sido

considerada como un “segundo fondo” pues presenta características que lo asemeja al sedimento (Sieburth, 1993). Se trata de una capa con un abrupto gradiente en la densidad que lleva consigo cambios en propiedades físicas como por ejemplo la velocidad de difusión y del sonido, entre otras. El efecto de este gradiente es la retención de partículas y el impedimento a la difusión de gases y sustancias de arriba hacia abajo y viceversa (Cline *et al.*, 1986). Esta última característica hace que esta capa de agua se comporte como un tamiz retenedor de materiales disueltos y particulados que llevan frecuentemente a una fuerte disminución en el contenido de oxígeno, producto de la descomposición bacteriana de la materia orgánica. Todas estas características se asemejan en gran medida a las del sedimento, lugar donde se lleva a cabo la producción de metano en cantidades del orden de micromoles por litro de agua intersticial. La reducida difusión a la que están expuestas las partículas y sustancias en la picnoclina se debe a la elevada resistencia al flujo turbulento que presenta esta capa de agua (estabilidad), lo que implica el requerimiento de mayor cantidad de energía para mezclar este cuerpo de agua, en comparación con el necesario para mezclar el mismo cuerpo pero cuya densidad fuera homogénea (Colling, 2004).

Así mismo durante julio, en líneas como la 127 y 133 (figura 14e y f) fue posible localizar frentes salinos que coincidieron con estaciones analizadas para su contenido de metano. La disposición de los contornos de metano en la línea 127 muestra un núcleo de elevado contenido de este gas que se situó justamente en la zona donde se encontró el mencionado frente. Los valores mínimos de salinidad (33.5) observados en las estaciones oceánicas de estas líneas (127 y 133), sugieren la entrada de la Corriente de California desde mar abierto. Es posible que la disposición tan característica que presentaron los contornos de salinidad, temperatura y metano en estas localidades se haya debido a la intrusión de esta corriente (figura 14e y f y 15c). La presencia de altas concentraciones de metano en un frente coincide con lo descrito por Burke *et al.* (1983), los cuales registraron que las mayores concentraciones de metano se situaron a lo largo de un frente salino formado entre la Corriente de California y la Contracorriente Norecuatorial. Así mismo, estos autores también observaron que algunos sitios de máximo contenido de metano estuvieron asociados a depresiones en el campo de densidad, similares a los plegamientos de la termo- y haloclina presentados en este trabajo.

Al igual que lo descrito en abril, en julio los cortes meridionales (cortes Norte-sur) del área de estudio mostraron la frecuente asociación entre núcleos de elevado contenido de metano y sitios con plegamientos de la termo- y/o haloclina (figura 16). Ejemplo de estos durante el periodo de abril son la estación 107.35 y -40; la 120.35, -40 y -45 (ver figuras 6b, c y d); y para julio tenemos a las estaciones 103.35, 113.40, 107.45 y 120.45 (figura 16a, c, b y d). La mayoría de estos sitios exhibieron un plegamiento hacia la superficie a excepción de la estación 113.40 que lo presentó hacia el fondo (figura 16b). Estos plegamientos, asociados con frecuencia a elevados contenidos de metano, pudieran ser causados a juzgar por su aspecto, por ondas internas o remolinos, estos últimos posiblemente causados por el flujo meandrónico de la Corriente de California. Plegamientos como los observados en abril (figura 6d, línea 120), se asemejan a los encontrados en los perfiles de remolinos localizados en la Corriente del Golfo (Atlántico Norte) (ver Iselin, 1936; Lai y Richardson, 1977; Richardson, 1980; entre otros en Robinson, 1983) En estos trabajos el ascenso de la termo- y haloclina se da mediante la formación de un remolino superficial causado por el elongamiento y fragmentación de una sección de la Corriente del Golfo (ver Fuglister, 1972 en Richardson, 1983; Piontkovski *et al.*, 1995). El núcleo del remolino se encuentra justo en la zona de la perturbación y corresponde a la zona de convergencia o divergencia según el tipo de remolino (ciclónico o anticiclónico).

Los remolinos, al igual que los frentes, tienen su origen en una variedad de procesos físicos, pero en especial concernientes al flujo turbulento. Son causados por el flujo de agua a lo largo de contornos topográficos que originan a su vez circulación vertical con la capacidad de alteración de variables biológicas (Owen 1981; Piontkovski *et al.*, 1995). Se considera que los remolinos y frentes pueden formarse por causas meramente topográficas como el flujo de una corriente a través de islas, bancos, montes submarinos, línea costera etc.; y por causas dinámicas como fuerzas atmosféricas o patrones propios del flujo de agua. En la Corriente de California los remolinos pueden darse mediante ambas causas. La formación de remolinos por causas dinámicas en esta corriente está relacionada con el debilitamiento de su flujo comúnmente registrado desde verano hasta inicios de la primavera, mientras que aquellos generados por causas topográficas, son comunes en regiones como Punta Eugenia (Soto-Mardones *et al.*, 2004), cuya línea de muestreo cercana es la 120, misma que coincide con los plegamientos de la estación 120.45 (figura 6d y 16d).

Por su parte, los frentes son zonas de convergencia lineal generalmente formados entre distintos tipos de agua (Colling, 2004) donde es posible hallar altas concentraciones de material particulado (Pak y Zaneveld, 1974), y que incluso, autores como Dunson y Ehlert (1971) han sugerido que pueden llegar a formar comunidades enteras en estas zonas. Resulta razonable pensar que los elevados contenidos de metano asociados a frentes sean debido al transporte y acumulación de materiales en estas zonas.

Sin importar su origen, todos los remolinos coinciden en que durante alguna etapa de su vida, el movimiento rotatorio causa un desplazamiento vertical de agua que lleva a desviaciones del equilibrio de las capas isopícnicas (Piontkovski *et al.*, 1995). Los remolinos ciclónicos muestran un flujo divergente con una compensación de agua del fondo, lo que provoca un ascenso de la termoclina. En regiones como la Corriente de California, donde la termoclina se encuentra cerca del fondo de la zona fótica, esta elevación da lugar a un flujo vertical de nutrientes (Owen, 1980). Si en realidad los plegamientos de la termo- y haloclina observados durante abril en las estaciones 107.35 y -40; la 120.35, -40 y -45 (figura 6b, c y d); y durante julio en las estaciones 103.35, 113.40, 107.45 y 120.45 (figura 16a, c, b y d) se tratasen de remolinos, resultaría factible pensar que este flujo vertical de nutrientes pudiera ser responsable del hallazgo de elevados contenidos de metano en estos puntos de muestreo. Por otra parte, si consideramos que el efecto de los remolinos en la Corriente de California es importante para comprender la distribución de organismos y materiales (Owen, 1980), resultaría factible pensar también que los altos contenidos de metano hallados en estos sitios pudieran ser producto del transporte horizontal y/o vertical de materiales que se da en las inmediaciones de un remolino.

Un hecho adicional que sugiere la presencia de remolinos en los sitios que presentaron plegamientos de la termo- y haloclina se observó durante abril en la estación 120.45 (figura 6d). Los campos de temperatura, salinidad, clorofila y oxígeno disuelto (figura 3a y b) exhibieron contornos circulares alrededor de ésta localidad, mismo que podría significar la presencia de cierto patrón de circulación rotatorio. Sin embargo, los sitios que exhibieron estos plegamientos durante julio: estaciones 103.35 (figura 14a), 107.45 (figura 16d), 113.40 (figura 16b) y 120.45, (figura 16d), no mostraron este tipo de contornos en superficie ni a 10 metros de profundidad (figura 12a y b). No obstante, un análisis de los

estratos más profundos reveló la presencia de estos anillos a 100 y 150 metros. (Anexo V). A 100 metros se observaron contornos circulares en la estación 103.35, mientras que a 150 metros fueron visibles los pertenecientes a las estaciones 107.45, 113.40 y 120.45. Al igual que lo registrado en estas localidades, los anillos en el campo de temperatura y salinidad de la estación 107.40, sitio que presentó un núcleo de alto contenido de metano asociado a plegamientos de la termo- y haloclina durante abril, también se halló en aguas profundas (\approx 50 metros, datos no mostrados).

Es apropiado mencionar que en todas las estaciones donde se registraron plegamientos de la termo- y/o haloclina que estuvieron asociados a elevados contenidos de metano, y que además presentaron anillos en los campos de temperatura y salinidad, han sido descritos remolinos por diversos autores. La presencia de remolinos ciclónicos en la estación 120.45 ha sido registrada con anterioridad (Soto-Mardones *et al* 2004; Ramírez-Manguilar 2005). Igualmente, en las inmediaciones de las estaciones 107.40 y -45, Schwing *et al.* (2002) detectaron un remolino superficial ciclónico en julio y octubre del 2001; mientras que Venrick *et al.* (2003), hallaron uno de tipo anticiclónico centrado en la estación 107.45 en el mes de enero. De igual forma, Durazo *et al.* (2001) hallaron un remolino ciclónico en las inmediaciones de las estaciones 103.30 y -35 durante abril del 2000. También, en la estación 113.40, lugar donde se observó la asociación de un centro de alto contenido de metano con el plegamiento hacia abajo de la haloclina (figura 16b), se ha registrado la presencia de un remolino anticiclónico superficial (Soto-Mardones *et al.*, 2004) y otro subsuperficial (Jerónimo y Gómez-Valdéz, 2007). El perfil horizontal de temperatura mostrado en la publicación de los primeros autores muestra cierta similitud a los observados en este trabajo (comparar el plegamiento de la termo- y haloclina en la estación 113.40 de la figura 16b con la figura 5b de Soto-Mardones *et al.*, 2004). El plegamiento de las isólineas hacia abajo en este sitio sugiere la existencia de una zona de convergencia que provocó que la termo- y haloclina se hundieran, mismo que es indicativo de la presencia de un remolino anticiclónico (Owen, 1980; Owen, 1981). De más reciente descubrimiento es el remolino subsuperficial descrito por Jerónimo y Gómez-Valdéz, (2007), el cuál fue hallado entre los 300 y 400 metros en la cercanía de la estación 113.40. Estos autores atribuyen su origen al paso de la Contracorriente Subsuperficial a través de la pendiente continental de Punta Eugenia. Resulta interesante mencionar que en las estaciones 113.40 y -45, sitio

donde se registró el mencionado remolino, no se encontró durante el presente trabajo, un patrón definido de contenido de metano pues durante abril se registró un núcleo de baja concentración del alcano (figura 6c), mientras en julio resultó ser de alta concentración (figura 16b).

