CENTRO DE INVESTIGACION
CIENTIFICA Y DE
EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA

ANALISIS VOLUMETRICO DE LAS MASAS DE AGUA DEL GOLFO DE CALIFORNIA

TESIS
MAESTRIA EN CIENCIAS

ERNESTO TORRES OROZCO

ENSENADA,BAJA CALIFORNIA,MEXICO.JUNIO DE 1993

RESUMEN de la tesis de Ernesto Torres Orozco presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en OCEANOGRAFIA con opción en OCEANOGRAFIA FISICA. Ensenada, Baja California, México. Marzo de 1993.

ANALISIS VOLUMETRICO DE LAS MASAS DE AGUA DEL GOLFO DE CALIFORNIA.

Resumen aprobado por:

M.C. José Ma. Robles Pacheco.
Director de Tesis.

Usando el método descrito por Montgomery (1955) y Carmack (1973) y datos hidrográficos que cubren el período 1939-1986, se realiza, en términos volumétricos, una cuantificación de las masas de agua presentes en el Golfo de California. Los intervalos característicos de temperatura y salinidad son redefinidos en base a la información hidrográfica y a una revisión bibliográfica, y se describe la variación volumétrica espacial y temporal de cada masa de agua. En el promedio anual, más del 70% del volumen total del Golfo de California es ocupado por las masas de agua más profundas: el Agua Intermedia del Pacífico (AIP) contribuye con el 33% y el Agua Profunda del Pacífico (APP) con el 41%. El volumen restante es ocupado por tres masas de agua, de éste, el 19% corresponde al Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt), el 6% al Agua del Golfo (AGC) y el 1% al Agua Superficial Ecuatorial (ASE). El Agua de la Corriente de California (ACC) no es detectada en el análisis volumétrico, lo que sugiere que su volumen es muy pequeño o nulo.

Se muestran evidencias de que la formación del agua del G. de C. puede ocurrir durante todo el año, no sólo en el Golfo Norte por enfriamiento, evaporación y convección vertical durante invierno-primavera, sino que también durante verano-otoño, probablemente por calentamiento solar y evaporación en otras regiones someras del Golfo, principalmente frente a las costas de Sonora, desde I. Tiburón hacia el Norte y aún sobre la plataforma somera y relativamente amplia del Sur de Sonora. Sin embargo, el volumen de AGC de origen "Sureño", junto con el de AGC transportada desde la Región Norte del Golfo (RNG), es pequeño en comparación al de otras masas de agua con las que se puede mezclar en la vecindad de la boca del Golfo (ASE, ASsSt y ACC), por lo que el AGC no ejerce mucha influencia fuera del Golfo de California.

En la región de las grandes islas se detecta AGC y ASsSt sólamente, siendo dominante todo el año el ASsSt. Esto sugiere que el ASsSt sobrepasa el umbral Salsipuedes-Tiburón, donde puede mezclarse sólamente con AGC. Esta agua mezclada sobre el umbral puede hundirse y llenar las cuencas más profundas de la RNG, o ser transportada hacia el Sur. En este último caso, superficial o subsuperficialmente dependiendo de la intensidad de mezcla y de la invasión al Golfo de otras masas de agua superficiales menos densas, particularmente del ASE. Este proceso puede contribuir significativamente a la renovación del agua de las cuencas más profundas de la RNG; también a la alta productividad biológica del Golfo de California, por acarreo a la capa superficial de nutrientes inorgánicos del ASsSt, y su dispersión en el Golfo por advección horizontal.

Aunque el volumen relativo de ASE es pequeño, muestra un incremento estacional de invierno a otoño, consistente con el período de intensificación de la Contracorriente Ecuatorial y del flujo al Norte de la Corriente Costera de Costa Rica. El volumen

máximo de ASE y su mayor penetración hacia el interior del Golfo fué observada durante marzo y octubre de 1983. Esta anomalía positiva en el volumen de ASE es asociada con el evento 1982-83 de El Niño/Oscilación del Sur.

Tanto el AIP como el APP no muestran variaciones estacionales apreciables en términos volumétricos. Su distribución espacial se restringe al Sur del umbral Salsipuedes-Tiburón, asociada el AIP con la isóbata de 500 m y el APP con la de 1200 m.

TESIS DEFENDIDA POR: **ERNESTO TORRES OROZCO**

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITE:

M.C. JOSE MA. ROBLES PACHECO.- Director del Comité

DRA. MA. LUISA ARGOTE ESPINOZA.- Miembro de Comité

DR. SAUL ALVAREZ BORREGO.- Miembro del Comité

M.C. VICTOR WONG ORTEGA.- Miembro del Comité

M.C. JESUS MANUEL FIGUEROA RODRIGUEZ.- Miembro del Comité

M.C. LUIS GUSTAVO ALVAREZ SANCHEZ.- Jefe Depto. Oceanografía Física

DR. LUIS EDUARDO CALDERON AGUILERA.- Director de Estudios de Posgrado

22 DE MARZO DE 1993

CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA

DIVISION DE OCEANOLOGIA
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA FISICA

ANALISIS VOLUMETRICO DE LAS MASAS DE AGUA DEL GOLFO DE CALIFORNIA

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS presenta :

ERNESTO TORRES OROZCO

Ensenada, Baja California, marzo de 1993

DEDICATORIA

A la memoria de mi Tere y mi Papá Toño (abuelitos), con quienes no pude compatir sus últimos tres años de vida.

A mis Papás, Ing. Antonio Torres y Dolores Orozco, por todo su apoyo, consejos y motivación para salir adelante. Si bien los triunfos son importantes, el contar con ustedes lo es más.

A mis hermanos, Lety, Paty, Lorena, Toño, Lolita (Q.E.P.D.), Miriam y a todos mis sobrinos y tios.

A mi abuelita Tita e hijos.

A Lulú por apoyarme siempre y en los momentos más difíciles, así como a toda su familia.

AGRADECIMIENTOS

Al M. en C. José Ma. Robles P. por su magnífica dirección, comentarios, sugerencias y apoyo brindado hasta la culminación de este trabajo.

Al M. en C. Manuel Figueroa, al Dr. Saúl Alvarez Borrego, a la Dra. María Luisa Argote y al M. en C. Victor Wong por sus comentarios y revisiones que ayudaron a mejorar este trabajo.

Al Lic. Fernando Moreno Peña, Rector de la Universidad de Colima (U de C), por las facilidades y apoyo brindado durante todo este tiempo.

Al Ing. Lorenzo Hernández Arreguín, Secretario General de la U de C, por su apoyo y sugerencias.

A la Lic. Sara Lourdes Cruz I., Secretaria Técnica de la U de C., por su apoyo.

A la Facultad de Ciencias Marinas de la U de C por todo su apoyo, en especial a la administración del M. en C. Juan Carlos Chávez C.

Al Dr. Pedro Ripa y al Dr. Antonio Badan Dangon por sus comentarios y sugerencias.

A Carlos López Famozo por su asesoría para el uso de los paquetes de graficado y procesadores de textos del sistema SUN.

A Yolanda Cuellar, Raúl Hazas y Luis Villaseñor por su apoyo en el sistema PRIME.

Al M. en C. Manuel Mancilla por facilitarme algunos de los programas empleados en este trabajo, así como por sus comentarios y sugerencias.

Al personal de la biblioteca de CICESE por conseguir parte del material bibliográfico empleado en este trabajo.

A José Ma. Dominguez por la elaboración de la figura No. 1

Al personal de CICESE que ha colaborado en la formación del banco de datos oceanográficos del Golfo de California.

Al CONACyT por el apoyo economico otorgado durante mis estudios.

Al CICESE por todo su apoyo.

A Lina Zuñiga y Julieta Castro por su amistad y ayuda brindada durante este tiempo.

A mis compañeros de generación y amigos, Marcos, Cristobal, Hugo , Manolo, Roberto, Luis Z., Lulú T., Sonia, Leonardo, Pepe, Emilio B., Margarita, Laquel, Osunac, Alejandro, Modesto, Gaby, Carolina, CTorres, Rosario, Jorge Z., Benjamín , Rigo, Fernando M., Gilberto , Joaquin, Chava, Victor G. y demás compañeros y amigos que por las prisas no he nombrado.

A todo el personal de Recursos Humanos y departamentos anéxos, por su estimación.

A Chuyita, Margarita Jauregui y Luci, por su amistad.

Al personal de Oceanografía Física, investigadores , técnicos y secretarias con quienes conviví durante mi permanencia en CICESE.

A Lupillo , Don Ruben V. y secretarias por su amistad y café vespertino.

A todas las personas que de alguna forma me ayudaron en la realización de este trabajo y durante mis estudios en CICESE.

GRACIAS.

CONTENIDO

	Página
I INTRODUCCION	1
I.1 Presentación del estudio	1
II ANTECEDENTES	3
II.1 Area de estudio	3
II.2 Circulación	5
II.3 Condiciones hidrográficas	7
II.4 Masas de agua	10
II.5 Análisis volumétrico	14
III OBJETIVOS	17
IV DATOS Y METODOS	18
IV.1 Datos	18
IV.1.1 Banco de datos	18
IV.1.2 Perfiles promedio de temperatura y salinidad	18
IV.2 Cálculos volumétricos	24
V RESULTADOS	28
V.1 Caraterización de las masas de agua del Golfo de California	29
V.2 Análisis volumétrico : Estimación del promedio anual	34
V.3 Análisis volumétrico estacional	40
V.4 Efectos de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)	56
VI DISCUSIONES	61
VI.1 Intervalos T-S de las masas de agua	61
VI.2 Análisis volumétrico	64
VII CONCLUSIONES	73
LITERATURA CITADA	76

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Golfo de California. Se muestran las isóbatas de 100, 1000 y 2000 m.	4
2	Distribución de las estaciones oceanográficas y de la malla de trabajo dentro del Golfo de California. La línea A-B. indica la posición de las secciones mostradas en las figuras 5 , 6 y 16 .	20
3	Malla de trabajo sobre el Golfo de California empleada para la realización del análisis volumétrico . En cada celda se indica el número de ances empleados para obtener el perfil promedio T,S correspondiente.	23
4	Ilustración de los términos empleados en los cálculos volumétricos. a) intervalos bivariantes T, S: b) volumen parcial (Vp), profundidad promedio de ocurrencia (Zo), espesor de influencia (E) y factor de área superficial (F) de la celda.	25
5	Sección longitudinal de salinidad (‰) para los meses de febrero (a), mayo (b), agosto (c), octubre (d). Las secciones representan promedios mensuales obtenidos con la información del banco de datos (1939-1986).	30
6	Sección longitudinal de temperatura (°C) para los meses de febrero (a), mayo (b), agosto (c), octubre (d). Las secciones representan promedios mensuales obtenidos con la información del banco de datos (1939-1986).	31
7a	Rasgos distintivos de cada masa de agua presente en el Golfo de California. Los datos correponden al crucero B/I AGASSIZ tomados en abril de 1970.	33
7b	Diagrama T-S obtenido a partir de la información empleada del banco de datos (1939-1986) del Golfo de California. Se muestran los intervalos de temperatura y salinidad redefinidos en este trabajo para las masas de agua identificadas dentro del área de estudio. Estas son : Agua del Golfo de California (AGC) , A. Superficial Ecuatorial (ASE), A. de la Corriente de California (ACC) , A. Subsuperficial Subtropical (ASsSt), A. Intermedia del Pacífico (AIP) y A. Profunda del Pacífico (APP) .	35

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
8	Diagrama volumétrico (a) y profundidad promedio (b) en intervalos bivariantes (0.5 ° C , 0.1 ‰) para el Golfo de California correspondiente al año medio 1939-1986. Las sumas en la parte superior y derecha de la figura (a) describen las distribuciones de salinidad y temperatura respectivamente. El volumen procesado corresponde a 111,400 Km^3 distribuidos en 219 clases bivariantes, 48 univariantes de temperatura y 15 de salinidad.	36
9	Distribución promedio anual (1939-1986) de la proporción de las masas de agua : a- Golfo de California (AGC) , b- Subsuperficial Subtropical (ASsSt), c- Intermedia del Pacífico (AIP), d- Profunda del Pacífico (APP) y e- Superficial Ecuatorial (ASE) .	38
10	Diagrama volumétrico (a) y profundidad promedio (b) en intervalos bivariantes (0.5 ° C , 0.1 ‰) para el Golfo de California correspondiente a la época de invierno. Las sumas en la parte superior y derecha de la figura (a) describen las distribuciones de salinidad y temperatura respectivamente. El volumen procesado corresponde a 111,400 Km^3 distribuidos en 161 clases bivariantes, 43 univariantes de temperatura y 13 de salinidad.	41
11	Diagrama volumétrico (a) y profundidad promedio (b) en intervalos bivariantes (0.5 ° C , 0.1 ‰) para el Golfo de California correspondiente a la época de primavera. Las sumas en la parte superior y derecha de la figura (a) describen las distribuciones de salinidad y temperatura respectivamente. El volumen procesado corresponde a 111,400 Km^3 distribuidos en 164 clases bivariantes, 45 univariantes de temperatura y 12 de salinidad.	42
12	Diagrama volumétrico (a) y profundidad promedio (b) en intervalos bivariantes (0.5 ° C , 0.1 ‰) para el Golfo de California correspondiente a la época de verano. Las sumas en la parte superior y derecha de la figura (a) describen las distribuciones de salinidad y temperatura respectivamente.. El volumen procesado corresponde a 111,400 Km^3 distribuidos en 269 clases bivariantes, 57 univariantes de temperatura y 14 de salinidad.	43

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
13	Diagrama volumétrico (a) y profundidad promedio (b) en ntervalos bivariantes (0.5 ° C , 0.1 ‰) para el Golfo de California correspondiente a la época de otoño. Las sumas en la parte superior y derecha de la figura (a) describen las distribuciones de salinidad y temperatura respectivamente. El volumen procesado corresponde a 111,400 Km^3 distribuidos en 262 clases bivariantes, 55 univariantes de temperatura y 14 de salinidad.	44
14a	Variación estacional de las masas de agua del Golfo de California.	46
14b	Anomalías de la proporción estacional de las masas de agua Golfo de California (AGC), Superficial Ecuatorial (ASE), Subsuperficial Subtropical (ASsSt), Intermedia del Pacífico (AIP) y Profunda del Pacífico (APP). El recuadro en el interior de la gráfica indica el símbolo asociado a cada masa de agua.	46
15	Distribución de la masa de agua del Golfo de California (AGC) durante invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) en el Golfo de California.	48
16	Variación estacional de la profundidad de las masas de AGC y ASsSt a lo largo del Golfo de California (a) y su variación estacional respecto al promedio anual (b). La ubicación de esta sección logitudinal se muestra en la figura 2.	50
17	Distribución de la masa de agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) durante invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) en el Golfo de California.	51
18	Distribución de la masa de agua Intermedia del Pacífico (AIP) durante invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) en el Golfo de California.	53
19	Distribución espacial de la masa de agua Profunda del Pacífico (APP) durante invierno (a), primavera (b) , verano (c) y otoño (d) en el Golfo de California.	54

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
20	Distribución espacial de la masa de agua Superficial Ecuatorial (ASE) durante invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) en el Golfo de California.	55
21	Diagrama volumétrico (a) y profundidad promedio (b) en intervalos bivariantes (0.5 ° C , 0.1 ‰) para el Golfo de California correspondiente a marzo de 1983. Las sumas en la parte superior y derecha de la figura (a) describen las distribuciones de la salinidad y temperatura respectivamente. El volumen procesado corresponde a 50,000 Km^3 distribuidos en 134 clases bivariantes, 43 univariantes de temperatura y 8 de salinidad.	57
22	Diagrama volumétrico (a) y profundidad promedio (b) en intervalos bivariantes (0.5 ° C , 0.1 ‰) para el Golfo de California correspondiente a marzo de 1984. Las sumas en la parte superior y derecha de la figura (a) describen las distribuciones de la salinidad y temperatura respectivamente. El volumen procesado corresponde a 50,000 Km^3 distribuidos en 1115 clases bivariantes, 40 univariantes de temperatura y 8 de salinidad.	57
23	Distribución de la proporción de la masa de agua Superficial Ecuatorial (ASE) en marzo de 1984 y marzo de 1983 en el Golfo de California (a) y su volumen asociado (b) en el promedio mesual (P.mens), promedio anual (P.anual) , marzo de 1984 (Marzo-84), marzo de 1983 (Marzo-83) , octtubre de 1983 (oct-83) y en las cuatro estaciones climáticas. El volumen está normalizado con respecto a oct-83 (3580 km^3)	60

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Características T-S de las distintas masas de agua del Golfo de California según varios autores. La nomenclatura es como sigue : AGC- Agua del Golfo de California ; ACC- Agua de la Corriente de California ; ASsSt - Agua Subsuperficial Subtropical ; AIP- Agua Intermedia del Pacífico ; APP- Agua Profunda del Pacífico ; AST - Agua Superficial Tropical. Otros nombres con los que se les refiere se muestran entre paréntesis.	15
II	Lista de cruceros hidrográficos dentro del Golfo de California por mes que integran este estudio. Las letras C y B se refieren a datos de CTD y botellas respectivamente. En la columna cuatro se tiene el total de cruceros (Cr) y archivos (A) para cada mes.	19
III	Relación de perfiles promedio de temperatura y salinidad obtenidos para cada mes , el porcentaje de área cubierta y el volumen calculado (Km^3) así como el porcentaje que estos representan respecto al volumen total del Golfo.	22
IV	Proporción de las masas de agua del Golfo de California para el año medio 1939-1986.	37
V	Resultados obtenidos del análisis volumétrico para cada una de las estaciones climáticas. Se muestra el volumen de cada una de las masas de agua presentes para cada época en términos porcentuales, así como su profundidad promedio de ocurrencia (Z).	45

ANALISIS VOLUMETRICO DE LAS MASAS DE AGUA DEL GOLFO DE CALIFORNIA

I INTRODUCCION

I.1 Presentación del estudio.

El estudio de las masas de agua es de gran importancia para la Oceanografía Física ya que, además de generar conocimiento para ayudar a entender la dinámica del océano, proporciona bases para establecer la síntesis sobre los movimientos del agua de mar.

Los factores más comunmente usados para la caracterización de las masas de agua de una región oceánica son: los procesos que la originan, su posición geográfica, el grado de aislamiento de esa región respecto de las que le son adyacentes y su movimiento y mezcla con otras masas de agua. En la actualidad se han adicionado a la lista de agentes mezcladores la doble-difusión y el cabalgamiento. Sin embargo no hay una definición única de lo que es una masa de agua, por lo que hoy en dia se habla de "masa de agua", "tipo de agua" y "tipo de agua fuente", sin que haya una distinción clara entre ellas (Tomozak, 1991).

Con la introducción de los diagramas temperatura-salinidad (T-S) por Helland-Hansen (1916; citado por Montgomery,1958), como una herramienta para el estudio de las propiedades termodinámicas del agua de mar, se dió inicio al estudio sistemático de las masas de agua; de entonces a la fecha los diagramas T-S han demostrado ser una herramienta valiosa que ha permitido caracterizar las masas de agua más notables.

Una modificación importante a los diagramas T-S es la realizada por Montgomery (1955), que consiste en determinar el volumen asociado a las masas de agua mediante una distribución de clases bivariantes de temperatura y salinidad. Posteriormente Carmack (1974) incorporó una extensión en esta última versión obteniendo la profundidad promedio de ocurrencia de los intervalos de clase bivariante.

La utilización de esta técnica en combinación con el análisis T-S "ordinario" provee una herramienta muy útil, por ejemplo, para la división del océano en regiones en base a factores como las características de la interacción estacional y espacial de las masas de agua o de su interacción con la atmósfera (Mamayev, 1975); además los modelos de circulación pueden ser más representativos si están basados en una distribución cuantitativa de propiedades (Carmack, 1974). El empleo de este tipo de análisis ha mostrado ser de gran ayuda como punto de partida para estudios sobre la circulación abisal del Oceáno Mundial (Bolin y Stommel, 1961; citado por Mamayev, 1975), flujos geostróficos en la Corriente de Kuroshio (Masuzawa, 1965; citado por Mamayev, 1975), variación estacional en el sistema de la Corriente de California (Gómez-Valdez, 1980) y variabilidad estacional y espacial de las masas de agua en la región de la Corriente de California (Vélez-Muñoz, 1981).

El conocimiento de la variación estacional de las masas de agua también reviste gran importancia para el estudio de las pesquerías; ya que el conocer los intervalos de temperatura de las masas de agua, así como la variación estacional de éstas incrementa la información requerida por la industria pesquera para estimar de una manera más confiable aspectos como fecundidad, desarrollo, migración y proporción alimenticia de varias especies comerciales en diversas áreas del Océano (Andrey et al., 1976).

En el campo de la Oceanografía Física permite hacer una mejor estimación de los flujos de entrada y salida que se dán a través de la boca, e inferir con mayor exactitud los patrones de circulación en todo el Golfo de California.

Los resultados que se obtengan en este trabajo podrán ser de utilidad tanto en el campo de las Oceanografías Física, Química y Biológica como en el de las pesquerías y Sedimentología, ya sea como herramienta auxiliar en trabajos de circulación, flujos de materiales como fosfatos, bióxido de carbono, nitratos, etc. o bien en estudios de inmigración y emigración de especies marinas.

II ANTECEDENTES

II.1 Area de estudio.

El Golfo de California se localiza en la costa oeste de México, entre la árida y montañosa península de Baja California en el oeste y los también áridos estados de Sonora y Sinaloa al este (Fig. 1). Con una extensión promedio de ~1100 Km de longitud y ~150 Km de ancho, constituye una gran cuenca de evaporación que gana calor a través de la superficie (Roden, 1964; Lavín y Organista, 1980; Paden, 1990). Según Ripa y Marinone (1989) este flujo de calor tiene una importante modulación estacional.

Las montañas peninsulares separan al Golfo de la influencia moderadora del Océano Pacífico, por lo que su clima es mas bien cálido y árido, más típico de regiones desérticas que el de la costa oeste de Baja California; sus condiciones son un tanto más tropicales durante el verano cuando los vientos prevalecientes introducen aire húmedo del Sur (Merrifield y Winant, 1989).

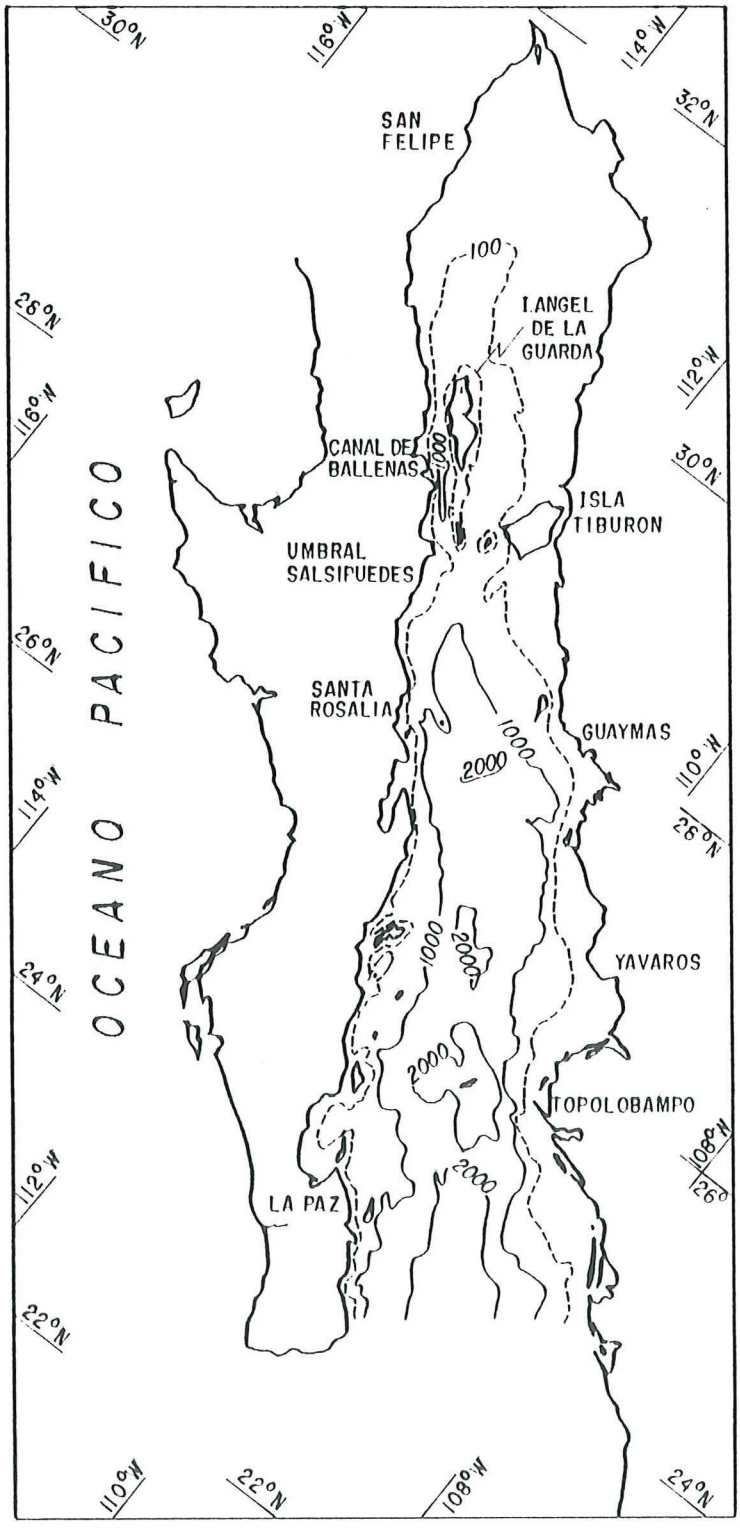


Fig. 1. Golfo de California. Se muestran las isóbatas de 100, 1000 y 2000 m.

Según su batimetría, el Golfo de California ha sido dividido en la literatura en dos regiones principales: Norte y Sur, principalmente por grandes diferencias en su profundidad promedio (menor a 200 m en la parte norte y mayor a 2000 m en el extremo sur). Estas dos regiones son divididas por el umbral sur de la Cuenca Salsipuedes o Canal de Ballenas (la profundidad de este umbral es de ~450 m) y la cadena de islas formada por Tiburón, San Esteban, Angel de la Guarda y San Lorenzo (Roden, 1964; Alvarez-Borrego y Schwartzlose,1979; Robles y Marinone, 1987; Bray, 1988a, Bray y Robles, 1991). La región Sur se encuentra en comunicación abierta con el Océano Pacífico, y los umbrales entre sus cuencas tienen profundidades de más de 1500 m (Alvarez-Borrego y Schwartzlose,1979). En la boca del Golfo se presenta notables variaciones en la distribución de propiedades fisicoquímicas por estar situada en la zona transicional del Océano Pacífico Nor-Oriental en donde se reune el agua de origen subártico, de temperatura y salinidad relativamente baja, con aguas cálidas de la región ecuatorial (Sverdrup, 1942, citado por Alvarez-Sánchez. et al.,1978a; Wyrtki, 1967: Warsh et al., 1973;Alvarez-Borrego y Schwartzlose,1979).

II.2 Circulación.

La primera descripción de la circulación superficial en la parte sur del Golfo es debida a Thorade (1909; citado por Alvarez-Borrego, 1983) quien empleando cartas de temperatura construidas con datos tomados de bitácoras de barcos, encontró una circulación ciclónica con transporte superficial neto en la dirección de los vientos estacionales, y reportó temperaturas bajas en la costa este durante el invierno relacionadas a surgencias por los vientos favorables del NW. Esto último también ha sido descrito por Roden (1958) entre otros. Esta circulación ciclónica también ha sido observada a fines de verano a partir de datos hidrográficos, con agua de baja salinidad

La presencia en la boca del Golfo de California de flujos de entrada y salida variables, tanto espacial como estacionalmente, es una característica reportada por diversos autores (Stevenson, 1970- citado por Alvarez Sánchez. et al., 1978a; Warsh y Warsh, 1971; Roden, 1972). Según Alvarez Sánchez et al., (1978a) estos núcleos se pueden desplazar con velocidades hasta de 50 cm s^{-1}.

En términos generales, la circulación superficial en el Golfo de California se caracteriza por flujos hacia el sur en invierno y hacia el norte en verano. Los flujos presentan diferentes direcciones en primavera, no hay un patrón de circulación específico y la presencia de giros anticiclónicos en regiones del Golfo de California constituyen una de las características de esta estación climática. Al igual que en primavera, en otoño no hay un patrón claro de circulación, de tal forma que esta estación climática es considerada como un período de transición entre los patrones de circulación de verano a invierno.

II.3 Condiciones hidrográficas.

Las características hidrográficas a lo largo del Golfo son muy diferentes, por lo cual para su estudio ha sido dividido en tres regiones hidrográficas: El Golfo Norte, la porción Central y el Golfo Sur, con una región de islas que separa El Golfo Norte de la porción Central (región Norte y Golfo Norte se manejan en esta tesis de manera indistinta, así como para el Sur) (Bray y Robles, 1991).

El Golfo Norte se caracteriza por altas salinidades superficiales. Sverdrup (1941) reportó valores de 35.5 ppm en esta región, con temperaturas entre 10 °C en invierno y 32 °C en verano. Debido al enfriamiento y evaporación que se producen en invierno,

Sverdrup (1941) propuso la hipótesis de que el agua superficial en esta región se hundiría, moviéndose luego al sur para llenar las partes profundas de las Cuencas Wagner, Delfín y Salsipuedes. Esta hipótesis ha sido discutida por Roden (1964), Alvarez-Borrego y Schwartzlose, (1979), Bray (1988b) y Lavín et al. (sometida a J. Geophys. Res.). Datos recientes (febrero-marzo, 1988) sugieren que el proceso es importante sólo localmente en la región de la Cuenca de Wagner, sin advección clara hacia la Cuenca Salsipuedes, ya que la salinidad aumenta con la profundidad solamente hacia el Norte de la Cuenca Wagner (Lavín et al., sometida a J. Geophys. Res.). En esta región un factor de importancia, al respecto, lo constituyen las corrientes fuertes de marea que provocan una mayor homogeneización de la columna de agua (Roden, 1964; Gaxiola Castro et al., 1978; citados por Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979).

La región de las islas y su umbral sur, constituye una de las características topográficas más sobresalientes del Golfo que enmarca un régimen hidrográfico diferente. Por una parte el umbral restringe la circulación entre el Golfo Norte y la región Central, y por otro lado actúa como punto de generación de mezcla intensa por corrientes fuertes de marea (Badan-Dangon, comunicación personal). La persistencia de aguas frías superficiales en la región de las islas es debida probablemente a la mezcla por marea (Roden y Groves, 1959; Argote et al., 1985). Desde esta región se pueden desprender chorros de agua fría hacia el sur del umbral, dando lugar a frentes térmicos (Badan-Dangon et al., 1985; Robles y Marinone, 1987). Según Badan-Dangon et al. (1985) la forma y extensión de estos frentes depende del régimen de los vientos y su interacción con las aguas más tibias de la Cuenca de Guaymas. Bray y Robles (1987) también detectaron estos frentes en una sección hidrográfica de temperatura y salinidad.

En la región de las islas sobresale el Canal de Ballenas por sus características hidrográficas y su topografía irregular con una profundidad máxima que excede los 1200 m. El agua de esta cuenca parece provenir de mezcla por corrientes fuertes de marea entre la superficie y la profundidad del umbral (Roden y Groves, 1959; Roden, 1964; Paden, 1990; Simpson et al., en prensa). La temperatura y salinidad a una misma profundidad de 1000 m puede ser respectivamente ~6 °C y ~0.4 ppm mayor en el Canal de Ballenas que al sur del umbral. Aun en las partes más profundas del Canal de Ballenas la temperatura es de alrededor de 11 °C y allí no existe el mínimo profundo de salinidad típico en el Golfo Central y Sur. En el Canal de Ballenas la salinidad disminuye monotónicamente con la profundidad y en sus partes más profundas es tan alta como 34.8 ppm (Roden, 1964; Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Alvarez-Borrego, 1983).

La región Central muestra también una señal estacional fuerte en la temperatura superficial (Ripa y Marinone, 1989). Valores de 16 °C durante febrero a marzo y de 31 °C en agosto fueron reportados por Robles y Marinone (1987). De abril a octubre la termoclina se encuentra bien desarrollada, alcanzando su máximo desarrollo en agosto cuando las diferencias de temperatura entre la superficie y los 150 m de profundidad son de alrededor de 16 °C (Alvarez-Borrego, 1983). En esta región pueden ocurrir mínimos de salinidad en la capa superficial (34.8 ppm entre 25 y 75 m de profundidad en la costa este) cuyo origen probable es una corriente que fluye hacia el noroeste entre esas profundidades, como fué observado en verano por Roden (1964).

La región Sur está en comunicación abierta con el Océano Pacífico Tropical a través de una boca de aproximadamente 200 Km de ancho y cuencas cuya profundidad excede a los 2000 m. Su estructura hidrográfica es complicada debido a la confluencia de

distintas masas de agua en la boca del Golfo. Esencialmente su estructura termohalina corresponde a la del Pacífico Tropical Oriental, modificada en la superficie por evaporación (Roden y Groves, 1959; Roden, 1964; Wyrtki, 1967; Roden 1972; Alvarez-Sánchez et al., 1978a; Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Bray y Robles, 1991). Como se anotó antes (sección II.2) la advección de agua más salina desde el Golfo Central o de agua menos salina desde el Sur, pueden contribuir a la complejidad de la hidrografía en la boca del Golfo.

En términos generales, de octubre a junio las temperaturas superficiales del Golfo de California son mayores en la boca que en el Golfo Norte (Roden y Groves, 1959; Roden, 1964). Con la presencia de los vientos del noroeste en invierno se originan surgencias sobre la frontera este del Golfo (Sonora y Sinaloa), las cuales son más desarrolladas y cubren mayor extensión (de 23-28° N) que las originadas en las costas de Baja California por los vientos del sureste en verano (Roden y Groves, 1959; Alvarez-Borrego, 1983). La presencia de surgencias en las costas de Sonora en primavera (marzo-abril), y frente a Baja California en verano (junio-agosto) ha sido confirmada por Badan-Dangon et al., (1985) mediante imágenes de satélite.

II.4 Masas de agua.

En el Golfo de California están presentes diversas masas de agua. Sin embargo, la distinción entre éstas no es sencilla en todos los casos, particularmente para las masas de agua de la capa superficial (~200 m). Esto último obedece a que distintos autores asignan nomenclatura distinta y aun distintos intervalos T-S a una misma masa de agua, así como a efectos de procesos locales como mezcla, aislamiento y evaporación (comunes en el Golfo de California) que modifican sus características distintivas.

En la boca del Golfo se distinguen tres masas de agua superficiales (Roden y Groves, 1959; Wyrtki,1967): Agua de la Corriente de California (ACC), Agua Superficial del Pacífico Tropical Oriental (AST) y el Agua del Golfo de California (AGC). Bajo éstas, se han encontrado: Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt), Agua Intermedia del Pacífico (AIP) y Agua Profunda del Pacífico (APP) (Wyrtki,1967; Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979).

La presencia del ACC en la boca del Golfo se manifiesta por un núcleo de agua de baja salinidad (34.6 ppm) y baja temperatura (Alvarez-Sánchez. et al., 1978a; Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Alvarez-Borrego, 1983; Bray y Robles, 1991). Warsh et al., (1973) indicaron que esta masa de agua de baja salinidad es una mezcla de Agua Subsuperficial de la Corriente de California con Agua Superficial Tropical, llamándola "Agua de Transición A" con temperatura de 15 a 19 °C a profundidades de 50 m o menos. Roden y Groves (1959) indicaron que la contribución del ACC en el Golfo es pequeña.

Según Alvarez-Borrego y Schwartzlose (1979), sólo en invierno y principios de primavera es posible encontrar el AST en la boca del Golfo, mientras que a finales de primavera, verano y otoño invade prácticamente hasta la porción sur de las islas Angel de la Guarda y Tiburón; estos autores la distinguieron como agua tibia y con salinidad entre 34.65-34.85 ppm.

El ASsSt se caracteriza por un máximo de salinidad subsuperficial de 34.8 ppm (Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979) a una profundidad entre 50 y 150 m (Wyrtki, 1967). Warsh et. al., (1973) la refieren como "Agua de Transición B", situándola entre 50 y 200 m en la boca (porciones central y este). Alvarez-Sánchez. et al., (1978a) la

identificaron en la boca del Golfo en primavera, con salinidad de 34.6 ppm a 34.8 ppm extendiéndose de 150 m a 500 m de profundidad. Kin'dyushev (1968),- quién la llamo "Agua Ecuatorial Transformada"- señala que en la parte sur de la región de la Corriente de California, el núcleo de esta masa de agua tiene una temperatura de 12.5 °C y una salinidad de 34.85 ppm. Robles y Marinone (1987) indicaron que el ASsSt se presenta hasta la región Central del Golfo de California durante todo el año.

El trabajo de Sverdrup (1941) es considerado como el inicio del entendimiento de los mecanismos por el cual se forma la masa de Agua del Golfo de California (AGC), cuya característica sobresaliente es, sin duda, su alta salinidad. Diversos investigadores han confirmado esta hipótesis; otros han dado una explicación del mecanismo de formación y la región donde éste inicia (Roden, 1964; Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Bray, 1988b; Lavín et al., sometida a J. Geophys. Res.). Bray (1988b) y recientemente Lavín et al. (sometida a J. Geophys. Res.) indicaron que esta masa de agua se forma en las regiones costeras someras (alrededor de 40 m de profundidad) del Alto Golfo por evaporación y enfriamiento, deslizándose posteriormente sobre la pendiente hasta las partes profundas de la Cuenca Wagner y sus alrededores, destacando que, además de su alta salinidad (35.1-35.3 ppm), esta masa de agua contiene pocos nutrientes y la cantidad de oxígeno disuelto es relativamente alta.