La frecuente asociación entre los sitios que mostraron núcleos de alto contenido de metano y aquellos que exhibieron: a) plegamientos de la termo- y/o haloclina y b), contornos circulares en los campos de salinidad y/o temperatura (anexo V); junto con la evidencia bibliográfica que ha avalado la presencia de estructuras de mesoescala (remolinos) en dichos sitios, sugieren que durante este trabajo pudiera haber existido sitios con altos contenidos de metano donde se presentaron remolinos. Desafortunadamente nuestros datos hidrográficos no son los indicados para confirmar la presencia de dichas estructuras. Cuestionamientos que quedan al aire es si estos posibles remolinos fueron subsuperficiales, como podría intuirse debido a la presencia de contornos circulares a 100 y 150 metros, y no superficiales como se piensa de la estación 120.45, misma que mostró dichos contornos en superficie. No obstante, resulta claro que en este trabajo existen los elementos necesarios para confirmar que existió frecuente relación entre los máximos contenidos de metano y zonas que presentaron plegamientos en la termo- y/o haloclina. Es evidente que solo se podrá confirmar la presencia de remolinos mediante análisis de imágenes de satélite y análisis de alturas dinámicas.

Como ya se mencionó, la causa más simple que podría pensarse del porqué se hallaron altos contenidos de metano en zonas de plegamientos de la termoclina es por la reducción en la profundidad de la picnoclina hasta la base de la zona fótica, cuya profundidad varía entre los 40 y 60 metros (Cepeda, 2004), promoviendo con esto la formación de materia orgánica (fitoplancton) y produciendo, probablemente mediante su descomposición, metano. Para confirmar esta hipótesis sería necesario observar altas concentraciones de clorofila asociadas a estos plegamientos y a su vez que estas estuvieran asociadas a núcleos de alto contenido de metano.

En cuanto a la relación observada entre clorofila y metano disuelto durante julio, en el plano horizontal resulta inadecuado establecer la presencia de algún patrón debido a que

únicamente se efectuó el análisis de una muestra en zonas cercanas a la costa (estación 113.30), regiones donde se hallaron las concentraciones más elevadas de clorofila (ver figura 12b), lo cual dificulta tener una idea clara de cómo se distribuyó la clorofila a lo largo de una amplia gama de concentraciones con respecto al metano. Mientras tanto, en el plano vertical no fue evidente la existencia de alguna relación concreta entre metano y clorofila. Al igual que lo descrito en abril, durante julio el máximo de clorofila se encontró ocasionalmente por encima del de metano (estaciones 103.40, 107.45, 113.45, entre otras, figura 17) y en otras pocas coincidieron (120.45, -50 y 133.40). Con respecto a esta última tendencia, en el trabajo de Oudot *et al.* (2002), los cuales realizaron transectos trasatlánticos entre los 7° N y los 4° S cubriendo algunas regiones de la costa de Sudamérica y África (esta última con un sistema de corrientes de frontera *Este*), puede observarse que los tres perfiles mostrados, correspondientes a las localidades africanas, presentaron el máximo de clorofila a la misma profundidad que el de metano. Estas observaciones llevaron a los autores a concluir la existencia de algún mecanismo que regule la producción de metano con la dinámica del fitoplancton.

Refiriéndonos a las pocas estaciones en las que el máximo de clorofila estuvo asociado al de metano durante este trabajo (abril: estaciones 107.35, 110.35 y 130.55 figura 7; julio: 120.45, -50 y 133.40, figura 17), estas representaron evidencia valiosa para comprobar la hipótesis mencionada anteriormente acerca de si los máximos de metano asociados a plegamientos de la termoclina fueron debidos al afloramiento de la termoclina a la zona fótica y trayendo consigo la formación de fitoplancton. El traslape de los contornos de temperatura-clorofila y clorofila-metano en las secciones donde se presentaron plegamientos de la termoclina en las estaciones antes mencionadas reveló que efectivamente en estos sitios los máximos de metano y clorofila se encontraron a la profundidad de dichos plegamientos, ejemplo de algunas localidades se muestran en la figura 19.

En esta figura es claro que en las regiones donde se presentó el plegamiento de la termoclina el contenido de clorofila fue mayor que el encontrado en la zona circundante, y que el máximo de metano se encontró justamente en esta zona. Esto sugiere que al menos en estas localidades, la presencia del fitoplancton pudo ser importante en la acumulación de altas concentraciones de metano. Estas observaciones fueron consistente en la mayoría de

las estaciones que presentaron estos plegamientos como la 107.35, 120.35 y 120.45 durante abril (figura 6a y d), y la 120.45 durante julio (figura 16d). Esta información, junto con la expuesta en párrafos anteriores referente a la relación poco consistente observada hasta ahora entre clorofila y metano en otros planos, dificulta tener un panorama claro del vínculo entre estas variables. En el presente trabajo los máximos de clorofila superficiales, a 10 metros de profundidad y en la vertical pocas veces correspondieron con los máximos de metano (comparar figura 3 con figura 11 y figura 12 con figura 18). Probablemente la relación más consistente hallada entre clorofila y metano estuvo vinculada a los mencionados plegamientos de la termoclina. Si esta sugerencia fuera del todo acertada la pregunta a contestar sería: ¿cuál es la condición que se da en los plegamientos para establecerse el vínculo entre clorofila y metano y que no se da en otros sitios? Es evidente que si solo se tratase de la variable clorofila encontraríamos los máximos de metano siempre asociados al de clorofila. Es por tal motivo probable que otras variables entren en juego para validar dicha relación como podría ser la cantidad de luz, la concentración de oxígeno y/o la temperatura.

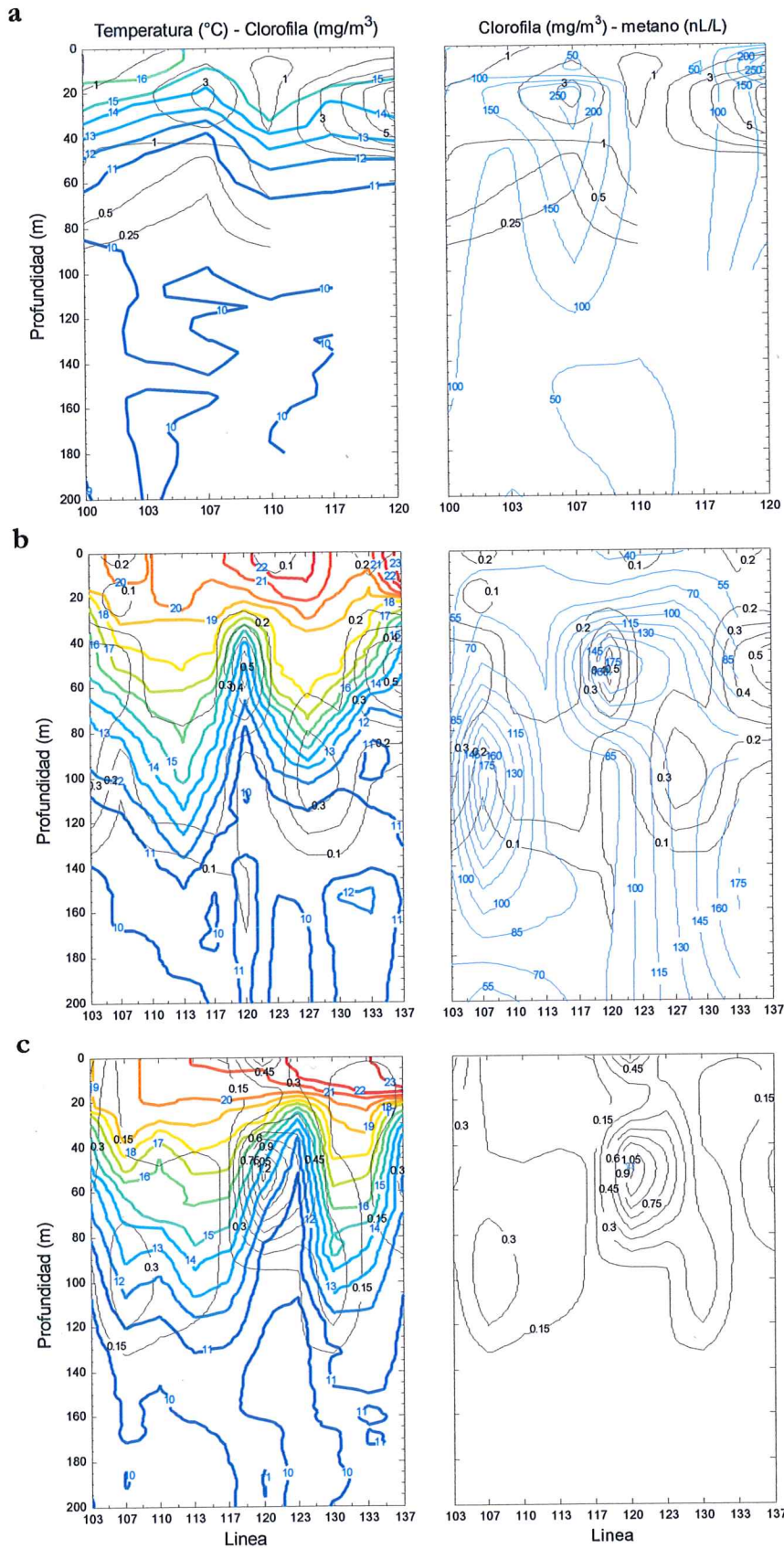


Figura 19. Traslapo de contornos de temperatura (líneas coloreadas) y clorofila (líneas oscuras) y los de metano (líneas azules) y clorofila para: a, estaciones 35 (abril); b, estaciones 45 (julio); y c) estación 120.50 (julio). La estrella azul en esta última representa la máxima concentración de metano medida en la estación 50.