El AGC es identificada por algunos autores (Alvarez-Sánchez et al., 1978a; Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Alvarez-Borrego, 1983; Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991) por salinidad mayor a 34.9 ppm, mientras que otros autores (Wyrtki, 1967; Kin'dyushev, 1968; Roden, 1972; Bray, 1988b; Bray y Robles, 1991; Lavín et al., sometida a J. Geophys. Res.) consideran que su salinidad es ≥35.0 ppm. Alvarez-Sánchez. et al. (1978a) la localizaron entre la superficie y los 150 m de profundidad en

la boca del Golfo en la primavera de 1970. Warsh et al., (1973) determinaron que para temperaturas entre 12° y 22 °C y profundidades entre 30 y 200 m, la masa de agua del Golfo de California se caracteriza por una salinidad mayor de 34.9 ppm. Durante los años en que ocurre El Niño-Oscilación del Sur, el AGC fluye hacia el SE hasta la boca del Golfo por abajo del AST (más tibia y menos salina) fluyendo hacia el Noroeste (Bray y Robles, 1991). Bray (1988b) subdividió el AGC para propósitos de su trabajo en: Agua del Delta del Colorado (ADC), Agua de la Cuenca de Wagner (ACW), Agua del Golfo Norte (AGN) y Agua del Golfo Central (AGCe). A exepción de la última de ellas, todas tienen salinidad mayor a 35.0 ppm y en el caso del AGCe resulta de la mezcla de AGN con ASsSt en la región de las islas.

El AIP se caracteriza por un mínimo profundo de salinidad de 34.50 ppm (Robles y Marinone, 1987; Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Bray y Robles, 1991),y se localiza entre los 600 y 900 m de profundidad (Wyrtki, 1967). Alvarez-Borrego y Schwartzlose (1979) detectaron en la boca del Golfo este mínimo y en la Cuenca de Guaymas de 34.54 ppm con temperatura de aproximadamente 6 °C. Fuera del Golfo de California el AIP es encontrada hasta la zona de la convergencia subtropical (20°-23° N) con temperatura de 5.5 °C y salinidad de 34.50 ppm (Kin'dyushev, 1968). El origen de esta masa de agua Intermedia en el Pacífico es un punto discutido por varios autores. Algunos de ellos consideran que ésta es formada en la Zona del Frente Polar Antártico (nombre dado por Gordon en 1971; citado por Emery y Meincke, 1986) y transportada hacia el norte, por lo que la llaman Agua Intermedia del Antártico. Otros autores (Reid, 1965; Wyrtki, 1967; Mamayev, 1975 y Emery y Meincke, 1986) la llaman Agua Intermedia del Pacífico, ya que sus características como: temperatura, cantidad de oxígeno disuelto y la profundidad del mínimo profundo de salinidad difieren de las encontradas en el Pacífico Sur (Wyrtki, 1967). El argumento para quienes la llaman

Intermedia del Antártico es la ausencia de regiones de formación en el Pacífico Norte, situación que difiere de quienes la llaman Intermedia del Pacífico, que señalan que sí existen tales regiones en el Pacífico Norte (Mamayev, 1975- su figura No. 102, pag. 315 y Emery y Meincke, 1986- su figura No. 2 pag. 389). No obstante que es un punto interesante, la discusión de ambas posturas está fuera de los objetivos de este estudio.

Por debajo del AIP se encuentra el Agua Profunda del Pacífico (APP) distinguida por un suave incremento de la salinidad con la profundidad (Alvarez-Borrego y Schwartzlose,1979; Robles y Marinone, 1987; Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Bray y Robles, 1991). Esta masa de agua ha sido caracterizada por un índice termohalino estable de 1.3 °C y 34.67 ppm (Kin'dyushev, 1968).

La tabla I resume las características de temperatura y salinidad (T-S) de las masas de agua descritas en los párrafos anteriores, indicando entre paréntesis el nombre mediante el cual es referida por el autor.

II.5 Análisis volumétrico.

La correlación de la temperatura y la salinidad constituyeron una base sistemática para el estudio de las masas de agua cuando Helland-Hansen (1916, citado por Montgomery, 1958) introdujo los diagramas temperatura-salinidad (T-S), con lo cual se inició el estudio cualitativo de las masas de agua.

Durante el transcurso del tiempo, la aplicación de estos diagramas T-S pasó de ser de carácter cualitativo a cuantitativo con Montgomery (1955), quien realizó un trabajo sobre la distribución en intervalos de clases bivariantes de temperatura y salinidad en la

Tabla I. Características T-S de las distintas masas de agua del Golfo de California según varios autores. La nomenclatura es como sigue; AGC- Agua del Golfo de California; ACC- Agua de la Corriente de California; ASsSt- Agua Subsuperficial Subtropical; AIP- Agua Intermedia del Pacífico; APP- Agua Profunda del Pacífico; AST- Agua Superficial Tropical. Otros nombres con los que se les ha referido se muestran entre paréntesis.

CARACTERISTICAS TEMPERATURA-SALINIDAD						
Referencia	MASAS DE AGUA DEL GOLFO DE CALIFORNIA					
	AGC	AST	ACC	ASsSt	AIP	APP
Wyrtki, 1967	> 35.0 ppm 15-30 °C	33.5-34.2 ppm 15-20 °C	34.0-34.5 ppm	Smáx 34.8 ppm 50-150 m	Smín 34.55 ppm 6.0 °C	
Kin'dyushev, 1968	35.0-35.5 ppm		33.5 ppm 12 °C (ACC-Sur)	34.85 ppm 12.5 °C (Ec-Trans)	34.5 ppm 5.5 °C (Subantártica)	34.67 ppm 1.3 °C
Warsh y Warsh, 1973	> 34.9 ppm 12-22 °C 30-200 m		< 34.6 ppm 15-19 °C (Transición "A")	34.6-34.9 ppm 13-20 °C (Transición "B")		
Alvarez-Sánchez et al.,1978a	> 34.9 ppm 0-150 m		< 34.6 ppm 0-150 m	34.6-34.8 ppm 150-500 m		
Alvarez-Borrego y Schwartlose, 1979	≥ 34.9 ppm	34.65-34.85 ppm	≤ 34.6 ppm 0-150 m	34.8 ppm Smáx	34.5 ppm Smín (Antártica)	34.68 ppm Smáx
Alvarez-Borrego, 1983	≥ 34.9 ppm	≤ 34.6 ppm	34.65-34.85 ppm	34.8 ppm Smáx	Smín 34.5 ppm (Antártica)	34.68 ppm Smáx
Bray, 1988b	≥ 35.0 ppm ADC, ACW AGN					
Robles y Marinone, 1987	≥ 35.0 ppm		34.2 ppm Smín	34.8 ppm Smáx	34.5 ppm Smín	
Alvares-Borrego y Lara-Lara, 1991	≥ 34.9 ppm	34.65-34.85 ppm	≤ 34.6 ppm	34.8 ppm Smáx	Smín 34.5 ppm (Antártica)	34.68 ppm Smáx

ppm -> partes por mil Ec-Trans -> Ecuatorial Transformada Smáx (mín) -> máximo (mínimo) de salinidad

ADC -> Agua del Delta del Colorado ACW -> Agua de la Cuenca de Wagner AGN -> Agua del Golfo Norte

superficie del mar en un punto del Atlántico Norte. Posteriormente, Cochrane (1956) aplicó esta técnica a una superficie y Cochrane (1958) y Pollak (1958) la extendieron a volúmenes de agua para el Océano Pacífico e Indico respectivamente. Montgomery (1958), empleando esta versión del análisis T-S cuantitativo estimó los volúmenes de agua para cada intervalo de clase bivariante presentes en el Océano Atlántico. Con estos resultados y los obtenidos para los océanos Pacífico e Indico obtuvo estadísticas para el Océano Mundial. Carmack (1974) en su trabajo sobre la caracterización cuantitativa de las masas de agua en el Mar de Weddell, incorporó una nueva característica: la profundidad promedio de ocurrencia del agua en cada intervalo de clase bivariante de temperatura y salinidad.

El análisis volumétrico ha sido empleado el Océano Mundial (Worthington, 1981-Warren y Wunsh, eds.), en el Mar Negro, Arábigo, Rojo, del Caribe, del Japon, de Weddell, de Indonesia, sobre la Corriente de Kuroshio (Mamayev, 1975) y en la región de la Corriente de California (Gómez-Valdez., 1980 y Vélez-Muñoz., 1981), obteniendo conclusiones interesantes acerca de la estructura océanica en las regiones estudiadas. El presente trabajo representa el primer intento de un análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California.

III OBJETIVOS

Mediante el análisis volumétrico T-S de las masas de agua presentes en el Golfo de California, en este trabajo se pretende :

1.- Revisar y redefinir los intervalos de temperatura y salinidad característicos de las masas de agua del Golfo de California.

2.- Evaluar volumétricamente las masas de agua presentes, así como su profundidad promedio de ocurrencia.

3.- Describir la variabilidad estacional e interanual de las masas de agua.

IV DATOS Y METODOS

IV.1 Datos

IV.1.1 Banco de datos

El banco de datos empleado comprende información de 38 cruceros oceanográficos realizados entre 1939 y 1986. En algunos casos los cruceros tomaron unos pocos días del mes adyacente, no obstante fueron considerados dentro del mes que más días cubrió. En la tabla II se indica el total de lances por crucero, el instrumento usado y el total de cruceros y lances en cada mes del año. Se puede apreciar en la tabla II que no se contó con información para el mes de enero y la disponible para el mes de julio fué muy poca.

Mediante diagramas T-S y perfiles de temperatura y salinidad elaborados para cada crucero, se llevó a cabo la revisión de la información disponible. Algunos archivos sin datos de salinidad fueron descartados. En el crucero de marzo de 1983 se encontraron algunos de los lances de CTD con un corrimiento en la salinidad respecto a los demás datos que integran este crucero (botellas y CTD). Los lances erróneos de CTD fueron corregidos (se consideró que el error fué sistemático y no dependio de la profundidad) sumándoles la desviación estandar que éstos tenían respecto a una curva promedio obtenida de los datos correctos de CTD y botellas.

IV.1.2.- Perfiles promedio de temperatura y salinidad

La superficie total del Golfo de California (GC) fué dividida en celdas rectangulares de aproximadamente 100 km de longitud por 30 km de ancho (Fig. 2) con el propósito

Tabla II. Lista de cruceros hidrográficos dentro del Golfo de California agrupados por meses que integran este estudio, las letras C y B se refieren a datos de CTD y botellas respectivamente. En la columna cuatro se tiene el total de cruceros (Cr) y archivos (A) para cada mes.

BANCO DE DATOS DEL GOLFO DE CALIFORNIA DEPTO. OCEAN. FISICA			
Mes	Año	Lances	Total
FEBRERO	1956	20 B	3 Cr
	1957	53 B	97 A
	1977	24 B	
MARZO	1939	43 B	5 Cr
	1973	82 C	
	1983	36B 67C	419 A
	1984	117 C	
	1985	74 B	
ABRIL	1956	32 B	4 Cr
	1957	32 B	
	1970	28 B	149 A
	1474	38B 19C	
MAYO	1959	19 B	5 Cr
	1960	8 B	
	1965	9 B	
	1967	3 B	
	1984	170 C	
JUNIO	1957	50 B	3 Cr
	1969	6 B	
	1982	67 B	123 A
JULIO	1967	20 B	1 Cr
AGOSTO	1957	50 B	2 Cr
	1969	13 B	63 A
SEPTIEMBRE	1967	3 B	3 Cr
	1971	85 B	
	1986	191 C	279 A
OCTUBRE	1974	77 B	3 Cr
	1981	52 B	
	1983	40 B	169 A
NOVIEMBRE	1961	40 B	7 Cr
	1963	9 B	
	1967	15 B	431 A
	1972	79 B	
	1979	47 B	
	1984	26B 64C	
	1985	151 C	
DICIEMBRE	1956	11 B	2 Cr
	1986	165 C	176 A 5

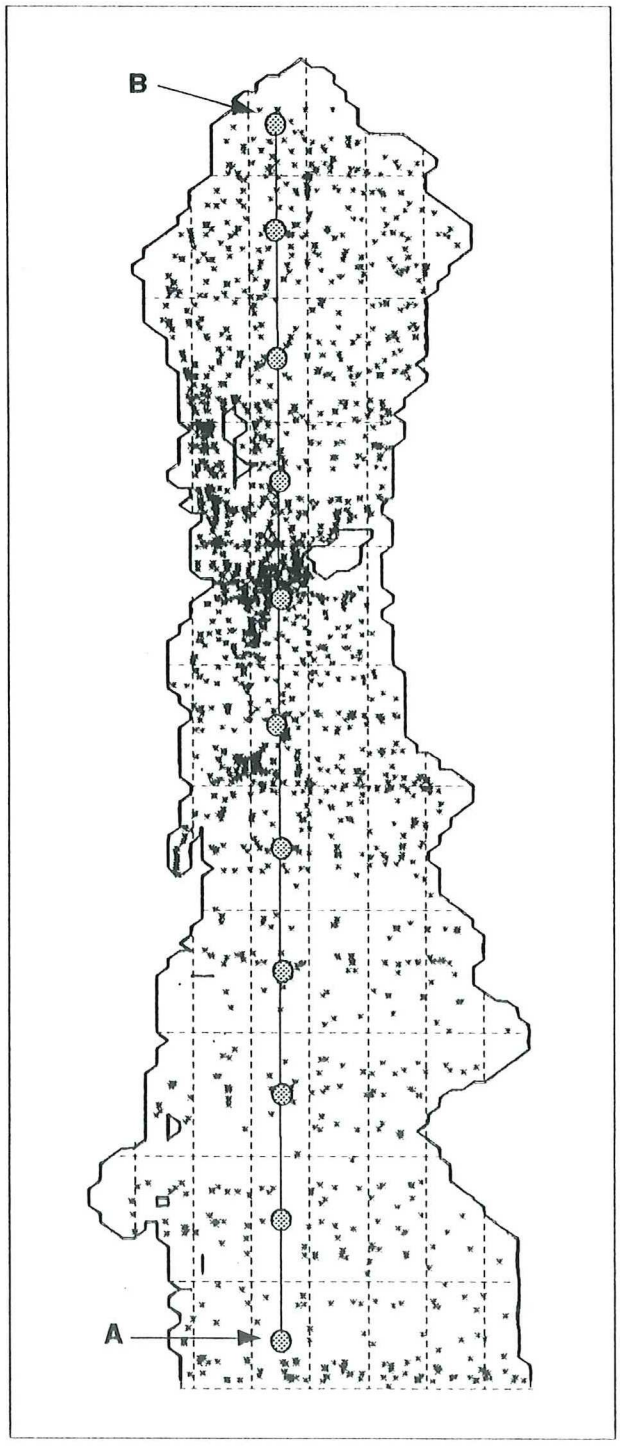


Fig. 2. Distribución de las estaciones oceanográficas y de la malla de trabajo dentro del Golfo de California. La línea A-B indica la posición de las secciones mostradas en las figuras 5, 6 y 16

de asignar a cada una de ellas un perfil promedio de temperatura y otro de salinidad (mas adelante se describe la obtención de estos perfiles promedio), requerido para obtener el diagrama T-S volumétrico correspondiente a cada celda de la malla y el volumen total de cada masa de agua. Tradicionalmente, y para otros trabajos de Oceanografía Física y en otras diciplinas, se ha definido la boca del Golfo de California como la línea que une Cabo San Lucas con Cabo Corrientes, pero para propósitos de este trabajo se consideró la línea que une Punta Arenas, B. C. (23° 28' N, 109° 27' O) y Altata, Sin. (24° 31' N, 107° 43' O). La superficie total (cubierta por agua) del Golfo se estimó en 156,230 Km^2 y su volumen total en $1.14X\,10^{14}\ m^3$. El tamaño de las celdas se escogió en base a la distribución espacial del total de estaciones oceanográficas (ubicadas generalmente en líneas normales a la costa), procurando que las líneas de estaciones a través del Golfo coincidieran con la línea media de las celdas (Fig. 2). Sin embargo, esto último no fué siempre posible porque en diferentes cruceros, y aún en un mismo crucero, el espaciamiento de las líneas de estaciones oceanográficas a través del Golfo no fué siempre el mismo. Por lo tanto, una misma celda puede contener más de una línea de estaciones, principalmente en áreas muestreadas más densamente como la región de las islas.

A partir de los perfiles originales de temperatura y salinidad (T,S) incluídos en cada celda, se obtuvieron perfiles interpolados a intervalos fijos de 10 m de profundidad, para el efecto se usaron splines cúbicos para interpolar los lances de botellas, mientras que en el caso de los lances de CTD simplemente se diezmaron los datos. La extensión vertical de los lances generalmente no fué hasta las cercanías del fondo, sino sólo hasta decenas o pocos cientos de metros sobre el fondo en las cuencas más profundas del Golfo, o hasta pocos metros o decenas de metros sobre el fondo en aguas más someras de la plataforma continental al sur de las grandes islas y en la región Norte del Golfo. Por lo

tanto y para poder referir el volumen de las masas de agua al volumen parcial de cada celda y finalmente al volumen total del Golfo, se optó por extender la longitud de los registros hasta el fondo de cada celda. Esto último se hizo de la siguiente manera: cualquier lance más somero que otro lance vecino del mismo crucero o mes, fué extendido usando los datos del lance vecino a partir de la máxima profundidad de muestreo del lance más somero y hasta la máxima profundidad de muestreo del lance vecino. Tal vecindad fué restringida a no más de una celda alrededor de la que incluía al lance más somero. En la ausencia de lances vecinos más profundos y de un mismo crucero o mes, fué empleado el perfil promedio correspondiente al mes anterior y posterior y a la misma celda (o en su defecto a celdas vecinas) del lance más somero. Los registros extendidos verticalmente hasta cierta profundidad, como fué descrito arriba, fueron alargados hasta el fondo de cada estación por extrapolación lineal. El número total de lances correspondiente a cada celda y a cada estación climática se muestra en la figura 3. Finalmente se obtuvieron perfiles promedio mensuales T,S para cada celda, promediando todos los lances por profundidades. El número de perfiles para cada mes, junto con su cobertura en superficie y volumen relativa a la superficie total (156,230 Km^2) y volumen total ($1.14X\ 10^{14}\ m^3$) del Golfo, se muestra en la tabla III.

Tabla III. Relación de perfiles promedio de temperatura y salinidad obtenidos para cada mes, el porcentaje de área cubierta y el volumen calculado (km^3) así como el porcentaje que éstos representan respecto al volumen total del Golfo.