En cuanto a los flujos de metano observados durante el presente estudio, los valores promedios obtenidos muestran que la zona de estudio se comportó como una fuente de metano para la atmósfera (tabla IV), sin embargo, la diferencia entre ambos meses fue de un orden de magnitud. La disparidad entre los flujos promedios en ambos muestreos se deben a las diferencias en la concentración superficial de metano y a la velocidad del viento que impero en cada periodo de análisis. Es evidente que bajas concentraciones de metano superficiales darán como resultado flujos pequeños. Pero además, otra posible razón del porqué se presentaron bajas concentraciones de este gas en superficie durante julio la provee la grafica de dispersión entre metano y temperatura (figura 15).

Tabla IV. Comparación de los flujos de metano obtenidos por otros autores para distintas regiones del océano.

Sitio	Flujo ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$)	Referencia
Giro tropical del Pacífico Norte	1.4-1.7	Holmes <i>et al.</i> 2000
Pacífico Tropical Noreste	2.3	Sansone <i>et al.</i> 2001
Atlántico Ecuatorial	1.2-2.0	Oudot <i>et al.</i> 2002
Pacífico Sureste	-0.74-4.1	Kelley y Jeffrey, 2002
Este del Mar de China	4.1	Tsurushima <i>et al.</i> 1996
Aguas costeras y áreas de surgencias	>4	Bange <i>et al.</i> 1994 ; Kelley y Jeffrey, 2002
Cabeza del Golfo de California	130	Macías-Zamora (datos no publicados)
Costa Pacífico y del Golfo de California del estado de Baja California Sur	0.5-5.9	Sansone <i>et al.</i> 2004
Costa noroeste de la península de Baja California		
Abril 2006	3.9	Este trabajo
Julio 2006	0.3	

Durante este mes se encontró cierta relación inversa entre el contenido de metano y la temperatura. Se observó que concentraciones por encima de los 100 nL/L rara vez se encontraron en sitios donde la temperatura superó los 14 °C. Con esto último resulta claro el porqué las aguas superficiales (las más cálidas) presentaron bajas concentraciones de este gas. Esto último puede observarse con claridad en la figura 20 donde se muestran los factores de saturación obtenidos para todas las muestras y durante ambos muestreos. Las estaciones superficiales del muestreo de julio (0 y 20 metros) mostraron un reducido factor de saturación en comparación con estaciones más profundas y a los registrados en abril, lo que puede sugerir que las aguas superficiales, al ser más calientes, se encontraron menos sobresaturadas.

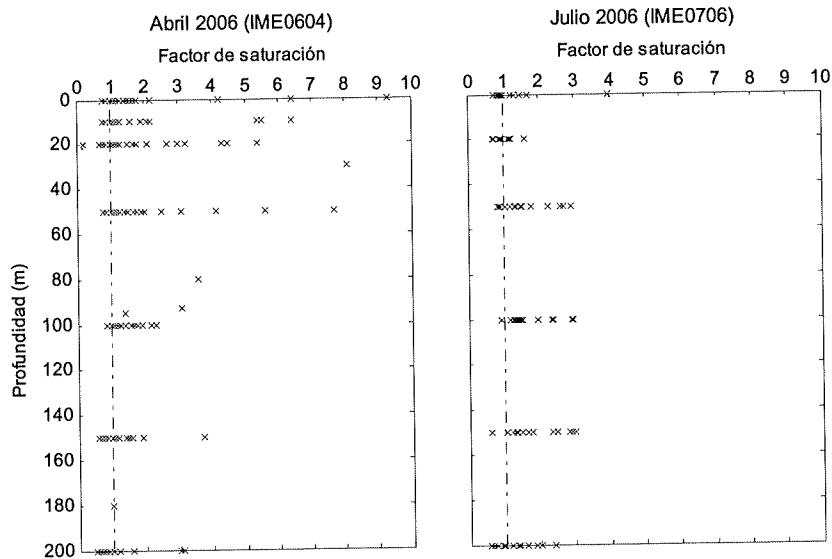


Figura 20. Factores de saturación calculados para todas las muestras de cada uno de los muestreos. Las muestras ubicadas a la derecha de la línea punteada fueron las que presentaron sobresaturación; las ubicadas a la izquierda de esta se encontraron subsaturadas.

Es oportuno recordar que durante julio se registraron temperaturas superiores a la media climatológica estimada por Ramírez-Manguilar (2005) y por tal motivo, en base a esta posible relación inversa entre metano y temperatura, resulta factible pensar que si la temperatura de los sitios de muestreo superficiales hubiera sido menor, los contenidos de metano habrían sido superiores. Por otro lado, y probablemente de menor importancia en la explicación de las diferencias de flujos promedio entre muestreos, sea debido a la velocidad del viento. Durante julio se observó una velocidad de viento promedio de 3.9 m/s, mientras que durante abril fue de 5.9 m/s (ver campo de velocidades de viento en Anexo IV), lo cual lleva por simples razones matemáticas a la estimación de flujos pequeños; esto debido a los componentes de la ecuación con la que se determinan los flujos, en donde la velocidad del viento es directamente proporcional a los flujos. La presencia de agua con mayor temperatura en la capa superficial del océano, así como la disminución en la velocidad del viento observada durante julio, es consistente con el paulatino debilitamiento de la Corriente de California durante la transición de primavera a verano (Reid *et al.*, 1958; Lynn y Simpson, 1987; Durazo y Baumgartner, 2002).

El flujo promedio obtenido durante abril se equipara al encontrado por otros autores en aguas costeras y áreas con surgencias (tabla IV), sin embargo, el calculado para

julio se muestra muy pequeño en comparación con los registrados en la bibliografía. Probablemente se deba a que durante este mes se analizaron pocas estaciones costeras, entre ellas excluidas aquellas ubicadas en la Bahía de Vizcaíno, sitio de baja profundidad donde se registraron los mayores factores de saturación durante abril (figura 11a). A lo largo de este trabajo se observó que las localidades cercanas a la costa fueron las que frecuentemente presentaron los mayores flujos de metano, posiblemente debido a la mayor disponibilidad de materia orgánica disuelta y/o particulada. Durante julio, el hecho de haberse analizado primordialmente estaciones oceánicas, dio como resultado flujos promedios menores. Sin duda alguna, la reducción en la red de muestreo durante este mes dificulta llevar a cabo una confiable comparación entre ambos periodos de muestreo.

De los trabajos citados en la tabla IV, el más cercano a nuestra zona de estudio es el de Sansone *et al.* (2004). Los flujos obtenidos en el presente estudio se encuentran prácticamente dentro del intervalo registrado por estos autores. En el presente trabajo el flujo promedio estimado durante abril fue mayor al registrado en otras áreas como el Giro Tropical del Pacífico Norte, o en el Atlántico Ecuatorial (tabla IV). Es probable que esto se deba al tipo de circulación predominante en la costa noroeste de la península de Baja California. Ésta se encuentra bajo la influencia de un sistema de corrientes de frontera *Este* caracterizado por la presencia de afloramientos de agua fría, rica en nutrientes producto del transporte de agua superficial hacia afuera de la costa originado por un gradiente de presión horizontal. Estas regiones del océano son importantes en términos ecológicos y económicos (Colling, 2004) por su elevada productividad biológica que lleva a la formación de grandes cantidades de materia orgánica, misma que al descomponerse pudiera estar generando importantes cantidades de gases como el metano.

En cuanto a la relación entre metano y otras variables no estudiadas en este trabajo, como el material suspendido total, carbono orgánico particulado y la cantidad de nutrientes disueltos. Burke *et al.* (1983) llevaron a cabo un extensivo trabajo cuya finalidad fue determinar la posible relación entre el contenido de metano con las variables antes mencionadas en una zona de convergencia entre la Corriente de California y la Contracorriente Norecuatorial, caracterizada por la formación de frentes de temperatura y salinidad. Encontraron relaciones distintas en ambas corrientes. Por ejemplo, mientras fue

registrada una relación consistente entre la nutriclina y el contenido de metano en estaciones de dominancia de la Contracorriente Norecuatorial, no fue el caso para aquellas situadas en la Corriente de California. En el mismo sentido, la materia total suspendida solo presentó relación con las estaciones en la Corriente de California. Como en el mencionado trabajo, en muchos otros concernientes a la distribución de metano se dan ciertas relaciones que en otros no. Ejemplo de ello son el trabajo de Lamontagne *et al.* (1975) quienes no pudieron encontrar relación alguna entre clorofila y metano en el Pacífico Ecuatorial mientras Brooks *et al.* (1981) en el Golfo de México, fue capaz de encontrarla. Esta información junto con las erráticas relaciones obtenidas durante el presente trabajo, especialmente entre clorofila y metano, sugiere que probablemente estén en juego más variables que dificultan establecer relaciones generales para todos los sitios de muestreo. Entre estas podemos mencionar el transporte vertical y horizontal, la mezcla, producción y consumo del alcano y las transferencias de metano atmósfera-océano (Burke *et al.*, 1983).

En cierta forma, la información derivada de este trabajo indica la presencia de una relación probablemente más consistente entre metano y el ambiente físico (salinidad, temperatura y/o densidad) que con el biológico (oxígeno y clorofila). La frecuente asociación de los máximos contenidos de metano con zonas que presentaron: a) plegamientos de la termo- y/o haloclina, b) en sitios con la existencia de frentes salinos, y c) en el caso del muestreo del mes de julio, altos contenidos de metano restringidos a aguas con temperaturas menores a 14 °C, sugieren que la distribución de metano en esta zona y durante esta época, estuvo mayormente controlada por fenómenos físicos. Al igual que en este trabajo, autores como Burke *et al.* (1983) y Ward, (1992) han sugerido que la física jugó un papel importante en sus estudios. Por ejemplo los estudios de Ward efectuados en el sur de California mostraron en algunas estaciones dos máximos de metano influenciados presuntamente por distintas variables físicas. Los más profundos de estos, situados debajo de la picnoclina, estuvieron relacionados con movimientos de agua semidiurnos, probablemente debido a ondas o mareas internas; mientras que los máximos más someros (situados por encima de la termoclina), estuvieron asociados a bajas velocidades del viento. Burke *et al.* (1983) por su parte, registró los contenidos de metano más elevados justamente en el frente formado por la convergencia de la Corriente de California con la Contracorriente Norecuatorial.

La relación entre metano y oxígeno por su parte, fue ciertamente más consistente que la observada entre metano y clorofila. A lo largo de este estudio fue frecuente, aunque no regla, observar incrementos en la concentración de metano asociados a la oxiclina, sin embargo, esto no significó la existencia de una clara relación inversa entre las variables pues los máximos de metano a menudo no coincidieron con los sitios de menor concentración de oxígeno (figura 7 y 17). La existencia de cierta relación entre el contenido de oxígeno y de metano ha sido mencionada previamente por autores como Tsurushima *et al.* (1996) quienes afirman haber encontrado una relación inversa entre el contenido de metano y oxígeno debajo de la termoclina en aguas del Mar del Este de China; y como los de Sansone y colaboradores (2004) en donde sus perfiles verticales muestran, al igual que en el presente estudio, el incremento del contenido de metano en la región de la oxiclina en localidades ubicadas en la costa Pacífico y del Golfo de California del estado de Baja California Sur, México. Así mismo, autores como Oudot *et al.* (2002) y Tsurushima *et al.* (1996) han observado buena correlación entre el contenido de metano y el parámetro conocido como UAO (utilización aparente de oxígeno). El UAO se define como la diferencia entre la concentración de oxígeno que tendría una muestra en condiciones de equilibrio (en función de su temperatura y salinidad) y la concentración real medida. El valor de UAO representa la cantidad de oxígeno que ha sido removida por algún proceso - como la respiración u oxidación de materia orgánica - en una muestra de agua, esto considerando que alguna vez el agua se encontró en superficie completamente saturada. En el presente trabajo no se registró relación aparente entre el contenido de metano y el UAO (datos no presentados).

No obstante, en ocasiones resultó complicado establecer claramente si el metano se halló asociado realmente a una variable física o biológica debido a que estas se encuentran mutuamente relacionadas. Tal es el caso de la oxiclina pues durante este trabajo la termoclina, picnoclina y oxiclina se hallaron prácticamente a la misma profundidad lo que dificulta establecer con cuál (o cuales) de estas variables (densidad, temperatura, oxígeno y otras más no estudiadas en este trabajo, y que se encuentran relacionados a la picnoclina) se encontraron realmente vinculados las concentraciones máximas de metano.

Con respecto a otros temas, en el presente trabajo tampoco se registró una tendencia consistente en aquellas estaciones cuyo análisis de contenido de metano fue

cercano al fondo (Anexo III). Se esperaba que en estas localidades la concentración de metano aumentara al acercarse al fondo pues las altas concentraciones de materia orgánica frecuentemente confinadas en el suelo marino (como las registradas en zonas de surgencias) a menudo dan lugar a ambientes anóxicos y con la subsecuente acumulación de metano. Durante abril las estaciones 117.30, 117.35, 120.30 y 120.39, localidades de baja profundidad (Anexo III), mostraron una tendencia negativa al acercarse al fondo, es decir, su concentración de metano disminuyó (figura 7). Entre tanto, algunas otras mostraron un claro incremento como la 119.33 y 120.35, ambos sitios ubicados en la Bahía de Vizcaíno, lugar con una amplia plataforma continental cuya profundidad es menor a 200 metros. En estas localidades, sin embargo, no fue distinguible la presencia de un gradiente de metano que proviniera desde el fondo y que se extendiera a toda la columna de agua, lo cual hubiera sugerido que el sedimento representó una fuente de metano para toda la columna de agua. Sin embargo, es prudente recalcar que este trabajo carece de los suficientes argumentos para confirmar esta sugerencia pues no se llevaron a cabo análisis de flujos de metano de la capa de transición sedimento-agua que hubiera permitido determinar la existencia de un flujo en dirección a la columna de agua. Autores como Sansone *et al.* (2004) han mostrado flujos importantes del sedimento a la columna de agua en la costa Pacífico de Baja California Sur y han enfatizado la importancia de las surgencias (como generadoras de partículas) debido a que los aportes de partículas vía fluvial son prácticamente nulos en esta zona. Otros más como Berner *et al.* (2003) tampoco observaron la presencia de un gradiente de concentración que proviniera del sedimento en la Bahía de Bengala.

El origen del metano registrado durante este trabajo no puede ser determinado mediante las técnicas empleadas. Para ello se requiere del uso de mediciones de isótopos estables de carbono. La interpretación de estos análisis se basan en el hecho de que la formación biogénica del metano se da mediante la utilización de los isótopos más ligeros (^{12}C) llevándose con esto un fraccionamiento los distintos isótopos de carbono presentes en el substrato, de tal forma que los más ligeros (^{12}C) son los prioritariamente utilizados en la biosíntesis, discriminando con esto a los más pesados (^{13}C). Por consiguiente, el metano de origen biogénico se encuentra con una baja proporción de ^{13}C (entre -110 y -50 ‰) en comparación con el metano originado por procesos abióticos como el termogénico (-50 a -20‰) (Whiticar, 1996 en Sansone *et al.*, (2004)). Dado que en la oxidación biogénica de

metano se lleva a cabo también utilizando los isótopos más ligeros, el substrato una vez oxidado presenta un enriquecimiento de isótopos pesados con lo cual es posible monitorear los procesos de oxidación del alcano (Sansone *et al.*, 2004). Aunque la mayoría de los trabajos realizados cercanos a la zona de estudio han sugerido que el metano registrado debe su origen a fuentes biogénicas (Burke *et al.*, 1983; Sansone *et al.*, 2004; Castro-Morales, 2005), en este trabajo no pueden ser descartadas los aportes por fuentes inorgánicas como yacimientos de hidrocarburos, ventilas hidrotermales y/o los llamados “volcanes de lodo” (*mud volcano*). Se sabe que frecuentemente la actividad tectónica - como la que encontramos en Las Californias - provoca fisuras y acomodamientos en el suelo oceánico que generan puntos de ventilación de la corteza terrestre por donde escapan gases como el metano. Si en las costas sureñas de California (EUA) existen registros de la presencia de estos sitios (Ward, 1992), resulta probable que existan también en las costas del Pacífico de Baja California

En los sitios caracterizados por la presencia de actividad tectónica es posible encontrar yacimientos naturales de metano cuyo escape de la corteza se da en forma de burbujas, o incluso darse la síntesis inorgánica de metano en las zonas de generación de corteza terrestre debido a reacciones termogénicas de reducción de carbonatos o mediante la reacción de serpentización. Esta última consiste en la oxidación de olivina para formar como producto el mineral serpentina e hidrógeno, este último, combinado con CO₂ y catalizado con hierro a 300 °C y 500 bars, produce metano (Reeburgh, 2007). Un ejemplo del grado de actividad tectónica que presenta el suelo oceánico de las costas de Baja California lo provee Dimitrov, (2002) que se ha encargado de compilar los sitios donde existen los denominados *volcanes de lodo*, de los cuales uno de ellos se encuentra frente a las costas de Baja California. Los volcanes de lodo son estructuras similares a los volcanes pero su formación se debe a la expulsión de agua, gas y lodo. Estas formaciones se dan generalmente en lugares donde existe compresión por la colisión de dos placas tectónicas. En general, resulta probable que los aportes de metano inorgánico a través de actividad tectónica como las ventilas hidrotermales y volcanes de lodo estén presentes en las costas de Baja California, sin embargo, debido a la profundidad a la que se encuentran estas fuentes resulta probable que no constituyan un aporte de metano a los primeros 200 metros de la columna de agua.

Otra fuente de metano, en la cuál crece cada día el interés en su estudio, son los denominados *hidratos*. Se trata de mezclas de agua e hidrocarburos (mayormente metano) encontrados, entre otros sitios, en el fondo oceánico, y cuya disposición molecular forma una red cristalina que los asemeja a hielo (Judd *et al.*, 2002). Se considera que estas estructuras representan el reservorio más importante de metano para el planeta (Judd *et al.*, 2002). En las costas de la Península de Baja California, hasta donde es de nuestro conocimiento, la presencia de estas estructuras solo son inferencias formuladas a partir de técnicas sismológicas (Judd *et al.*, 2002). En este trabajo consideramos que los hidratos de carbono, si realmente están presentes en el suelo oceánico de la Península de Baja California, probablemente no representaron aportes importantes de metano a la capa superficial del océano debido a las condiciones físicas en donde se forman estos cristales. Para formarse hidratos en el sedimento marino se requieren condiciones de temperatura menores a 5°C, la presión ejercida por una columna de agua de 300 a 500 metros y un suministro adecuado del gas (Judd *et al.*, 2002). Durante los presentes muestreos las temperaturas más bajas observadas en este rango de profundidad fluctuaron entre los 7 y 6 °C y con frecuencia esta profundidad no coincidió con el fondo marino (datos no mostrados).

Por otro lado, la información generada durante el presente trabajo no muestra una relación clara entre el contenido de metano y la masa de agua a la que pertenecieron las muestras, sin embargo es conveniente recordar que la mayoría de las muestras analizadas se encontraron en el dominio de la masa de agua Subártica (SAW) y en menor grado en el dominio de la masa de agua de Transición (TrW) y Ecuatorial Subsuperficial (ESsW). Esto significa que la información que tenemos acerca del contenido de metano en estas dos últimas masas de agua es limitada. Durante abril la masa de agua que presentó los mayores contenidos de metano fue la Subártica (102.9 nL/L, ver tabla II), mientras que en julio la masa de agua Ecuatorial Subsuperficial ostentó esta categoría (102.9 nL/L, tabla III). De la información bibliográfica que nos ha sido posible revisar para el presente escrito, solo Berner *et al.* (2003) ha mencionado la presencia de una relación clara entre el contenido de metano y las distintas masas de agua encontradas en un transecto que abarcó desde Sri Lanka hasta el ecuador.