INFORMACION MENSUAL Golfo de California				
Mes	Perfiles T,S	Cobertura Espacial (%)	Volumen Km^3	Volumen %
Febrero	46	85	109610	96
Marzo	56	95	112840	99
Abril	49	88	108710	95
Mayo	37	66	87820	77
Junio	40	65	68470	60
Julio	12	23	51070	45
Agosto	32	55	63800	56
Septiembre	29	47	30290	27
Octubre	39	72	85515	75
Noviembre	58	96	113010	99
Diciembre	31	53	38220	34

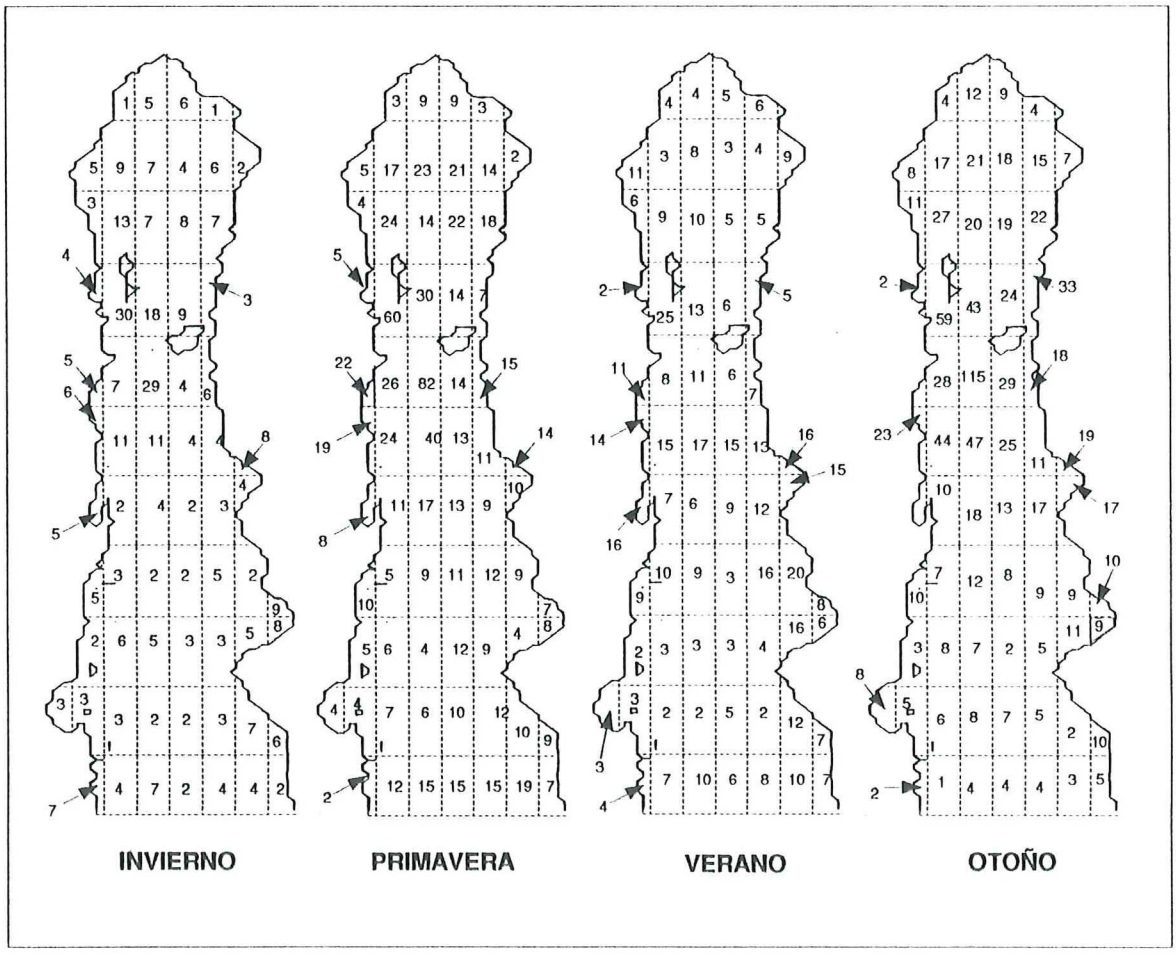


Fig. 3. Malla de trabajo empleada en el Golfo de California para la realización del análisis volumétrico. En cada celda se indica el número de archivos empleados para obtener el perfil promedio T,S correspondiente a cada celda.

IV.2 Cálculos volumétricos.

Los cálculos volumétricos se realizaron empleando la técnica de Montgomery (1955) y la extensión al método realizada por Carmack (1973). El método consiste en obtener el volumen de agua con características T-S dentro de un intervalo de temperatura y salinidad (referido en lo sucesivo como intervalo de clase bivariante), así como la profundidad media de ese volumen. El proceso se realiza de la siguiente forma:

a).- Debido a que las celdas en que fué dividido el Golfo de California no tienen un fondo plano, sino irregular dado por la batimetría, mediante el volumen y la profundidad máxima en cada una de las celdas se determina su área superficial (aunque las dimensiones de la celda con fondo irregular y fondo plano no son iguales, el volumen se conserva), misma que es empleda como un factor de peso (F) durante el proceso.

b).- El intervalo de clase bivariante empleado es de 0.5 °C en temperatura (ΔT) a partir de 1.0 °C hasta 32.0 °C, y en salinidad es de 0.1 ppm (ΔS) en el intervalo 34.0 ppm hasta 36 ppm. Con ello resultan 62 intervalos i de temperatura y 20 intervalos j de salinidad (Fig. 4a).

c).- El volumen parcial V_p de cada intervalo de clase bivariante i,j se obtiene sumando el producto del espesor de influencia E de cada k muestra por su correspondiente fracción del área superficial total (F) (Fig. 4a-b).

$$V_p\ (i,j) = \sum_{k=1}^{n} E_k(i,j)\ F \qquad n = \text{No. de muestras}$$

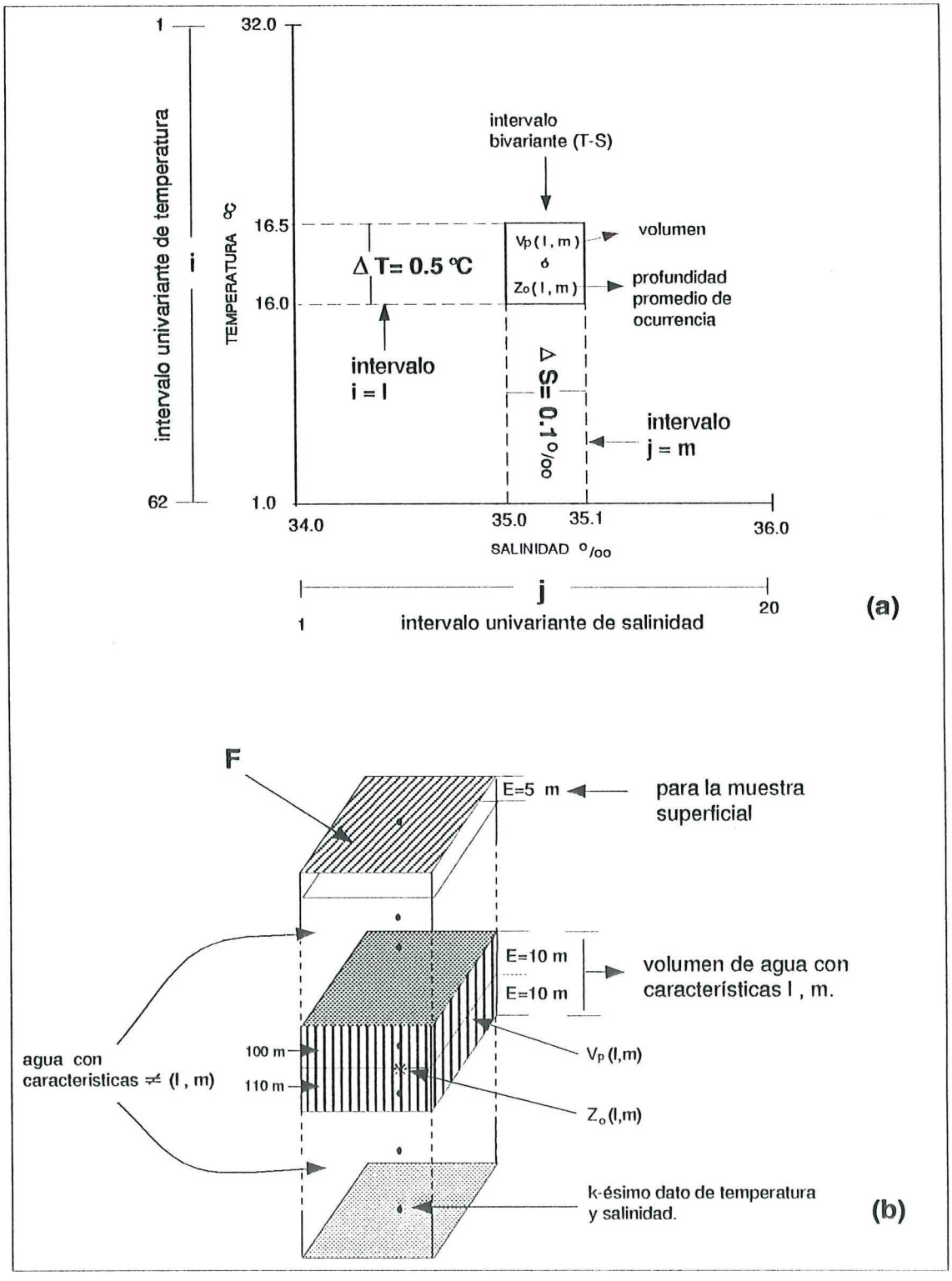


Fig. 4. Ilustración de los términos empleados en los cálculos volumétricos. a) intervalos bivariantes T,S : b) volumen parcial (Vp), profundidad promedio de ocurrencia (Zo), espesor de influencia (E) y factor de área superficial (F) de la celda.

El espesor de influencia ($E_k(\ i,j\ )$) de la muestra es la distancia media entre ésta y el dato superior y el inferior, igual a 10 m excepto en la superficie en donde es de 5 m.

d).- Para obtener la profundidad promedio de ocurrencia ($Z_0\ (i\ ,\ j)$) de cada una de las clases bivariantes i,j se emplean promedios ponderados mediante la siguiente relación:

$$Z_0\ (i,j) = \frac{\sum_{k=1}^{n} Z_k(i,j)\ E_k(i,j)\ F}{V_p\ (i,j)}$$

Donde n es el número total de muestras (datos de T,S) dentro del intervalo i,j y $Z_k(i,j)$ la profundidad de la muestra k.

Usando la metodología anterior se obtienen diagramas T-S volumétricos y de profundidad promedio de ocurrencia (referidos en adelante como diagramas VP) como se indica a continuación:

1) Diagramas VP promediados mensualmente. Para lo cual se emplean los perfiles T,S de cada mes referidos en la tabla III.

2) Diagramas VP promediados estacionalmente. En este caso los perfiles T,S se obtienen promediando todos los lances agrupados en una misma celda y en cada estación climática: diciembre-febrero para invierno; marzo-mayo para primavera; junio-agosto para verano; y septiembre-noviembre para otoño.

3) Diagramas VP promedio anual, mediante perfiles T,S que se obtienen promediando todos los perfiles promedio mensuales correspondientes a una misma celda.

Para cada uno de los tres casos anteriores se obtienen diagramas VP generales para todo el Golfo e individuales para cada celda. De este modo resulta un juego de diagramas VP para todo el Golfo como promedio de cada mes, estación climática y anual, y otro juego mucho más grande de diagramas VP para cada celda por mes, estación climática y anual.

Estos juegos de diagramas VP, en conjunto con los intervalos T,S característicos de cada masa de agua, se usan para estimar el volumen total de cada masa de agua, mediante la suma de los volúmenes parciales de todas las clases i,j comprendidas dentro del intervalo T-S distintivo de cada masa de agua. Los resultados al respecto se presentan en diagramas VP o tabulados, excepto para los cálculos individuales por su gran cantidad. Sin embargo los diagramas VP de celdas individuales se usan para construir figuras sobre la distribución espacial y temporal del porcentaje de volumen de cada masa de agua, relativo al volumen total de agua en cada celda. Finalmente, por diferencias se estiman anomalías volumétricas mensual o estacional con respecto al correspondiente promedio anual de cada masa de agua.

V RESULTADOS.

La información disponible mostró huecos lo cual creó situaciones indeseables, como diagramas volumétricos mensuales basados en pocos datos (tabla III) o cálculos volumétricos realizados con diferente cobertura espacial. Sin embargo, los promedios estacionales pudieron ser realizados cubriendo el 98% del área superficial del Golfo de California.

La secuencia en la que se presentan los resultados tiene por finalidad facilitar la evaluación de las variaciones estacionales e interanuales de las masas de agua presentes en el área de estudio. En primer término se definen los intervalos de temperatura y salinidad (T,S) que serán usados en este trabajo para caracterizar a cada una de las masas de agua del Golfo de California. Enseguida se describe el análisis volumétrico de masas de agua como promedio anual y para cada estación climática. Luego se muestra el comportamiento estacional del volumen de cada masa de agua así como su distribución espacial mediante isolíneas de porcentaje relativo. Finalmente se hace una evaluación en términos de análisis volumétrico sobre posibles condiciones anómalas asociadas a eventos de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS).

Es importante señalar que en este trabajo la descripción sobre la distribución vertical de cada masa de agua dentro del Golfo de California, está basada en diagramas de profundidad promedio de ocurrencia obtenidos para cada celda de la malla (sección VI.2, diagramas VP). El total de estos diagramas es de 213 con igual número de diagramas volumétricos por lo que no son mostrados, pero son empleados para la obtención de la distribucion espacial del volumen relativo (%) de cada masa de agua.

V.1 Caracterización de las masas de agua del Golfo de California.

En la tabla I se puede notar que varios autores han asignado distintos nombres a una misma masa de agua. Esto ha dado lugar a confusiones, como lo indicaron Wright y Worthington (1970; citado por Emery y Meincke, 1986) refiriéndose a masas de agua del Océano Atlántico. En esta tesis se pretende usar una nomenclatura básica de las masas de agua presentes en el Golfo de California, de acuerdo con sus características en la región del Golfo y no tanto en sus áreas de origen, excepto por supuesto para la masa de agua del Golfo de California (AGC). En general se procurará apegarse a la nomenclatura empleada por Wyrtki (1967, tabla I).

El AGC se distingue por su alta salinidad (≥34.9 ppm o ≥35.0 ppm; tabla I). La figura 5 muestra secciones longitudinales de salinidad promedio para ciertos meses representativos de cada estación climática. La salinidad superficial y el grosor de la capa superficial de más alta salinidad (≥35.0 ppm) se incrementan desde la boca hacia la cabeza del Golfo. La isohalina de 35.0 ppm se puede hundir en el Golfo Norte, donde sus cuencas someras pueden ser llenadas con agua de S≥35.0 ppm (Figs. 5c, 5d). Esta capa de agua de S≥35.0 ppm sólo se encuentra en el Golfo y de acuerdo con varios autores se forma en el Alto Golfo. Agua con salinidad de ~34.9 ppm puede corresponder al ASsSt, la cual en la boca del Golfo (y más al sur) es caracterizada por un máximo subsuperficial en la salinidad (~34.85 ppm a 200 m de profundidad). La capa de agua de S≥35.0 ppm se asocia con un amplio intervalo de temperatura (12-32 °C; Figs. 6a-d). Por lo tanto, en este trabajo será considerada como AGC aquella con S≥35.0 ppm y T>12 °C.

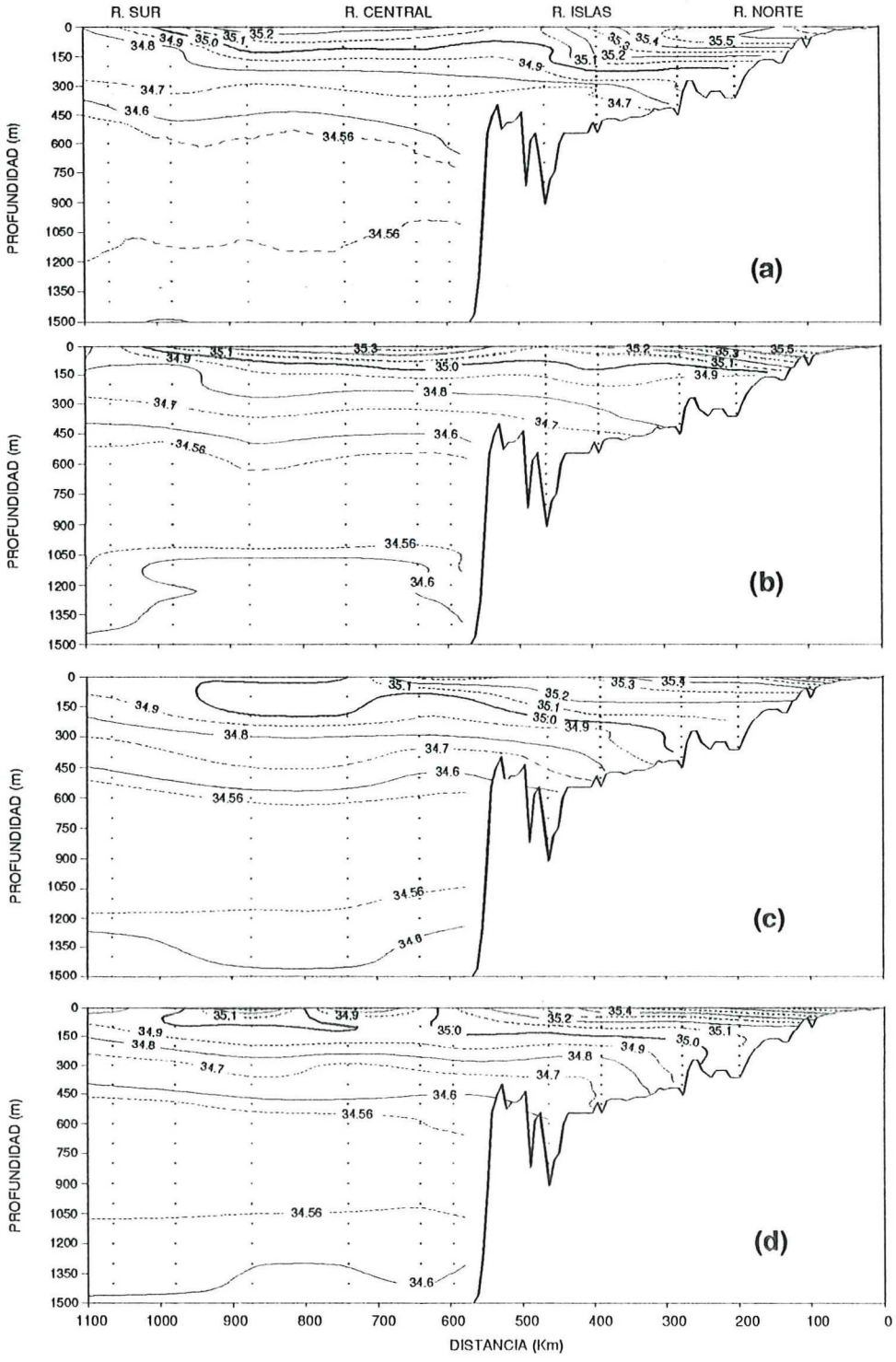


Fig. 5. Sección longitudinal de salinidad (‰) para los meses de febrero (a), mayo (b), agosto (c) y octubre (d). Las secciones representan promedios mensuales obtenidos con la información del banco de datos (1939-1986).