Otro aspecto importante que recalcar es la concentración de metano encontrada más allá de los 100 metros en estaciones como la 133.40 y -45 y la 137.30, -35 y -40 durante el mes de julio (figura 17). En estos lugares, a profundidades mayores a los 100 metros, la concentración de oxígeno fue inferior a 0.1 mL/L, mismos que en virtud de dicho contenido se consideran sitios *microxicos* (Levin, 2003) y muy probablemente provengan de la denominada *zona del mínimo de oxígeno* ($O_2 < 0.5$ mL/L) que se encuentra frente a las costas del Pacífico Mexicano. Se cree que los contenidos bajos de oxígeno en las costas mexicanas se deben a la presencia de elevadas cantidades de materia orgánica, producto de surgencias, que se encuentran asociados a sitios con poca circulación (Sarmiento *et al.*, 1998). Sin embargo, en las estaciones antes mencionadas la concentración de metano es similar a la encontrada en el resto de las estaciones (< 180 nL/L figura 17) lo cual contrasta con lo que podría esperarse para aguas con las características subóxicas antes señaladas. Autores como Sansone *et al.* (2001) han registrado concentraciones de metano elevadas en localidades frente a las costas de Guerrero y Oaxaca (≈ 683 nL/L) situadas en esta zona de bajo contenido de oxígeno. Aunque no tenemos evidencia que avale que el agua analizada en estas localidades provenga realmente de la *zona del mínimo de oxígeno*, no sería de sorprender que debido al largo proceso de transporte, el agua proveniente de esta zona que ha llegado hasta las costas de Baja California no presente elevadas concentraciones de metano debido a que durante el trayecto, su carga de metano haya sido consumida (oxidada). Además, es importante tener en cuenta que la profundidad a la que se realizaron los muestreos no corresponde con la profundidad del mínimo de oxígeno registrada para las costas de la Península de Baja California (ver Fiedler y Talley, 2006) la cual varía entre los 350 y 550 metros de profundidad.

A manera de generar un panorama general de este trabajo, la distribución espacial de metano en el plano vertical mostró la frecuente presencia de altas concentraciones de metano en los primeros 50 o 100 metros, rango de profundidad donde comúnmente se sitúa la picnoclina frente a las costas de Baja California (Cepeda, 2004). Estudios de ecología microbiana enfocados al estudio de la producción de metano en aguas bien oxigenadas y con especial énfasis en la picnoclina, han sugerido que los elevados contenidos de metano hallados en esta capa son producidos por consorcios microbianos asociados al material particulado retenido en la picnoclina. La presencia de material suspendido en la columna de

agua provee de microambientes con características químicas que permiten la ocurrencia de procesos microbianos que parecieran químicamente imposibles, como la metanogénesis y nitrificación, procesos que ocurren en sitios con potenciales redox contrarios (Sieburth, 1987; Bianchi *et al.* 1992; Sieburth, 1993). Estos consorcios microbianos se encuentran constituidos por asociaciones bacterianas multi-tróficas que interactúan entre sí supliendo de nutrientes y/o de las condiciones ambientales requeridas al otro (Sieburth, 1987; Bianchi *et al.* 1992). Por tales motivos en este trabajo resulta factible pensar que los máximos subsuperficiales de metano hallados cerca de la picnoclina pudieran ser generados a través de conglomerados bacterianos asociados al material suspendido de esta capa. No obstante, durante abril se registraron estaciones como la 100.30, 113.40, 123.42 y 127.40 donde fue posible observar un segundo máximo subsuperficial de metano ubicado cerca de los 150 metros (figura 7). Este segundo máximo pudiera atribuirse a la presencia de comunidades bióticas como asentamientos de fitoplancton adaptados vivir en condiciones pobres de luz o a comunidades de zooplancton y/o bacterianas. Autores como Hopkinson y Barbeau, (2007) han descrito poblaciones de bacterias nitrificantes y cianobacterias entre los 80 y 150 metros de profundidad frente a las costas del Pacífico mexicano. Con esta información resulta razonable pensar que los máximos de metano encontrados cerca de los 150 metros de profundidad en este trabajo pudieran deberse a la presencia de comunidades bióticas similares a las descritas por estos autores.

Por otra parte, la distribución espacial del contenido de metano en el plano horizontal, mostró que los sitios que presentaron los mayores flujos y concentraciones de metano durante ambos meses se situaron en las estaciones más cercanas a la costa (figura 11 y 18). La presencia de los mayores contenidos de metano en estos sitios en comparación con los registrados en aguas más alejadas de la costa pudiera deberse a la presencia de mayor cantidad de material particulado y/o nutrientes en las estaciones cercanas a la costa. La tendencia a encontrar mayores concentraciones de metano en aguas cercanas a la costa es un hecho frecuentemente documentado (Conrad y Seiler, 1988; Sansone *et al.* 2001, Berner *et al.* 2003, entre otros). En las referencias citadas anteriormente, las altas concentraciones de metano han sido atribuidas a la presencia de surgencias y/o efluentes de ríos. Por su ubicación geográfica, en el área de estudio analizada en este trabajo, no existen ríos que aporten materiales de manera significativa (Zárate-Vidal, 1991; Sansone *et al.* 2004),

y que pudieran promover la formación de metano mediante el aporte pluvial de material particulado. No obstante, los afloramientos de agua ocurrentes en la zona durante los meses de primavera y verano (principalmente abril-julio) constituyen el mecanismo más importante de generación de material orgánico particulado (Hernández de la Torre *et al.* 2004; Sansone *et al.* 2004). La influencia de estos afloramientos disminuye conforme la distancia a la costa aumenta y por tal motivo podría pensarse que la presencia de menores concentraciones de metano en estaciones oceánicas pudiera deberse a que estas aguas se encontraron más alejadas de los sitios que presentaron afloramientos de agua. Otro aspecto interesante referente a la distribución espacial del metano registrado en este trabajo, fue el hecho de no estar relacionada de forma clara con la distribución de clorofila, esto contrastando con lo registrado por otros autores (Sieburth, 1987; Conrad y Seiler, 1988; Sieburth, 1993; Sieburth y Donaghay, 1993, entre otros). Existe información que señala al zooplancton como el generador del metano observado en la capa superficial del océano (Oremland, 1979; Bianchi *et al.* 1992; Marty, 1993; De angelis y Lee, 1994). Por tal motivo, en el presente trabajo no puede ser descartada la posibilidad de que algunos de los máximos de metano estuvieran asociados a sitios con alta biomasa de zooplancton y que no se hallaron en zonas con alta concentración de fitoplancton. En la Corriente de California los sitios de máxima biomasa de zooplancton no siempre corresponden con los sitios de máxima concentración de fitoplancton pues se ha observado que la distribución del zooplancton se encuentra influenciada, además de los procesos de surgencias, por la advección de agua proveniente del norte rica en nutrientes (Chelton, 1982; Roesler y Chelton, 1987).

Con respecto a la variación temporal, La presencia de menores concentraciones y flujos de metano durante julio, en comparación con los registrados durante abril coincidió con lo que pareció ser una reducción en la intensidad de las surgencias. Esto último en virtud de la presencia de agua menos fría y salada en la región costera (comparar figura 3 con figura 12). Es factible pensar que los menores contenidos de metano observados durante julio estuvieron asociados a este debilitamiento, debido probablemente a la menor abundancia de material suspendido y/o nutrientes en la columna de agua. La abundancia de bacterias metanogénicas en sitios donde se presentan eventos de surgencias han sido estudiados recientemente en las costas chilenas por Levipan *et al.*, (2007). Estos autores

encontraron que efectivamente existe una mayor concentración de ARNr perteneciente a arqueobacterias metanogénicas metilotróficas durante dichos periodos. Así mismo, estos investigadores también encontraron que la concentración de ARNr de este grupo de arqueobacteria disminuyó conforme la temperatura del agua aumentó. Esta observación es consistente con la relación inversa encontrada en el presente trabajo durante julio entre la concentración de metano y la temperatura (figura 15). Estos autores sugieren que parte de las arqueobacterias que registraron correspondieron a cepas psicrófilas.

Finalmente, y como ha podido apreciarse, no fue posible encontrar relaciones estrictas entre los contenidos de metano y variables como la temperatura, salinidad, oxígeno, clorofila-*a* y cuya aplicación, haya sido regla para todo lugar y tiempo. Sin embargo bajo un contexto temporal y espacial particular, podríamos hablar de relaciones *frecuentes* como aquellas observadas entre los máximos contenidos de metano y plegamientos de la termo-y/o haloclina, o como aquellas observadas entre la oxiclina y los máximos subsuperficiales de metano; o entre temperatura y metano, como la registrada durante el mes de julio. Tal vez sea, por el momento, correcto hablar de asociaciones *relativas* al menos mientras no se conozca con precisión cuáles son las otras condiciones o variables necesarias para que se produzca determinada asociación en cierto lugar y tiempo. Con base en esto, es muy probable que las conclusiones derivadas de este trabajo no deban ser consideradas extrapolables en tiempo y lugar. Considerando la gran variabilidad espacio-temporal del Sistema de la Corriente de California en términos estacionales e interanuales, resulta factible que en cada época del año se generen dinámicas físicas, químicas y biológicas que conduzcan a complejas asociaciones entre el metano y el resto de las variables analizadas.

9. CONCLUSIONES.

Con base en la información generada durante este trabajo se concluye lo siguiente:

- No se encontró relación concreta entre los contenidos de metano de las muestras y la masa de agua a la que pertenecieron.
- Durante los meses de abril y julio del 2006 los máximos contenidos de metano se hallaron frecuentemente a la profundidad de la termoclina y en sitios que presentaron plegamientos de la termo- y/o haloclina.
- No se encontró una relación consistente entre el contenido de metano y de clorofila de las muestras analizadas.
- No se encontró una relación clara entre el contenido de metano y de oxígeno de las muestras, sin embargo, fue frecuentemente hallar a los máximos subsuperficiales de metano a la profundidad de la oxiclina.
- Se registraron cambios en la concentración de metano en zonas que presentaron frentes salinos como en la línea 123 (abril) y la 127 y 133 (julio). Estas modificaciones son con respecto a la concentración de metano medida en la periferia, lo cual sugiere que la presencia de estas estructuras tiene cierta influencia sobre la distribución del metano disuelto.
- La concentración de metano máxima y mínima durante este trabajo se registraron en abril. La concentración más elevada fue de 520 nL/L y se encontró en la superficie de la estación 120.30, ubicada frente a la Bahía de Vizcaíno. La más baja (9 nL/L) se observó a 20 metros de profundidad en la estación 123.45, la cual coincidió con un frente salino.

- Durante julio se registró cierta relación inversa entre la concentración de metano y la temperatura. Las muestras que presentaron temperaturas por encima de los 14 °C rara vez exhibieron contenidos de metano superiores a los 100 nL/L. Se considera que la temperatura pudo ser un factor determinante para explicar el porqué de las bajas concentraciones de metano superficiales observadas durante julio en comparación con las registradas en abril.
- Los flujos de metano máximos y mínimos registrados en este trabajo se observaron durante abril y correspondieron a la estación 120.30 con un valor de 52 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$ y -2.12 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$ en la estación 130.55, respectivamente.
- El flujo de metano promedio para toda el área de estudio durante abril fue de 3.9 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$ mientras que para julio fue de 0.3 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ día}$, es decir, existió una variación de un orden de magnitud entre ambos muestreos.
- Durante abril, los flujos de metano mas intensos en dirección al océano se hallaron frecuentemente en zonas donde la capa de mezcla fue profunda (≈ 50 metros). En contraste, la mayoría de las estaciones que presentaron flujos hacia la atmósfera se encontraron situada en zonas donde la capa de mezcla fue somera (≈ 20 metros).

10. REFERENCIAS.

- Aguirre-Hernández, E. G. Gaxiola, Najera-Martínez, S. Baumgartner, T. Kahru y M. Mitchel. 2004. Phytoplankton absorption, photosynthetic parameters and primary production off Baja California: summer and autumn 1998. *Deep Sea Res. II.* 51:799:816.
- Anderson, J. C. 1971. Oxygen analysis. Marine Technician Handbook. Sea Grant Publication No. 9 SIO Ref. No. 71-8 University of California. 29 p.
- Bange, H. U.H. Bartell, S. Rapsomanikis y M.O. Andreae. 1994. Methane in the Baltic and north seas and a reassessment of the marine emissions of methane. *Glob. Biogeochem. Cyl.* 8:465-480.
- Bange, H.W. 2006. Nitrous oxide and methane in European costal waters. *Cont. Shelf. Res.* 70:361-374.
- Barber, T.R., R.A. Burke Jr. y W.M. Sackett. 1988. Diffusive flux of methane from warm wetlands. *Glob. Biogeochem. Cyl.* 2:411-425.
- Berner, U., J. Poggenburg, E. Faber, D. Quadfasel y A. Frische. 2003. Methane in ocean waters of the Bay of Bengal: its sources and exchange with the atmosphere. *Deep Sea Res.* 50:925-950
- Bianchi, M., D. Marty, J.L. Teyslié y S.W. Fowler. 1992. Strictly aerobic and anaerobic bacteria associated with sinking particulate matter and zooplankton fecal pellets. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 88:55-60.
- Brooks, J.M. 1979. Deep methane in the northwest Caribbean Sea: Possible seepage along the Jamaica ridge. *Science* 206:1069-1071.
- Brooks, J. M., D. F. Reid, y B. B. Bernard. 1981. Methane in the upper water column of the northwestern Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.* 86:11029-11040.
- Burke, R. A, F.R. Reid, J.M. Brooks y D.M. Lavoie. 1983. Upper water column methane geochemistry in the eastern tropical North Pacific. *Limnol. Oceanogr.* 28:19:32.
- Capasso, G. y S. Inguaggiato. 1998. A simple method for determination of dissolved gases in natural waters. An application to thermal waters from Vulcano island. *Appl. Geochem* 13:631:642.
- Carr, M.E. 2002. Estimation of potential productivity in eastern boundary currents using remote sensing. *Deep sea Res. II.* 49:59-80.
- Castro-Morales, C. 2005. Metano disuelto en el sur de la cuenca de las Californias, frontera México-E.U.A a Bahía Todos Santos, B.C. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Baja California. 120 p.

- Cepeda-Morales, J. C. A. 2004. Aplicación de un modelo para estimar la producción primaria por sensores remotos en la región sur de la Corriente de California: evaluación y consideraciones. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Baja California 85 p.
- Chavez-de-Ochoa, M.C. 1976. Algunas condiciones de surgencias durante la primavera de 1974, para el área adyacente a Punta Banda, Baja California. *Cienc. Mar.* 2:111-124.
- Chelton, D.B. 1982. Large scale response of the California current to forcing by the wind stress curl. CalCOFI Rep., Vol. XXIII.
- Cline, J.D., C.N. Katz y K. Kelly-Hansen. 1986. Seasonal cycles of dissolved methane in the southeastern Bering Sea. *Org. Mar. Chem.* A.C.S symposium series 273-296.
- Collins, A. 2004. Ocean circulation. The Open University. Segunda edición. 286 p.
- Conrad, R. y W. Seiler. 1988. Methane and hydrogen in seawater (Atlantic Ocean). *Deep Sea Res.* 35:1903-1917.
- De Angelis, M. A. y C. Lee. 1994. Methane production during zooplankton grazing on marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* 39:1298-1308.
- Dimitrov, L.I. 2002. Mud volcanoes: the most important pathway for degassing deeply-buried sediments. *Earth Scienc. Rev* 59 (1-4) 49-76.
- Dunson, W.A. y G.W. Ehlert. 1971. Effects of temperature, salinity and surface water flow on the distribution of sea snake *Pelamis*. *Limnol. Oceanogr.* 16:845-853.
- Durazo, R. y T.R. Baumgartner. 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997-1999. *Progr. Oceanogr.*, 54, 7 – 31.
- Durazo, R., T.R. Baumgartner, S.J. Bograd, C.A. Collins, S. De la Campa, J. Garcia, G. Gaxiola-Castro, A.Huyer, K.D. Hyrenbach, D. Loya, R. J. Lynn, F.B. Schwing, R.L. Smith, W.J. Sydeman y P. Wheeler. 2001. The state of the California current, 2000-2001: a third straight La Niña year. CalCOFI Rep., Vol.42.
- Durazo, R., G. Gaxiola-castro, B. Lavaniegos, R. Castro-Valdez, J. Gómez-Valdez y A. Da S. Mascarenhas Jr. 2005. Oceanographic conditions west of the Baja California coast, 2002–2003: A weak El Niño and subarctic water enhancement. *Cienc. Mar.* 31:537–552.
- Fiedler, P.C. y L. D. Talley. 2006. Hydrography of the Eastern Tropical Pacific: A review. *Progr. Oceanogr.* 69:143-180.
- Fuglister R.C.1972. Cyclonic rings formed by the Gulf Stream 1965-1966. En Gordon, A. (ed). *Studies in physical oceanography: A tribute to George Wust*. Gordon and Breach NY. 137-168.

- Goericke, R., E. Venrick, A. Mantyla, R. Hoof, B.E. Lavaniegos, S. Bograd, F. Schwing, W. Peterson, A. Huyer, R. Smith, P. Wheeler, G. Gaxiola-Castro, D. Hyrenbach, W. Sydeman y J. Gómez-Valdez. 2005. The state of California current, 2003-2004: a rare "normal" year. *Reporte CalCOFI*. Vol. 45. 27-59 p.
- Gómez-Valdéz, J. 1983. Estructura hidrográfica promedio frente a Baja California. *Cienc Mar*. 9:75-86.
- Hernández de la Torre, B, G. Gaxiola-Castro y S. Nájera-Martínez. 2004 Efectos del ENSO en la productividad primaria frente a Baja California. *Cienc. Mar*. 30:427-441.
- Holmes, M.H., F.J. Sansone, T. M., Rust y B. N. Popp. 2000. Methane production, consumption and air-sea exchange in the open ocean: An evaluation based on carbon isotopic ratios. *Glob. Biogeochem Cycl*. 14:1-10.
- Hopkinson, B.M y K.A. Barbeau. 2007. Organic and redox speciation of iron in the eastern tropical North Pacific suboxic zone. *Mar. Chem* 106:2-17.
- Iselin, C.1936. A study of the circulation on the western North Atlantic. *Pap. Phys. Oceanogr. Met*. 4:101.
- Jerónimo, G. y J. Gómez-Valdés. 2007. A subsurface warm-eddy off northern Baja California in July 2004. *Geophys. Res. Lett*. 34: L06610
- Johnson, K.M., J.E. Hughes, P.L. Donaghay y J. McN. Sieburth. 1990. Bottle-calibration static head space method for determination of methane dissolved in seawater. *Analit. Chem* 62:2408:2412.
- Judd, A.G., M. Hovland, L.I. Dimitrov, S. García-Gil V. Jukes. 2002. The geological methane budget at continental margins and its influence on climate change. *Geofluids* 2:109-126.
- Kelley, C.A. y W.H. Jeffery. 2002. Dissolved methane concentration profiles and air-sea fluxes from 41°S to 27°N. *Glob. Biogeochem Cycl*. 16:13-1-13-6.
- Lamontagne, R.A., W.D. Smith y J.W. Swinnerton. 1975. C₁-C₃ hydrocarbons and chlorophyll a concentrations in the equatorial Pacific Ocean. En T. R. Gibb (ed.). *Analytical methods in oceanography. Am Chem Soc*
- Lavaniegos, B.E., G. Gaxiola-Castro, L.C. Jiménez-Pérez, M.R. González-Esparza, T. Baumgartner y J. García-Cordova. 2003. 1997-98 EL NIÑO effects on the pelagic ecosystems of the California Current off Baja California, México. *Geofis. Internac*. 42:483:494.
- Lay, D.Y. y P.L. Richardson. 1977. Distribution and movements of Gulf Stream rings. *J. Phys. Oceanogr*. 7:670-683.