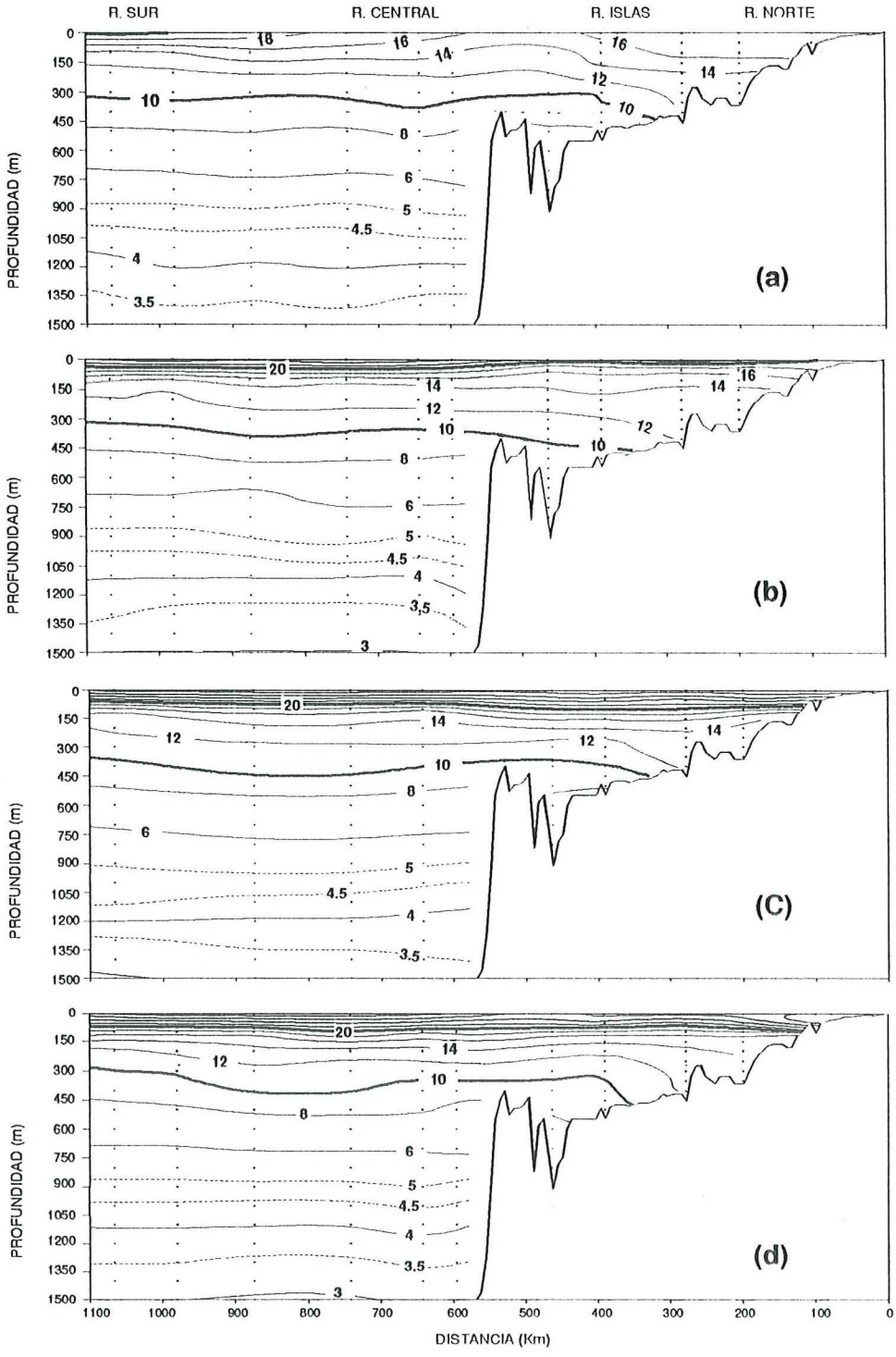


Fig. 6. Sección longitudinal de temperatura (º C) para los meses de febrero (a), mayo (b), agosto (c) y octubre (d). Las secciones representa promedios mensuales obtenidos con la información del banco de datos (1939-1986).

Como fué citado en los antecedentes (secciones II.2 y II.3), en la capa superficial del Golfo pueden coexistir con el AGC la masa de Agua de la Corriente de California (ACC) y la masa de Agua Superficial Ecuatorial o Tropical (ASE). A mayor profundidad ocurren las masas de Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt), Agua Intermedia del Pacífico (AIP) y Agua Profunda del Pacífico (APP), en el mismo orden en que aquí se mencionan. Pero no es fácil distinguir las fronteras entre estas masas de agua en secciones de salinidad (como las de la Fig. 5), ni en diagramas T-S globales (Fig. 7b) del Golfo de California. Particularmente es difícil distinguir en el interior del Golfo al máximo de salinidad subsuperficial el cual caracteriza al ASsSt. Comunmente la capa superficial del Golfo está ocupada en gran parte por AGC y entonces la salinidad aumenta desde el mínimo (34.5 ppm) que identifica al AIP hasta la superficie del mar (AGC). Por lo tanto, el máximo de salinidad del ASsSt entre el AIP y el AGC pueden ser completamente obscurecido, principalmente en la presencia de AGC y en la ausencia de ACC y ASE. Sólo en la región de la boca del Golfo y más lejos en el Pacífico Tropical Oriental, donde la capa superficial es ocupada completamente por aguas menos salinas que la del ASsSt, el máximo de salinidad del ASsSt sí es evidente (Emery y Dewar, 1982-sus Figs. 12i y 8; Bray y Robles, 1991-su Fig. No. 35).

Por lo expuesto en el párrafo anterior y una vez definida el AGC como aquella con $S \geq 35.0$ ppm y $T > 12.0$ °C, las fronteras entre las restantes masas de agua presentes en el Golfo (y por lo tanto sus intervalos T, S característicos) fueron establecidas a partir de diagramas T-S. Para ésto, primero se escogió a un diagrama T-S de la región Sur del Golfo y de un sólo crucero oceanográfico (B/I AGASSIZ, Abril de 1970), conteniendo los rasgos T-S distintivos de cada masa de agua presente en el Golfo (Fig. 7a). Luego, cada línea que une a dos vértices sucesivos de una curva T-S fué dividida aproximadamente a la mitad. Considerando a cada vértice como el núcleo de cada masa

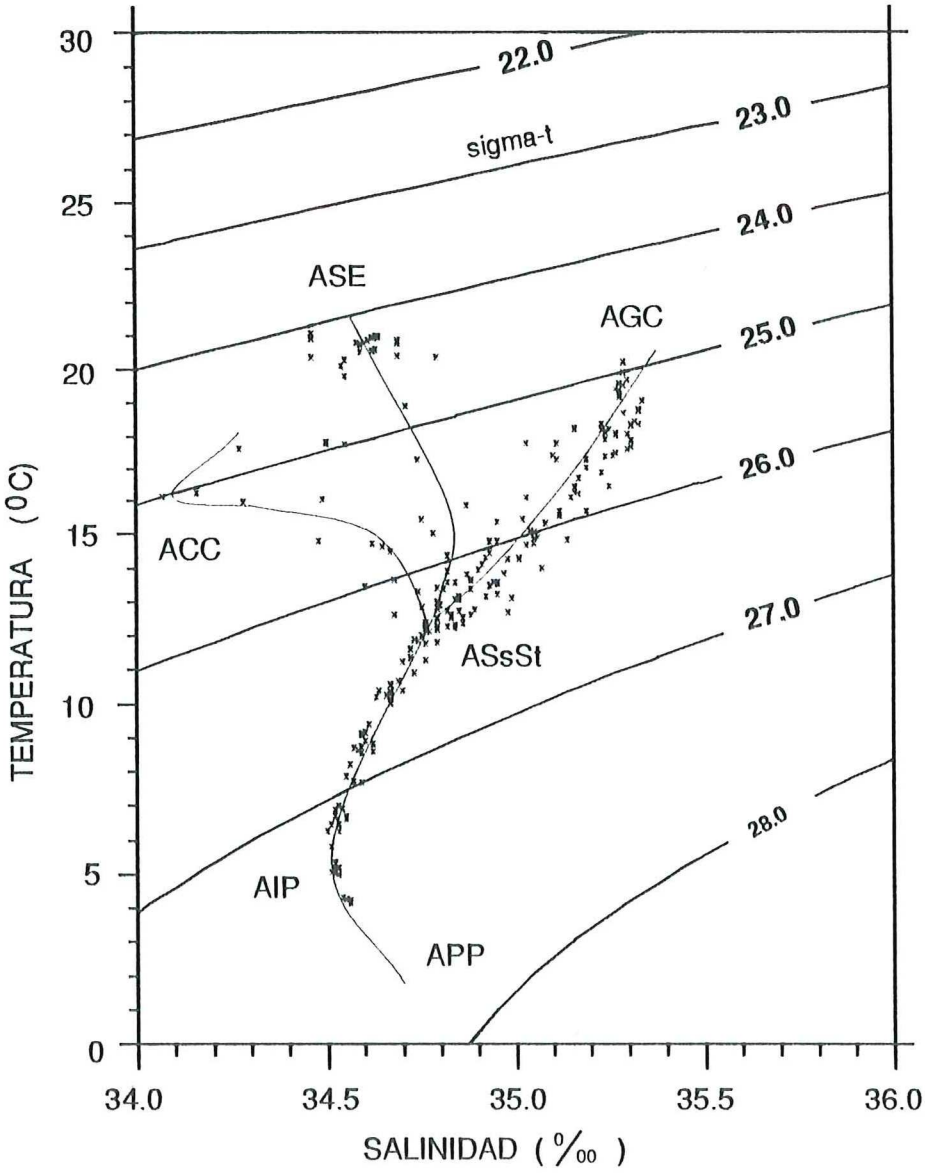


Fig. 7a. Rasgos distintivos de cada masa de agua presente en el Golfo de California. Los datos corresponden al crucero B/I AGASSIZ tomados en el periódo marzo-abril de 1970.

de agua, la distancia media entre dos vértices sucesivos fué considerada como su frontera. De estas fronteras se establecieron los valores T-S característicos de cada masa de agua. Dichas fronteras también se muestran sobrepuestas en un diagrama T-S global (Fig. 7b), el cual contiene a la totalidad de datos empleados en este trabajo; los valores T-S característicos de cada masa de agua se resumen a continuación :

Agua del Golfo de California	[$S \geq 35.0$ ppm , $T > 12.0$ °C]
Agua Superficial Ecuatorial	[$S < 35.0$ ppm, $T \geq 18.0$ °C]
Agua de la Corriente de California	[$S < 34.5$ ppm, $12.0 \leq T$ °C < 18.0]
Agua Subsuperficial Subtropical	[$34.5 < S$ ppm < 35.0, $9.0 \leq T$ °C < 18.0]
Agua Intermedia del Pacífico	[$34.5 \leq S$ ppm < 34.8, $4.0 \leq T$ °C < 9.0]
Agua Profunda del Pacífico	[$S > 34.5$ ppm, $T < 4.0$ °C]

Las secciones longitudinales de salinidad promedio (Figs. 5) sugieren que el ASsSt puede pasar sobre el umbral de Salsipuedes-Tiburón y contribuir al volumen de las cuencas más profundas al norte del umbral; también que el AIP está restringida en gran medida al sur del umbral y que el APP llena las cuencas más profundas del Golfo Central y Sur.

V.2 Análisis volumétrico: Estimación del promedio anual.

En la figura 8 se muestra el diagrama volumétrico global obtenido a partir del empleo de todo el banco de datos. El diagrama contiene 219 clases bivariantes dentro de las cuales se encuentran distribuidas las masas de agua del Golfo de California. En el promedio anual la máxima clase univariante de temperatura es 25.0 °C y en la salinidad es de 35.8 ppm. En la tabla IV se muestra el volumen (Km^3 y en %) de cada masa de agua presente en el Golfo, junto con su profundidad promedio de ocurrencia.

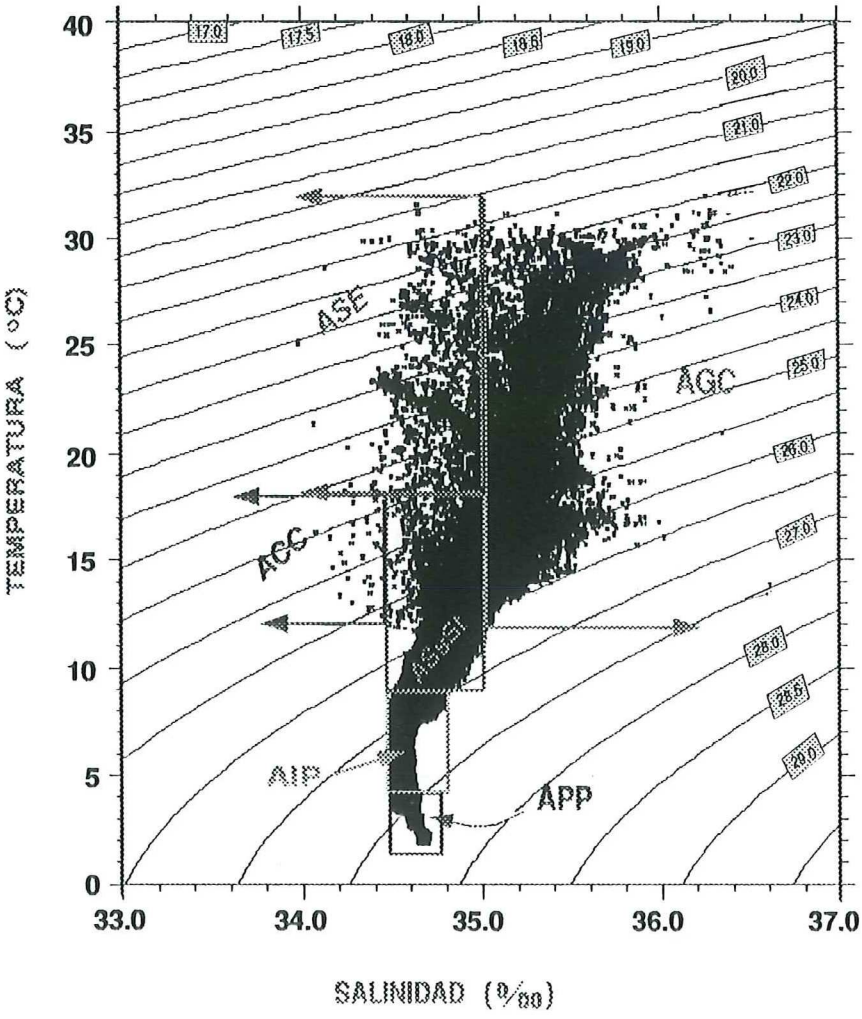


Fig. 7b. Diagrama T-S obtenido de la información empleada del banco de datos (1939-1986) del Golfo de California. Se muestran los intervalos de temperatura y salinidad redefinidos en este trabajo para las masas de agua identificadas dentro del área de estudio. Estas son : Agua del Golfo de California (AGC), A. Superficial Ecuatorial (ASE), A. de la Corriente de California (ACC), A . Subsuperficial Subtropical (ASsSt), A. Intermedia del Pacífico (AIP) y A. Profunda del Pacífico (APP).

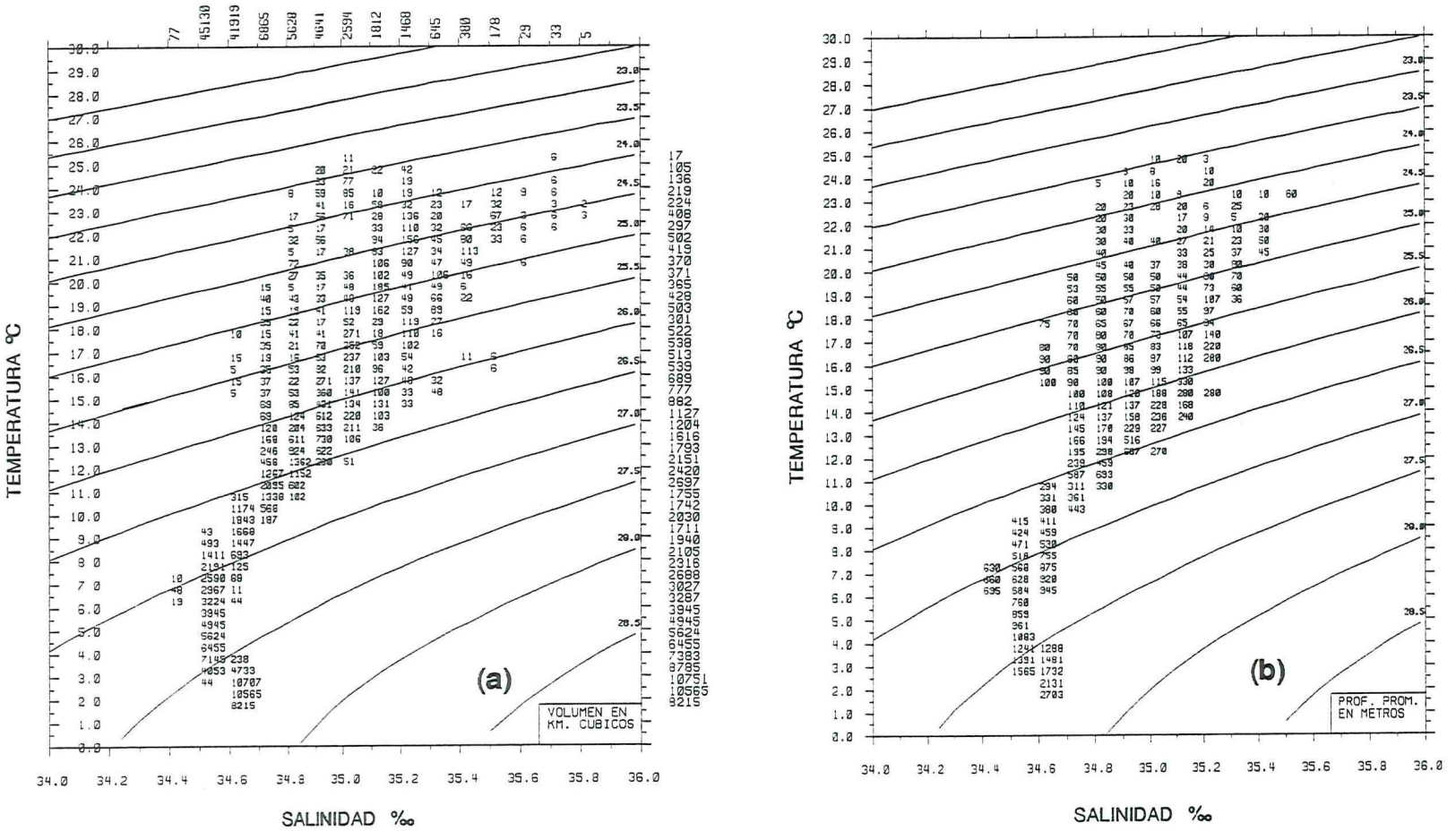


Fig. 8. Diagrama volumétrico (a) y profundidad promedio (b) en intervalos bivariantes (0.5 C X 0.1‰) para el Golfo de California correspondiente al año medio 1939-1986. Las sumas en la parte superior y derecha de la figura (a) describen las distribuciones de salinidad y temperatura respectivamente. El volumen procesado corresponde a 111,400 Km^3 distribuidos en 219 clases bivariantes, 48 univariantes de temperatura y 15 de salinidad.

Tabla IV. Proporción de las masas de agua del Golfo de California para el año medio 1939-1986.

PROMEDIO ANUAL			
Masa de agua	Volumen anual		Profundidad media
	Km^3	%	(m)
AGC	7140	6	0-230
ASE	800	1	0-70
ACC	0	0	—
ASsSt	21380	19	60-450
AIP	36330	33	400-1160
APP	45700	41	1160-fondo

La distribución espacial de la proporción de las masas de agua referidas en la tabla IV se muestra en la figura 9, en donde se observa que el Agua del Golfo de California (AGC) se encuentra distribuida en toda el área (Fig. 9a), con su mayor proporción en la región Norte y disminuyendo hacia el sur hasta menos del 1% en la boca. Su proporción en la región Norte es mayor hacia el noreste (Sonora) que hacia el noroeste (B.C.), característica que se observa hasta la región Central, mientras que en el Golfo Sur el mayor volumen del AGC se observa cerca de la costa oeste.