- Levin, L.A. 2003. Oxygen minimum zone benthos: adaptation and community response to hypoxia. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 41:1-45.
- Levipan, H.A., R.A. Quiñones, H.E. Johansson y H. Urrutia. 2007. Methylootropic methanogens in the water column of an upwelling zone with strong oxygen gradient off central Chile. *Microbes Environ.* 22:268-278.
- Lynn, R.J. y J.J. Simpson. 1987. The California current system: The seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.* 92:12947:12966.
- Marty, D.G. 1993. Methanogenic bacteria in seawater. *Limnol. Oceanogr.* 38:452-456.
- Marty, D., P. Bonin, V. Michotey y M. Bianchi. 2001. Bacterial biogas production in coastal systems affected by freshwater inputs. *Cont. Shelf Res.* 21:2105:2115.
- McAuliffe, C. 1971. GC determination of solutes by multiple phase equilibration. *Chem. Tech.* 1:46-51.
- Nauhaus, K., M. Albrecht, M. Elvert, A. Boetius y F. Widdel. 2007. In vitro cell grown of the marine archaeal-bacterial consortia during anaerobic oxidation of methane with sulfate. *Environment. Microbiol.* 9:187-196.
- Oremland, R.S. 1979. Methanogenic activity in plankton samples and fish intestines: A mechanisms for in situ methanogenesis in oceanic surface waters. *Limnol. Oceanogr.* 24:1136-1141.
- Oropeza-Rosales, F. 1998. Descripción del clima de oleaje para las costas mexicanas del océano Pacífico en los estados de Baja California, Colima, Michoacán y Guerrero. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California (UABC). 225 p.
- Oudot, C. P. Jean-Baptiste, E. Fourre, C. Mormiche, M. Guevel, J.F. Ternon y P. Le Corre. 2002. Transatlantic equatorial distribution of nitrous oxide and methane. *Deep Sea Res. I.* 49:1175-1193.
- Owen, R.W. 1980. Eddies of the California Current system: Physical and ecological characteristics. En Power, D.M. (Ed.) 1980. The California islands: Proceedings of a multidisciplinary symposium. Santa Barbara Museum of Natural History. 237-265 p.
- Owen, R.W. 1981. Fronts and eddies in the sea: Mechanisms, interactions and biological effects. En Longhurst A.R. (Ed.). 1981. Analysis of marine ecosystems. Academic Press. 197-228 p.
- Pak, H. y J.R.V. Zeneveld. 1974. Equatorial front in the eastern Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.* 4:570-578.
- Piontkovsy, S.A., R. Williams, W. Peterson y V.K. Kosniriev. 1995. Relationship between oceanic mesozooplankton and energy of eddy fields. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 128:35-41.

- Ramírez-Manguilar, A.M. 2005. Variabilidad estacional e interanual en el sistema de la Corriente de California frente a la costa de Baja California, México. Tesis de maestría. 107 p.
- Reeburgh, W.S. 2007. Oceanic methane biogeochemistry. *Chem Rev* 107: 486-531.
- Reid, J.L. Jr., G.I. Roden y J. G. Wyllie. 1958. Studies of the California Current System. *Progr. Rep. CalCOFI* Contribution from the Scripps institution of oceanography, new series No. 998. 28-56 p.
- Richardson, P.L. 1980. Gulf Stream ring trajectories. *J. Phys. Oceanogr.* 10:90-104.
- Richardson, P.L. 1983. Gulf Stream rings. En Robinson A.R. (ed). 1983. Eddies in marine sciences. Springer-Verlag. 19-45 p.
- Roden, G. I. 1971. Aspects of the transition zone in the Northeastern Pacific. *J. Geophys. Res.* 76:3462-3475.
- Roesler, C. S. y D.B. Chelton. 1987. Zooplankton variability in the California current, 1951-1982. *CalCOFI Rep.*, Vol. XXVIII.
- Roemmich, D. 1989. Mean transport of mass, heat, salt and nutrients in southern California coastal waters: implications for primary production and nutrient cycling. *Deep Sea Res.* 36:1359-1378.
- Sansone, F.J., B.N. Popp, A.Gasc, A.W. Graham y M. Terri. 2001. Highly elevated methane in the eastern tropical North Pacific and associated isotopically enriched fluxes to the atmosphere. *Geophys. Res. Lett.* 28:4567- 4570.
- Sansone, F. J., A. W. Graham y W. M. Berelson. 2004. Methane along the western Mexican margin *Limnol. Oceanogr.* 49:2242-2255.
- Sarmiento, J.L., T.D. Hebert y J.R. Toggweiler. 1998. Causes of anoxia in the world ocean. *Glob. Biogeochem. Cycl.* 2:115-128.
- Sieburth, J. McN. 1987. Contrary habitats for redox-specific processes: Methanogenesis in oxic waters and oxidation in anoxic waters. En *Microbes in the sea*. M.A. Sleight (ed.). 11-38.
- Sieburth, J. McN. 1993. G_1 bacteria in the water column of Chesapeake Bay, USA. I. Distribution of sub-populations of O_2 -tolerant, obligately anaerobic, methylotrophic methanogens that occur in microniches reduced by their bacterial consorts. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 95:67-80.
- Sieburth, J.McN. y P.L. Donaghay. 1993. Planktonic methane production and oxidation within the algal maximum of the pycnocline: seasonal fine-scale observations in an anoxic estuarine basin. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 100:3-15.

- Smith, R.L. 1968. Upwelling. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev* 6:11-46.
- Soto-Mardones, L., A. Pares-Sierra, J. Garcia, R. Durazo y S. Hormazabal (2004) Analysis of the mesoscale structure in the IMECOCAL region (off Baja California) from hydrographic, ADCP and altimetry data. *Deep Sea Res. II*, 51, 785-798.
- Sverdrup, H.V., M.W. Johnson y R.H. Fleming. 1942. The oceans. Prentice-Hall Inc. 1087 p.
- Tsurushima, N. S. Watanabe y S. Tsunogal. 1996. Methane in the East China Sea water. *J. Oceanog* 52:221-233.
- Tyler, S.C. 1991. The global methane budget. En: Rogers, J.E., Whitman W.B. (Eds.). Microbial production and consumption of green gases: methane, nitrogen oxides, and halomethanes. American society for microbiology, Washington. 7-38 pp.
- Upstill-Goddard, R.C. 2006. Air-sea exchange in costal zone. *Estuar. Coast. Shelf Scienc* 70: 388-404.
- Valentine, D.L, y W.S. Reeburgh. 2000. New perspectives on anaerobic methane oxidation. *Envirom Microbiol*. 2:477-484.
- Venrick, E. L. y T. L. Hayward. 1984. Determining chlorophyll on the 1984 CalCOFI surveys, Calif. Coop. Ocean. Fish. Invest. Rep., 25, 74-79.
- Venrick, E., S.J. Bograd, D. Checkley, R. Durazo, G. Gaxiola-Castro, J. Hunter, A. Huyer, K.D. Hyrenbach, B. E. Lavaniegos, A. Mantyla, F.B. Schwing, R. L. Smith, W.J. Sydeman y P.A. Wheeler. 2003. The state of the California Current, 2002-2003: tropical and subartic influence vie for dominance. CalCOFI Rep., Vo. 44.
- Ward, B.B. 1992. The subsurface methane maximum in the southern California Bight. *Cont. Shelf Res*. 12:735:752.
- Wakeham, S.G., C. M. Lewis, E. C. Hopmans, S. Schouten, y J. S. Sinninghe-Damsté. 2003. Archaea mediate anaerobic oxidation of methane in deep euxinic waters of the Black Sea. *Geochim et Cosmochim Acta*. 67:1359-1374.
- Wakeham, S.G., E. C. Hopmans, S. Schouten, J. S. Sinninghe-Damsté. 2004. Archaeal lipids and anaerobic oxidation of methane in euxinic water columns: a comparative study of the Black Sea and Cariaco Basin. *Chem Geol*. 205:427- 442.
- Wanninkhof, R. 1992. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *J. Geophys. Res*. 97:7373-7382.
- Weisenburg, D.A. y N.L. Guinasso Jr. 1979. Equilibrium solubilities of methane, carbon monoxide, and hydrogen in water and sea water. *J. Chem Eng Dat*. 24:356:360.

- Whiticar, M.J. 1996. Isotope tracking of microbial methane formation and oxidation. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* 25:39-54.
- Whiticar, M. J. 1999. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chemical Geology* 161:291-314.
- Wooster, W.S. y Jones J.H. (1970). California undercurrent off northern Baja California. *J. Mar. Res.* 28:235:250.
- Wooster, W.S y J.L. Reid Jr. 1960. Eastern boundary currents. En Hill M.N. (ed) *The sea*. Vol. 2. Cap. 11. Interscience publishers. 253-277 pp.
- Yoshida, K. 1958. A study of upwelling. *Oceanogr.* 16:73-76.
- Zárate-Vidal, S.E. 1991. Oceanografía geológica de la costa occidental de Baja California. En De la Lanza-Espino, G. (ed.). 1991 *Oceanografía de mares mexicanos*. 248-252.

ANEXO I. Constantes para la determinación del coeficiente de Bunsen (β) para metano (Weisenburg y Guinasso, 1979).

Constante	
A ₁	-68.8862
A ₂	101.4956
A ₃	28.7314
B ₁	-0.076146
B ₂	0.04397
B ₃	-0.0068672

ANEXO II Constantes para la determinación de la concentración de metano en una muestra de agua que se encuentre en equilibrio con la atmósfera (Weisenburg y Guinasso, 1979).