Además del AGC, sólo el ASsSt se encuentra distribuida a lo largo de todo el Golfo (Fig. 9b), siendo estas dos las únicas masas de agua presentes en la región Norte. La mayor proporción de ASsSt se observa en la región de las islas y disminuye hacia afuera de esta región en ambos sentidos (norte-sur). En la región Norte su proporción es mayor en la mitad oeste y se extiende hasta el sur de la Cuenca Wagner, mientras que al sur de la región de las islas es mayor en el lado este del Golfo. En la Cuenca de Guaymas su proporción es alrededor del 20% mientras que en las Cuencas del Carmen, Farallón y Pescadero es del 15%. Por debajo del ASsSt se encuentra el Agua Intermedia del

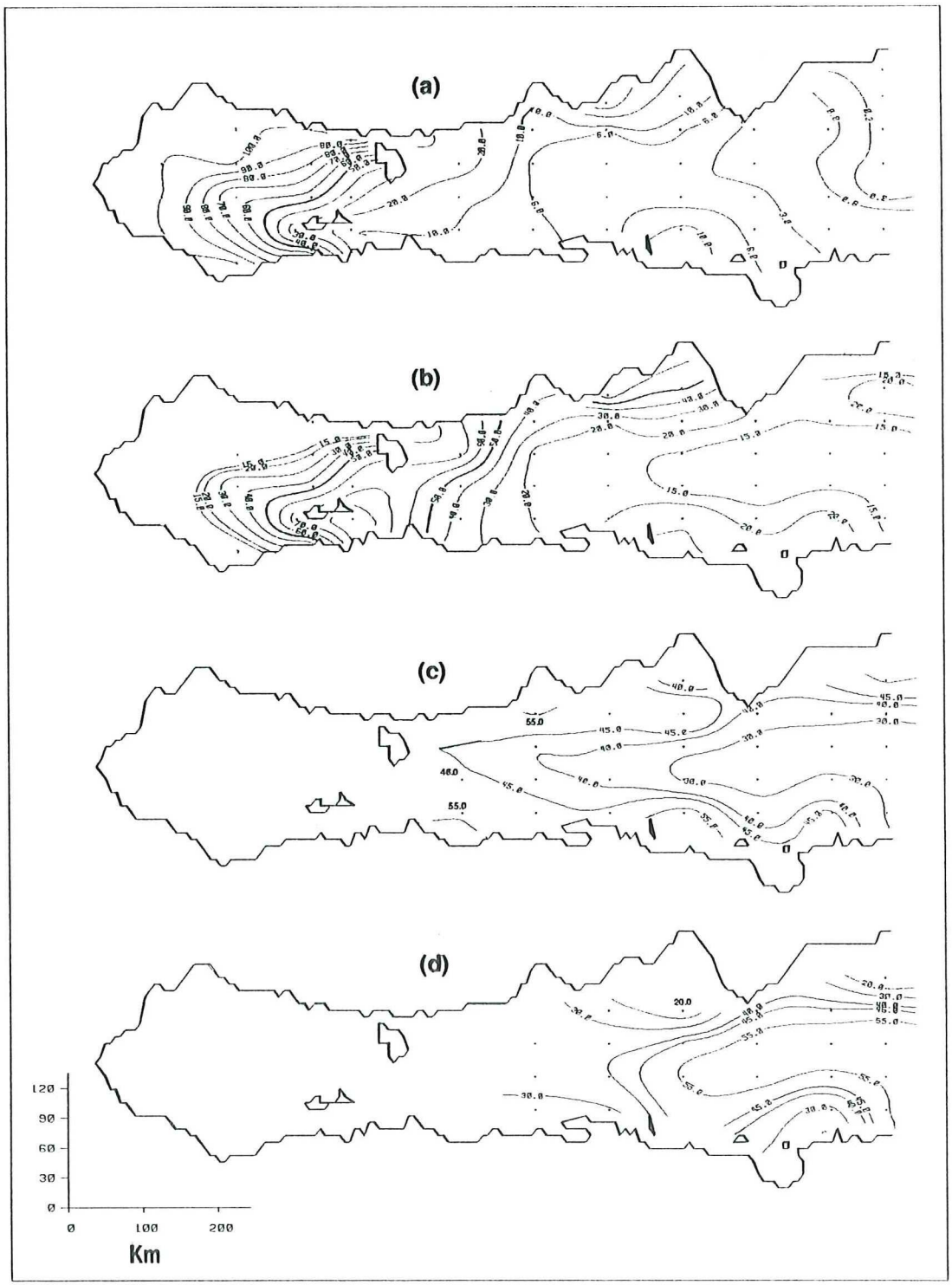


Fig. 9. Distribución promedio anual (1939-1986) de la proporción de las masas de agua : a- Golfo de California (AGC) , b- Subsuperficial Subtropical (ASsSt), c- Intermedia del Pacífico (AIP) y d- Profunda del Pacífico (APP) dentro del Golfo de California.

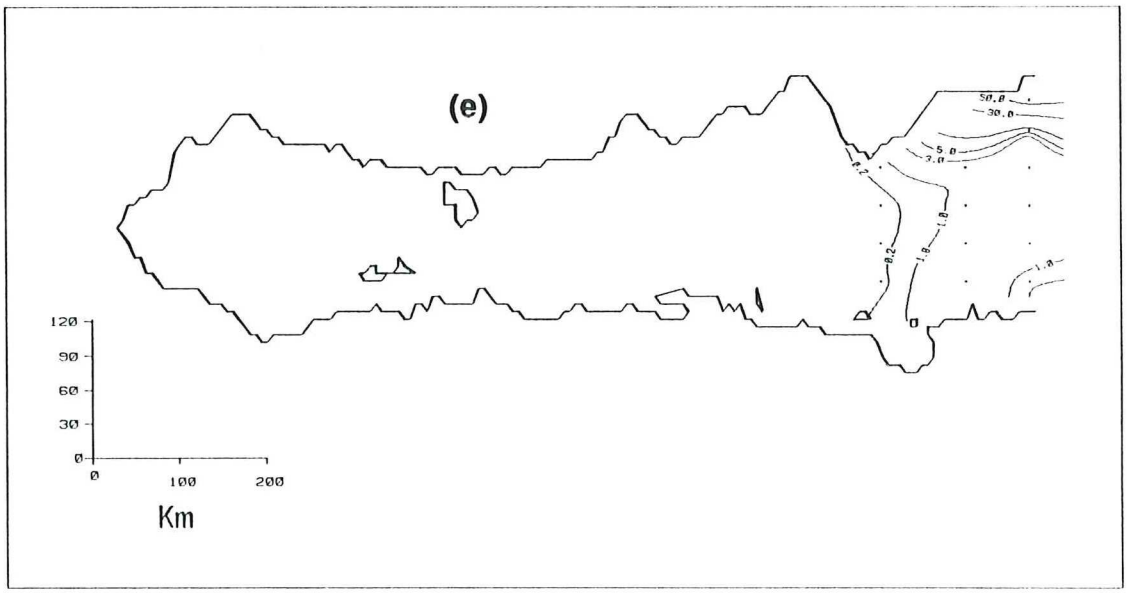


Fig. 9 . (continuación) e- Superficial Ecuatorial (ASE)

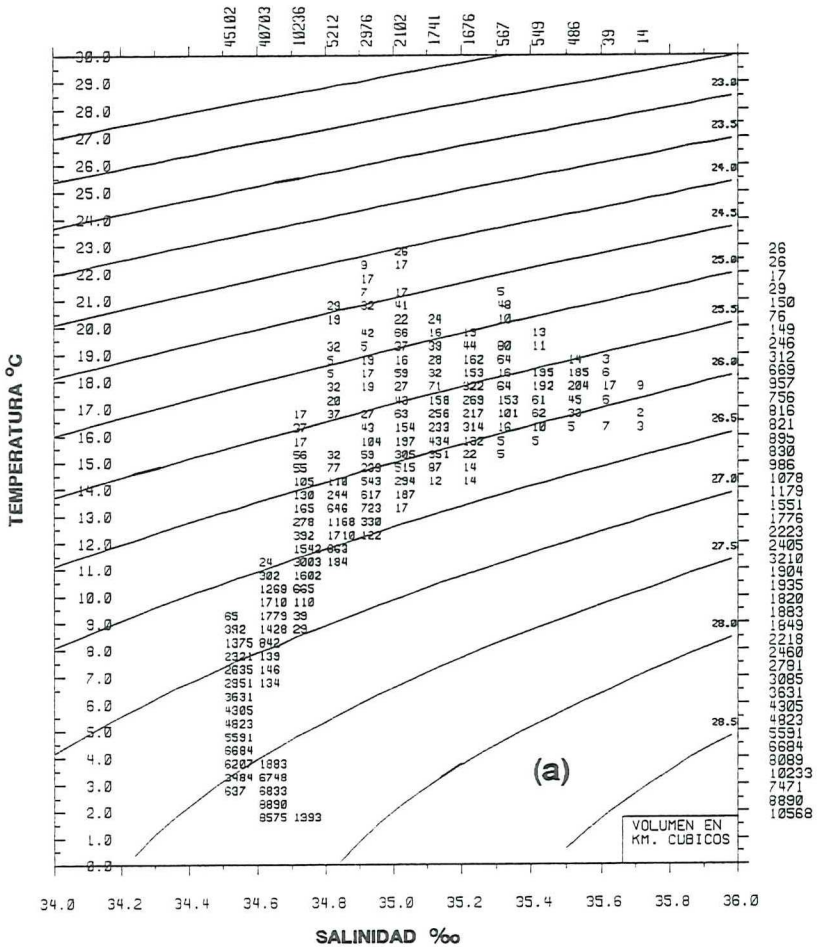
Pacífico (AIP) pero sólo hasta el sur de la región de las islas (Fig. 9c), con su mayor proporción (40%) en la Cuenca de Guaymas y hacia el sur en las Cuencas del Carmen, Farallón y Pescadero (30%). El Agua Profunda del Pacífico (APP), la cual ocupa los niveles más profundos, es observada hasta la Cuenca de Guaymas con una contribución al volumen de esta cuenca del 30%, siendo su proporción mayor hacia el sur por la porción media del Golfo en donde ocupa alrededor del 50% del volumen de las Cuencas del Carmen, Farallón y Pescadero (Fig. 9d).

La masa de Agua Superficial Ecuatorial (ASE) se encuentra confinada a la región Sur del Golfo. Se observa hasta las inmediaciones de la Cuenca Pescadero con su mayor proporción frente a las costas de Sinaloa (Fig. 9e).

V.3 Análisis volumétrico estacional.

Las figuras 10 a 13 muestran para cada estación climática el volumen y la profundidad media del agua de cada clase bivariente presente en el Golfo de California. La información volumétrica de cada masa de agua se resume en la figura 14a, y junto con datos de profundidad media de ocurrencia en la tabla V.

Poco más del 70% del volumen total del Golfo de California es ocupado por AIP y APP durante todo el año; el resto se encuentra distribuido entre las masas de agua superficiales y subsuperficial. La menor proporción de AGC ocurre en primavera y la mayor en verano, lo cual se ve reflejado en las figuras 11a y 12a por un incremento en el número de clases bivariantes - de 78 en primavera a 131 en verano- que corresponden a esta masa de agua. Con respecto a su profundidad no se observan diferencias notables (Figs. 11b y 12b) siendo su promedio de 290 m (tabla V). Con la disminución del



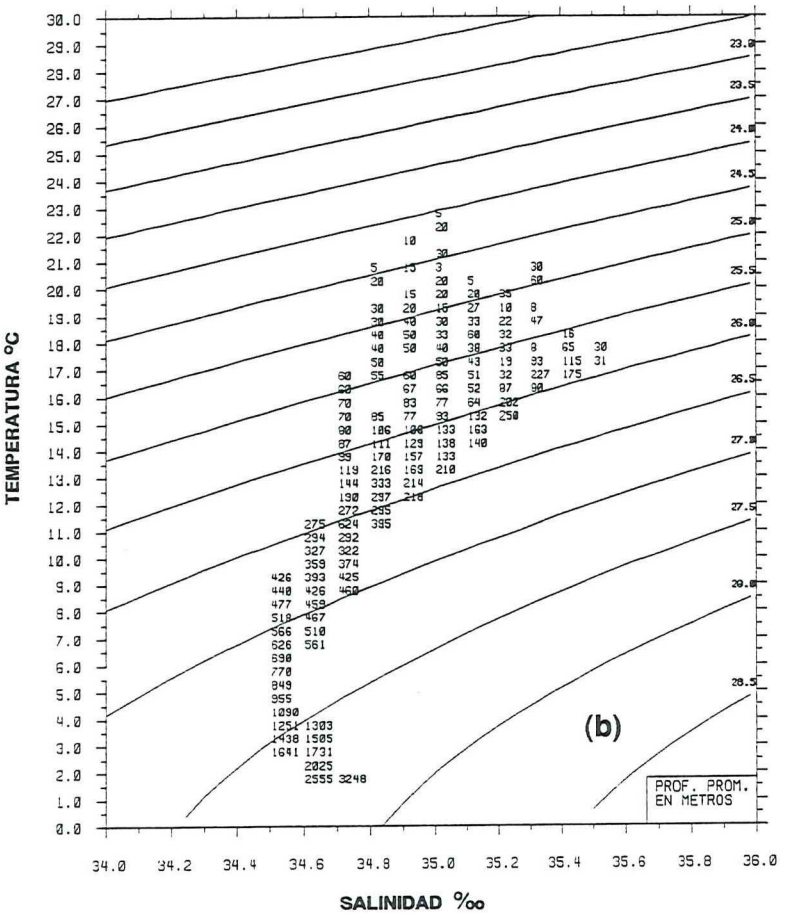


Fig. 10 . Diagrama volumétrico (a) y de profundidad promedio (b) en intervalos bivariantes (0.5 °C X 0.1 ‰) para el Golfo de California en la época de invierno. Las sumas en la parte superior y derecha de la figura (a) describen las distribuciones univariantes de salinidad y temperatura respectivamente. El volumen procesado corresponde a 111,400 Km^3 distribuidos en 161 clases bivariantes, 43 univariantes de temperatura y 13 de salinidad .

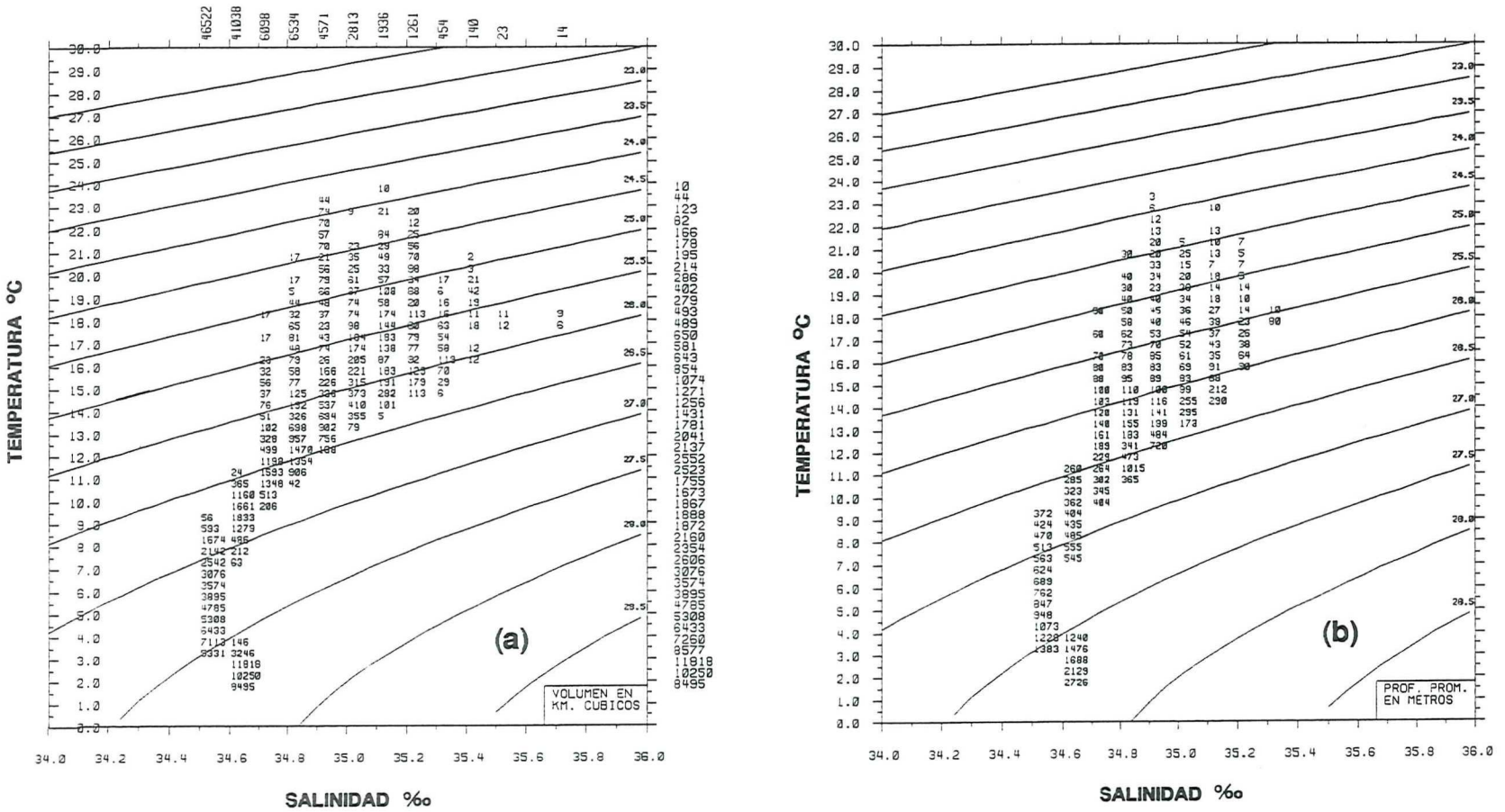


Fig. 11. Diagrama volumétrico (a) y profundidad promedio (b) en intervalos bivariantes (0.5 C X 0.1 ‰) para el Golfo de California en la época de primavera. Las sumas en la parte superior y derecha de la figura (a) describen las distribuciones univariantes de salinidad y temperatura respectivamente. El volumen procesado corresponde a 111,400 Km^3 distribuidos en 164 clases bivariantes, 45 univariantes de temperatura y 12 de salinidad.