Constante	nL/L	nmol/L
A ₁	-412.171	-415.2807
A ₂	596.8104	596.8104
A ₃	379.2599	379.2599
A ₄	-62.0757	-62.0757
B ₁	-0.05916	-0.05916
B ₂	0.032174	0.032174
B ₃	-0.0048198	-0.0048198
F _g *	1.775 x 10 ⁻⁶	

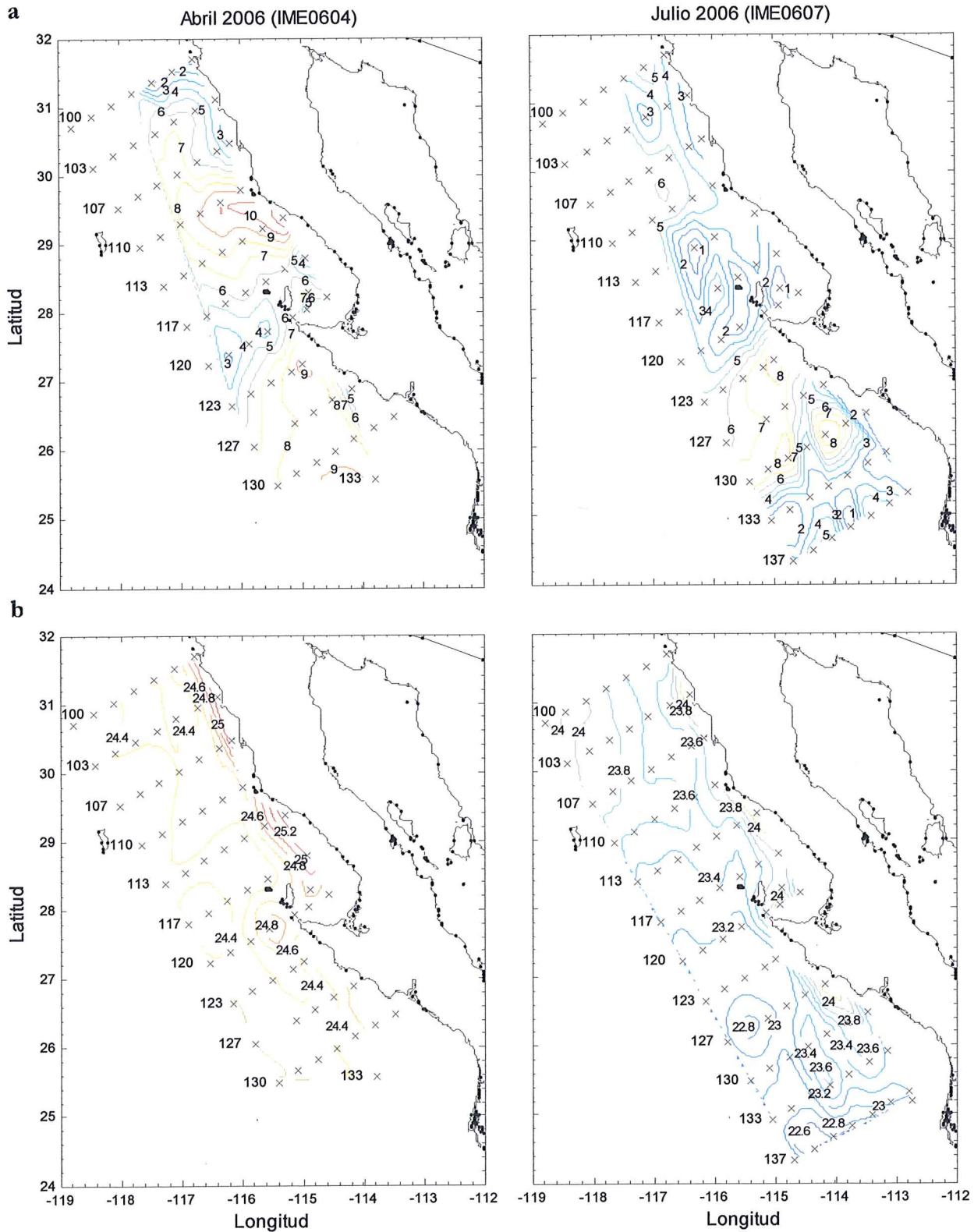
* Fracción molecular atmosférica promedio del metano (Sansone *et al.*, 2004).

ANEXO III. Estaciones que presentaron una profundidad de fondo cercana a la profundidad máxima de los muestreos.

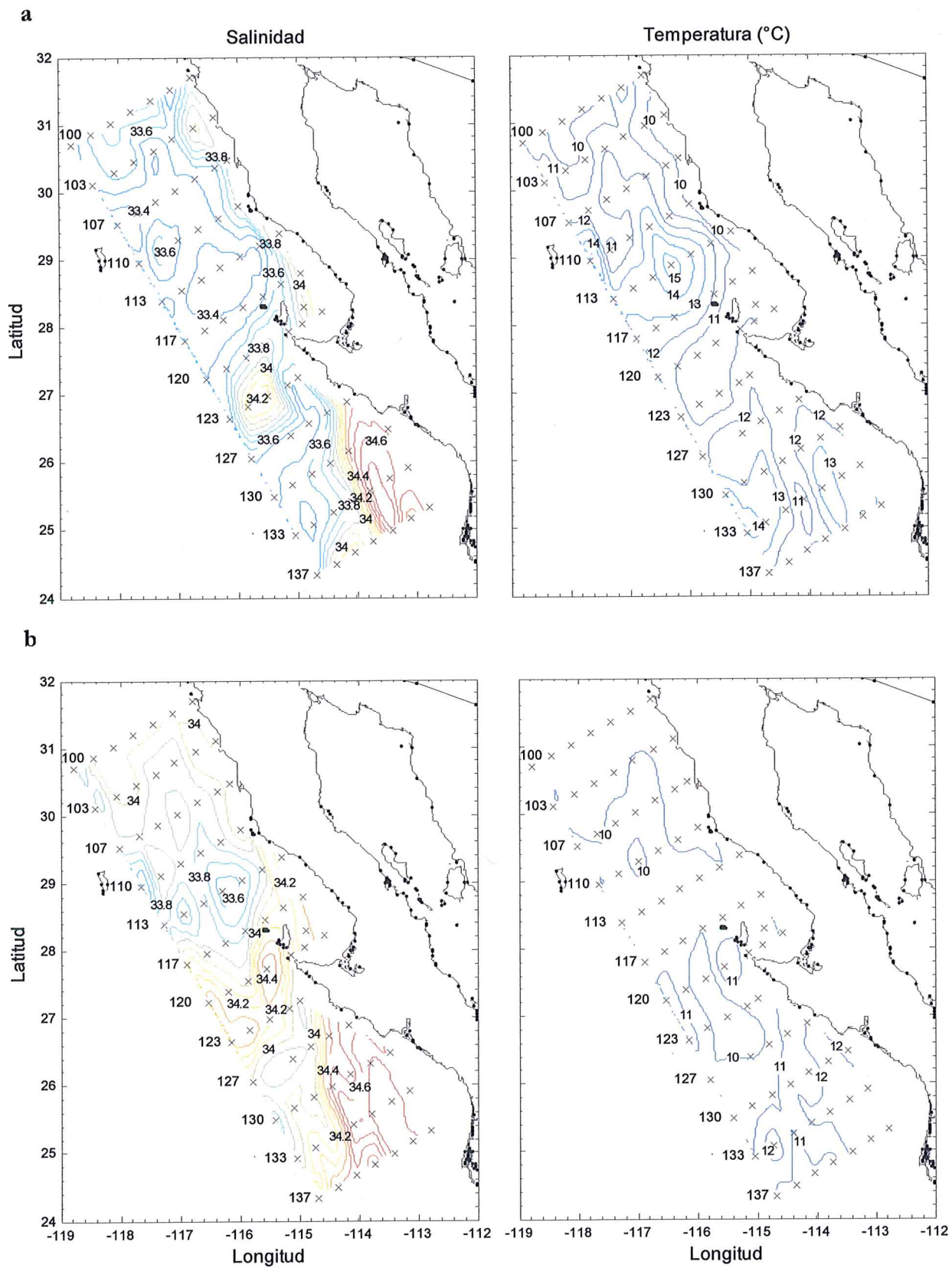
Estación *	Profundidad del fondo (m)	Profundidad máxima de muestreo (m)	Diferencia entre ambas profundidades
103.30	67	50	17
113.30	62	20	42
113.30 (julio)	62	50	12
117.30	105	95	10
117.35	196	180	16
119.33	116	100	16
120.30	98	93	5
120.35	84	80	4
120.39	44	30	14
127.35	98	50	48

* Estaciones donde no se especifica el muestreo corresponden al mes de abril.

ANEXO IV. Velocidad del viento y campo de densidad superficial durante abril y julio del 2006. a, velocidad del viento (m/s); b, campo de densidad (σ_t).



Anexo V. Contornos de salinidad y temperatura (°C) a las profundidades de: a), 100 metros; y b), 150 metros para el muestreo IME0607 (julio 2006).



ANEXO VI. Factores de conversión útiles

- Conversión de nL/L en condiciones STP a nmol/L

$$PV=nRT \text{ (ley de los gases ideales)}$$

$$n/V=P/RT$$

$$n/V=1/(0.082053 * 273.2 \text{ °K})$$

$$n/V=1/22.41$$

$$n/V=0.0446$$

$$[\text{nL/L}] \times 0.044 = \text{nmol/L}$$

- Conversión de $\mu\text{moles/m}^2 \text{ día}$ a $\text{mg/m}^2 \text{ año}$

μmol	1 mol	16 gramo	1000 mg	365 días
Día	$1 \times 10^6 \mu\text{mol}$	1 mol CH_4	1 gramo	1 año

Factor de conversión resultante: $5.84 * \mu\text{moles/m}^2 \text{ día} = \text{mg/m}^2 \text{ año}$

- Conversión de $\mu\text{moles/m}^2 \text{ día}$ a $\text{Kg/Km}^2 \text{ año}$

μmol	1 mol	16 gramos	1 Kg	365 días	$1 \times 10^6 \text{ m}^2$
$\text{m}^2 \text{ Día}$	$1 \times 10^6 \mu\text{mol}$	1 mol CH_4	1000 gramos	1 año	1 Km^2

Factor de conversión resultante: $5.84 * \mu\text{moles/m}^2 \text{ día} = \text{Kg/Km}^2 \text{ año}$