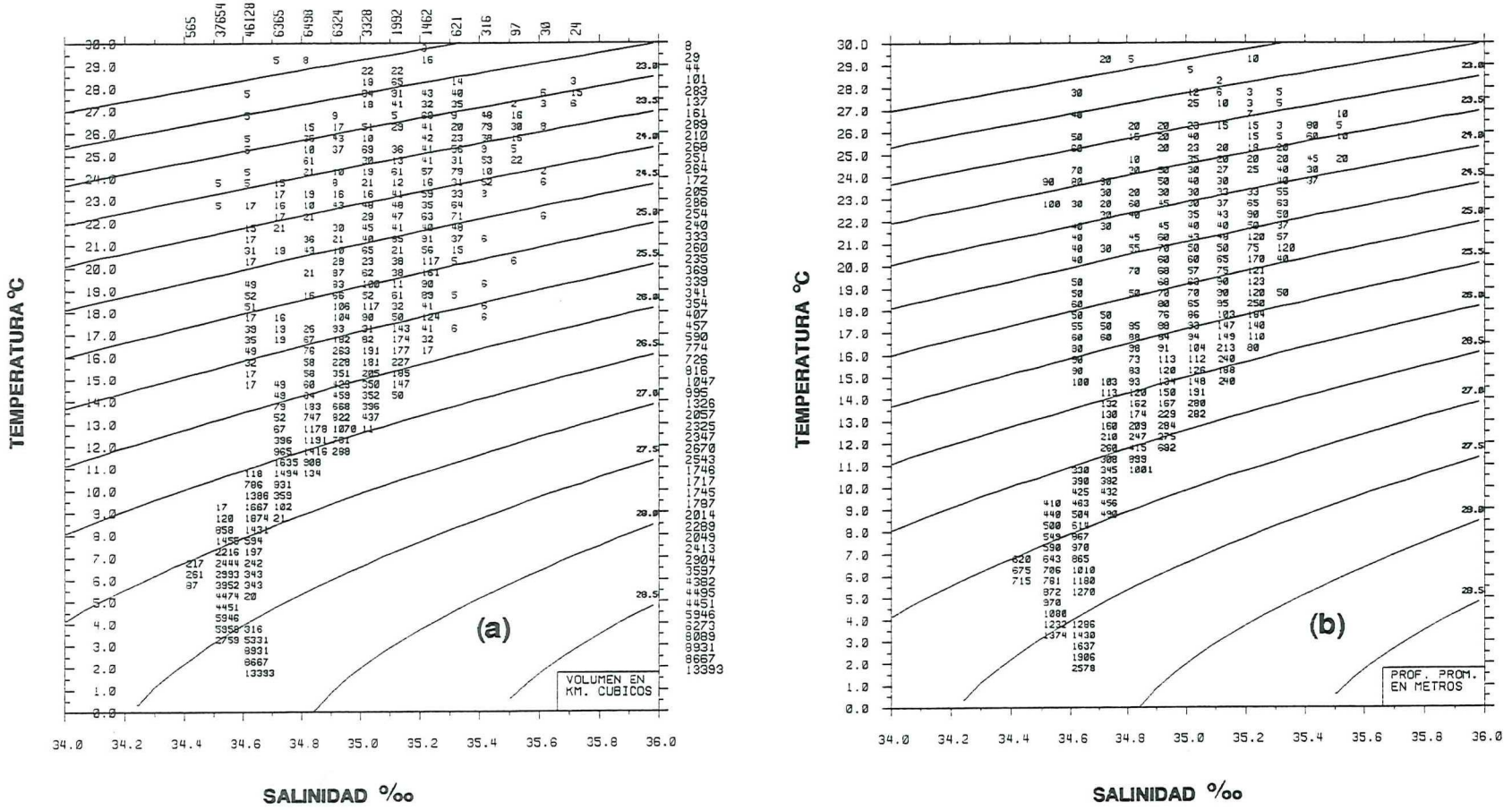


Fig. 12. Diagrama volumétrico (a) y profundidad promedio (b) en intervalos bivariantes (0.5°C X 0.1‰) para el Golfo de California en la época de verano. Las sumas en la parte superior y derecha de la figura (a) describen las distribuciones univariantes de salinidad y temperatura respectivamente. El volumen procesado corresponde a 111,400 Km^3 distribuidos en 269 clases bivariantes, 57 univariantes de temperatura y 14 de salinidad.

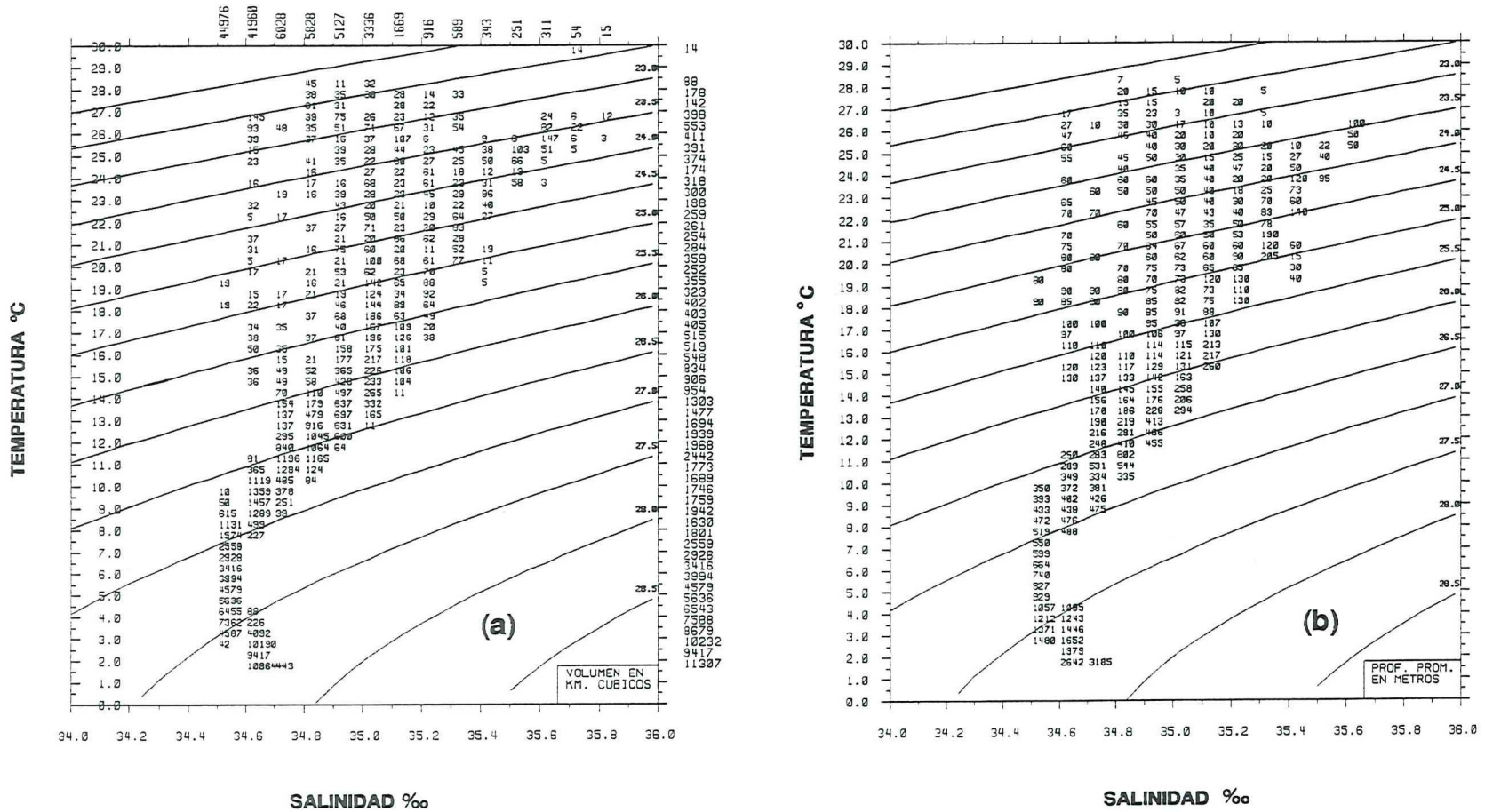


Fig. 13. Diagrama volumétrico (a) y profundidad promedio (b) en intervalos bivariantes (0.5 C X 0.1 ‰) para el Golfo de California en la época de otoño. Las sumas en la parte superior y derecha de la figura (a) describen las distribuciones univariantes de salinidad y temperatura respectivamente. El volumen procesado corresponde a 111,400 Km ^{3} distribuidos en 262 clases bivariantes, 55 univariantes de temperatura y 14 de salinidad.

volumen de AGC de invierno a primavera se observa un incremento en la misma proporción de la masa de agua Ecuatorial (tabla V), la cual se incrementa contínuamente hasta el otoño -desde 13 clases bivariantes en invierno hasta 57 en otoño (Figs. 10a-13a). En verano, cuando el AGC alcanza su máximo volumen se observa también la mayor proporción de la masa de agua ASsSt y la menor en la Intermedia (AIP) (Fig. 14a). Esta situación se invierte en otoño cuando el AIP y el APP incrementan su proporción y disminuye la de ASsSt y AGC. En invierno se observan reducciones en la proporción de las masas de agua superficiales e incremento en la subsuperficial e Intermedia.

Tabla V. Resultados obtenidos del análisis volumétrico para cada una de las estaciones climáticas. Se muestra el volumen de cada una de las masas de agua presentes para cada época en términos porcentuales, así como su profundidad promedio de ocurrencia (Z).

RESULTADOS VOLUMETRICOS ESTACIONALES								
Masa de agua	Invierno		Primavera		Verano		Otoño	
	Vol.(%)	Z (m)	Vol.(%)	Z (m)	Vol.(%)	Z (m)	Vol.(%)	Z (m)
AGC	6	0-250	6	0-295	7	0-290	7	0-230
ASE	< 1	0-50	1	0-50	1	0-100	2	0-90
ACC	0	——	0	——	0	——	0	——
ASsSt	19	40-430	19	40-400	20	30-470	18	85-420
AIP	33	440-1160	32	420-1150	31	440-1150	31	430-1140
APP	41	1160-fondo	42	1150-fondo	41	1150-fondo	42	1140-fondo

La figura 14b muestra las anomalías del volumen de cada masa de agua, las cuales representan las diferencias entre el volumen estacional de cada masa de agua indicado en la tabla V y su correspondiente volumen promedio anual mostrado en la tabla IV. Son evidentes las mayores anomalías tanto positivas como negativas en las masas de agua Intermedia (AIP) y Profunda del Pacífico (APP) en verano y otoño respectivamente, así

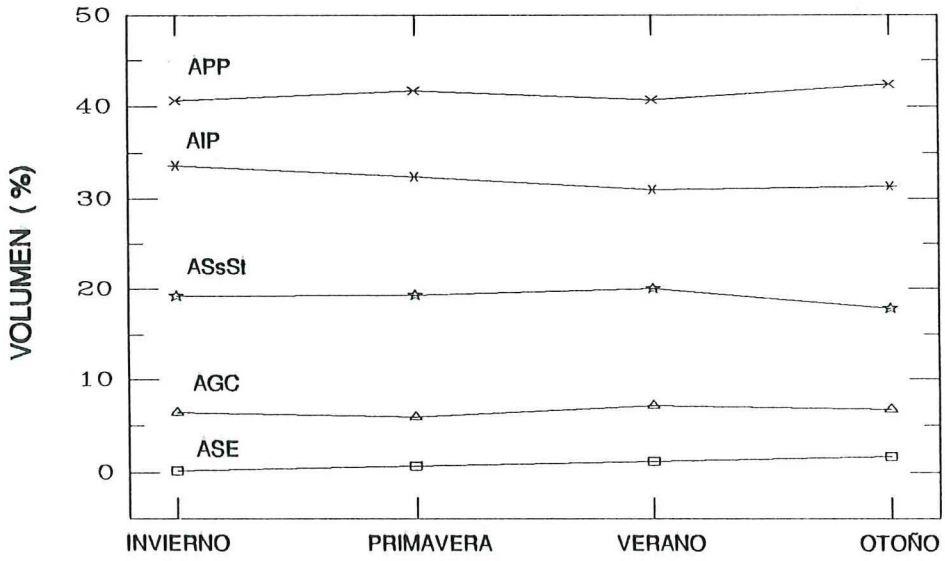


Fig. 14a. Variación estacional de las masas de agua del Golfo de California

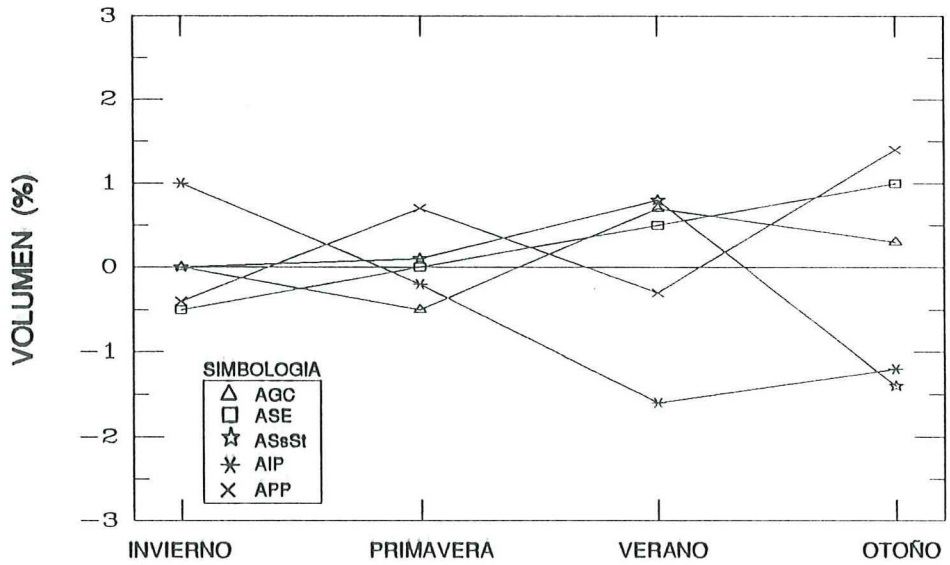


Fig. 14b. Anomalías de la proporción estacional de las masas de agua: Golfo de California (AGC), Superficial Ecuatorial (ASE), Subsuperficial Subtropical (ASsSt), Intermedia de Pacífico (AIP) y Profunda del Pacífico (APP). El recuadro en el interior de la gráfica indica el símbolo asociado a cada masa de agua.

mismo en verano las masas de agua AGC y ASsSt muestran su mayor anomalía positiva respecto a las otras estaciones climáticas. En la masa de Agua del Golfo de California (AGC) se observa un comportamiento sinusoidal con valores positivos en verano y otoño, negativo en primavera y su proporción igual al promedio anual en invierno. Comportamientos semejantes al anterior se observan en las masas de agua ASE y ASsSt, aunque sus máximas anomalías no ocurren en la misma época; el ASE muestra anomalías positivas máximas en otoño y negativas en invierno, mientras que para el ASsSt dichas anomalías ocurren en verano y en otoño respectivamente.

La distribución espacial de la proporción estacional de AGC se muestra en las figuras 15. De primavera a verano se presenta un incremento del volumen de AGC en la región Norte (Fig. 15a-c), el cual se manifiesta como un desplazamiento hacia el sur de la isolínea del 50%. En otoño (Fig. 15d) esta isolínea se encuentra desplazada hacia el norte respecto a verano, continuando este desplazamiento hasta invierno, lo cual sugiere que a partir de otoño el volumen total de AGC disminuye. En la región de las islas la característica más sobresaliente es la variación del contenido de AGC en el Canal de Ballenas, siendo máximo en verano y mínimo en invierno. En la región Central la fluctuación en el volumen de AGC se observa principalmente frente a ambas costas. Sobre la Cuenca de Guaymas su proporción es de ~6% durante todo el año, pero en invierno y primavera (Figs. 15a y b) la isolínea del 6% se extiende hacia la región Sur del Golfo por las costas de Baja California, mientras que en verano y otoño está más desplazada hacia el norte (Figs. 15c y d). Esto es evidencia de una reducción en el volumen de AGC a lo largo de la costa oeste del Golfo durante verano y otoño. Hacia la costa opuesta (Sonora) el volumen de AGC se incrementa hasta ~40% en las áreas más someras al sur de la Isla Tiburón y frente al sur de Sonora. Este rasgo es persistente a través del año. En el Golfo Sur, particularmente frente al norte de Sinaloa y sur de Baja

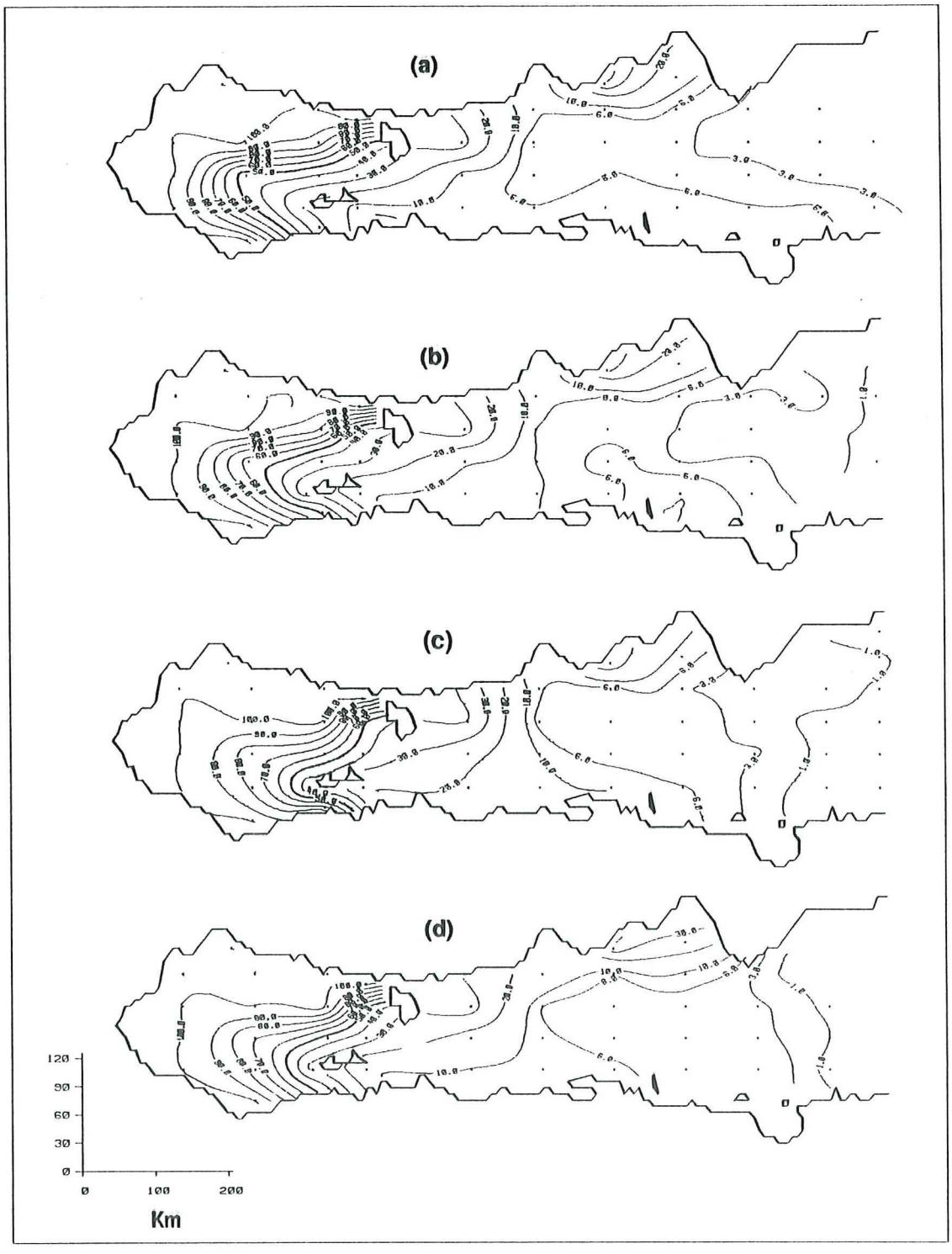


Fig. 15 .Distribución de la masa de Agua del Golfo de California (AGC) durante invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) en el Golfo de California.

California, la proporción de volumen de AGC es mínima, entre 1 y 3% durante todo el año. Sólo en invierno frente al extremo sur de Baja California la proporción de AGC es mayor, entre 3 y 6%, igual que más al norte siguiendo el eje longitudinal del Golfo casi hasta la altura de Guaymas, Son.

Comparando las distribuciones estacionales (Fig. 15) y anual (Fig. 9a) del volumen de AGC, en el Golfo Norte el desplazamiento del contorno del 50% sugiere que el volumen de AGC en esta región es menor en invierno y mayor en verano que el promedio anual. En el Golfo Central y Sur el volumen promedio anual de AGC es similar al descrito para cada estación del año, aumentando hacia la costa de Sonora, excepto en el extremo sur del Golfo donde el volumen de AGC es mayor frente a Baja California.

La profundidad promedio del AGC muestra variaciones a lo largo del Golfo (Fig.16a); en general es más somera en la boca (~100 m) que en la región Norte (~210 m), donde el AGC puede llenar a cuencas con tal profundidad (ver también Fig. 5c, S≥35.0 ppm). La variación de la profundidad del AGC es más grande al sur de las grandes islas durante el verano (~100 m) y entre las islas y la región Norte durante el invierno (~50 m) y primavera (~75 m) (Fig. 16b). En la boca del Golfo la profundidad del AGC cambia poco a través del año, siendo mínima en verano y otoño y máxima (~40 m) en primavera. En el extremo norte del Golfo el AGC llena toda la columna de agua (Fig. 16a).

A diferencia del AGC, en las masas de agua restantes los desplazamientos hacia el norte de las isolíneas de porcentaje relativo indican un incremento en su volumen, y por el contrario, los desplazamientos hacia el sur implican una disminución. Comparando la

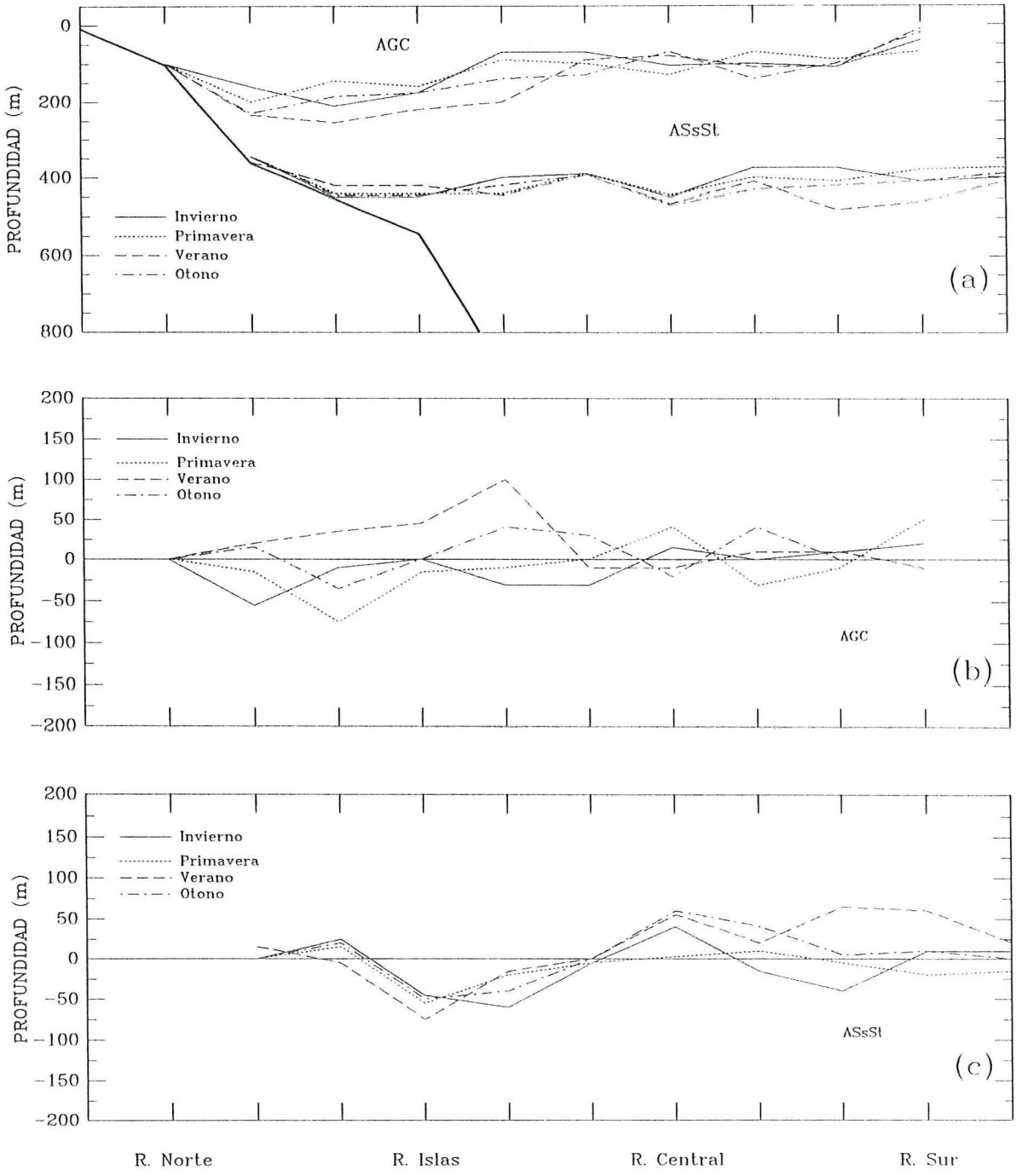


Fig. 16 . Variación estacional de la profundidad de las masas de agua AGC y ASsSt a lo largo del Golfo de California (a) y su variación estacional respecto al promedio anual (b). La ubicación de esta sección longitudinal se muestra en la figura 2.

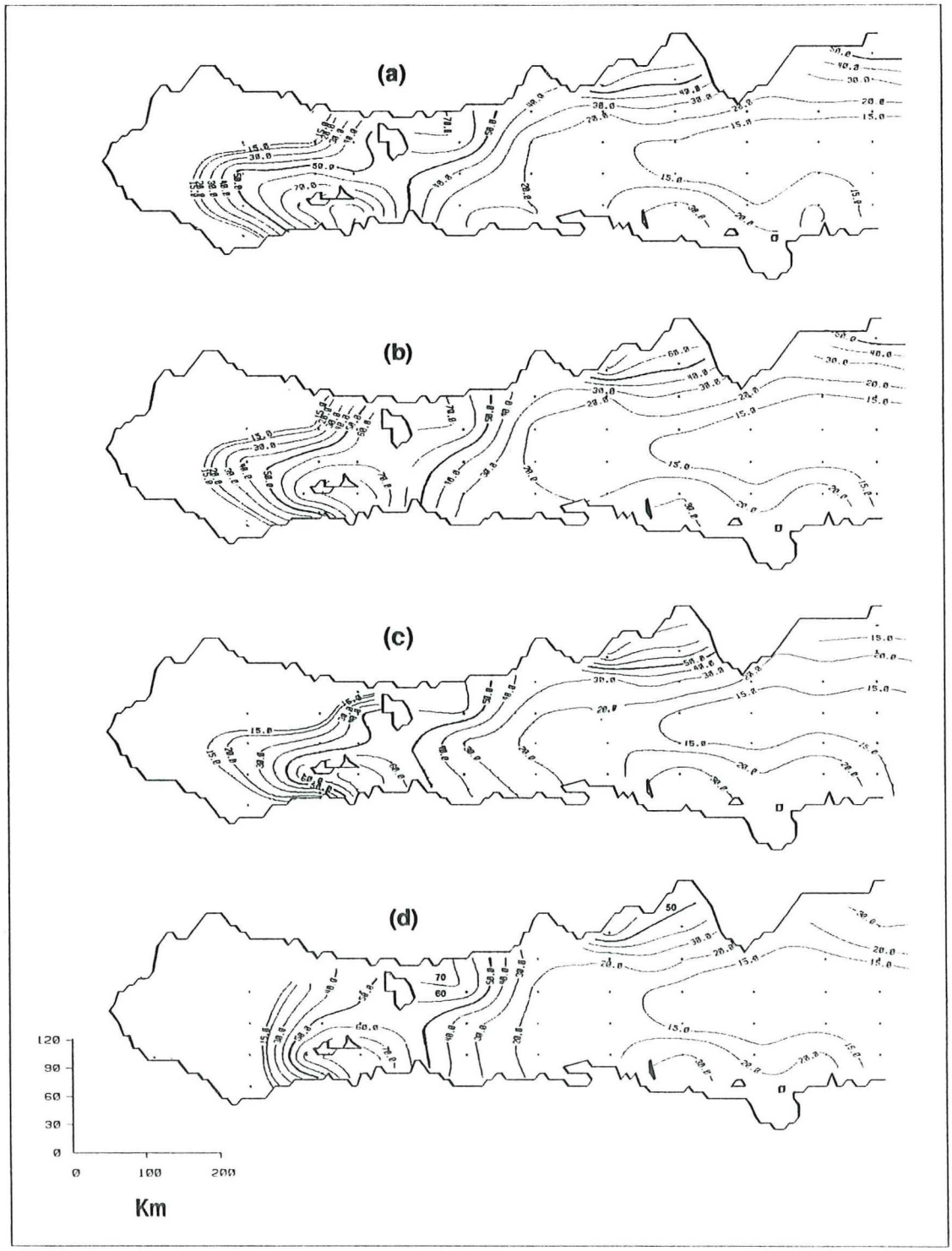


Fig. 17 . Distribución de la masa de Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) durante invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) en el Golfo de California.

posición de las isolíneas del 50% del ASsSt en cada estación climática (Fig. 17) con las del promedio anual (Fig. 9b), se encuentra que en invierno están desplazadas hacia el norte (mayor volumen), mientras que en primavera y en verano lo están hacia el sur (menor volumen). En otoño se encuentran muy cercanas al promedio, de tal manera que el comportamiento que describen tiene un carácter sinusoidal. La profundidad media del ASsSt muestra pequeñas oscilaciones a lo largo del Golfo, alrededor de los ~400 m, siendo máxima en otoño (~450 m) y en la región de las islas, en verano en la región Sur, y mínima tanto hacia la boca como hacia la región Norte del Golfo (Fig. 16a). Una característica que se observa en la región de las islas es la presencia de anomalías negativas en cualquier estación climática (Fig. 16c), a diferencia con la región Norte en donde éstas son siempre pequeñas y positivas, y con la región Sur donde ocurren las mayores anomalías positivas durante verano.

La distribución del porcentaje relativo de la masa de agua Intermedia (AIP) (Fig. 18) y Profunda del Pacífico (APP) (Fig. 19) no muestra notables variaciones con respecto a su distribución promedio anual (Fig. 9c y d respectivamente). El AIP es la segunda masa de agua en proporción volumétrica (33%) dentro del Golfo de California, ésta se extiende hasta el extremo sur de la región de las islas, aproximadamente hasta la isóbata de los 450 m, y su proporción se incrementa hacia el interior del Golfo y hacia el extremo de Baja California, con su mayor proporción en la Cuenca de Guaymas (40-50%) y menor (30%) en las cuencas profundas de la región Sur (Carmen, Farallón y Pescadero). El APP ocupa el mayor volumen de todas las masas de agua del Golfo de California (41%). A diferencia del AIP la proporción del APP disminuye hacia el interior del Golfo, con su mayor proporción (55%) en la porción media de la región Sur, contribuyendo mayormente al volumen de las cuencas profundas de esta región. La distribución espacial del APP muestra que esta masa de agua se localiza hasta la Cuenca

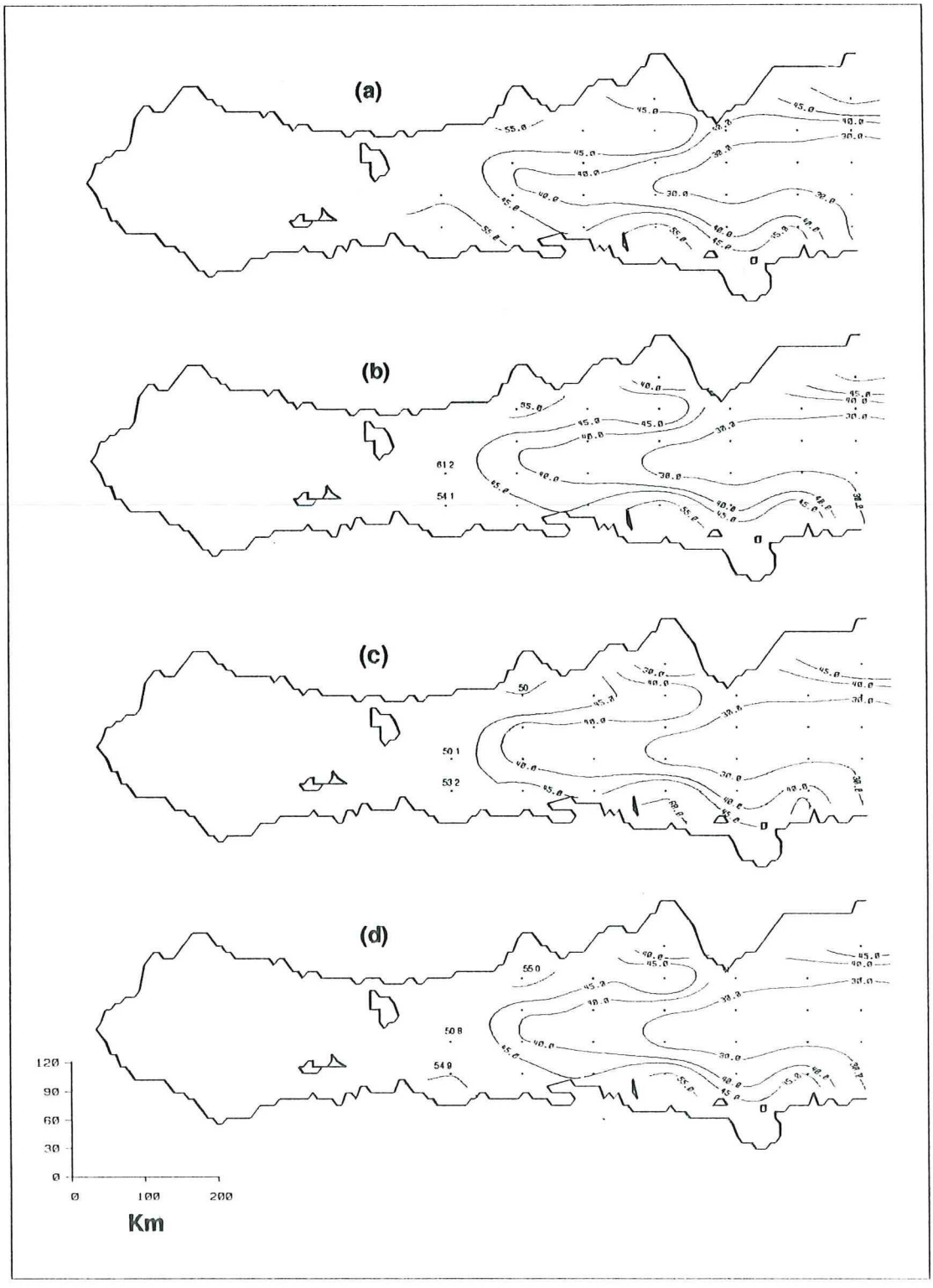


Fig. 18. Distribución de la masa de Agua Intermedia del Pacífico (AIP) durante invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) en el Golfo de California.

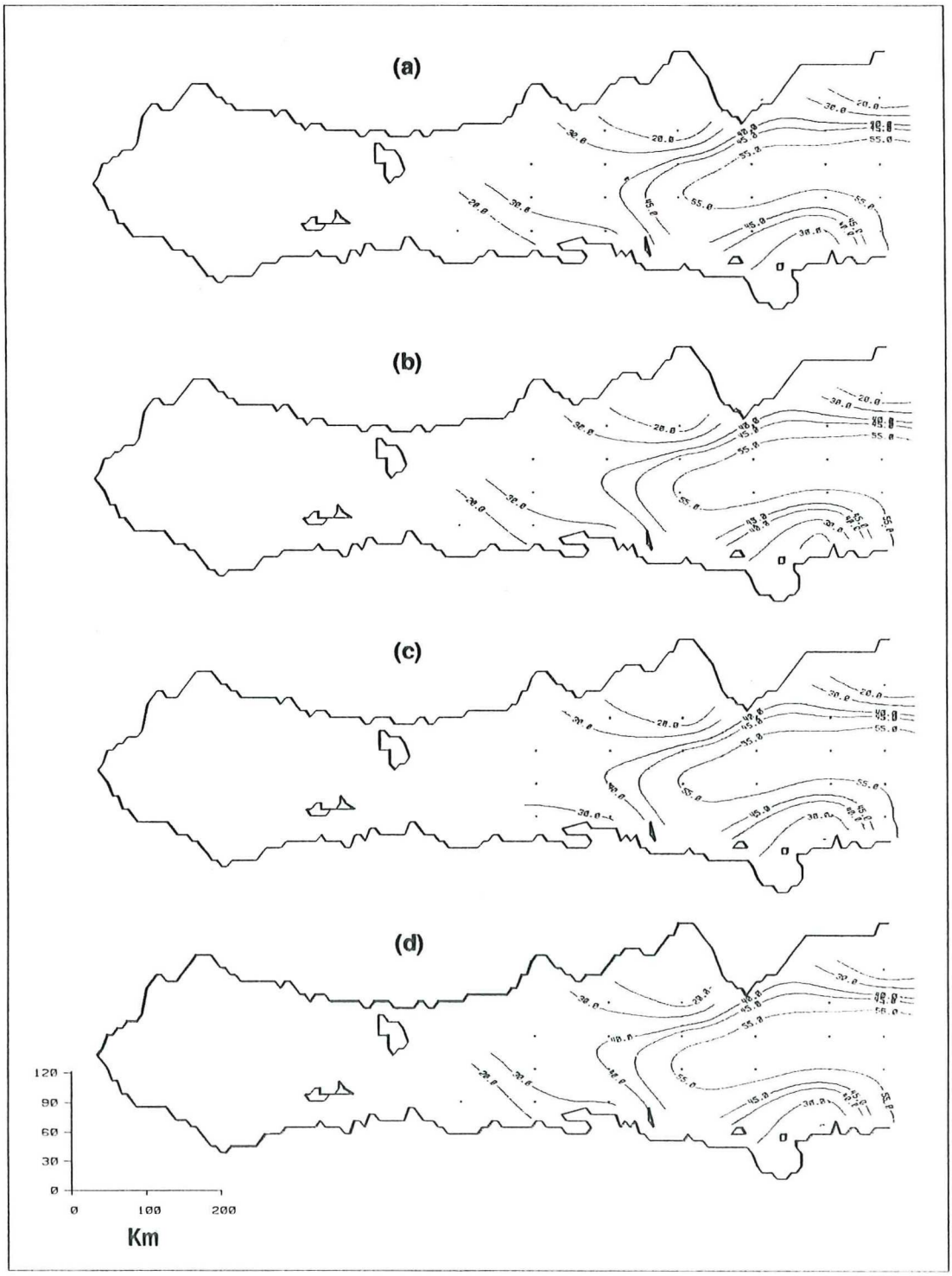


Fig.19. Distribución de la masa de Agua Profunda del Pacífico (APP) durante invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) en el Golfo de California.

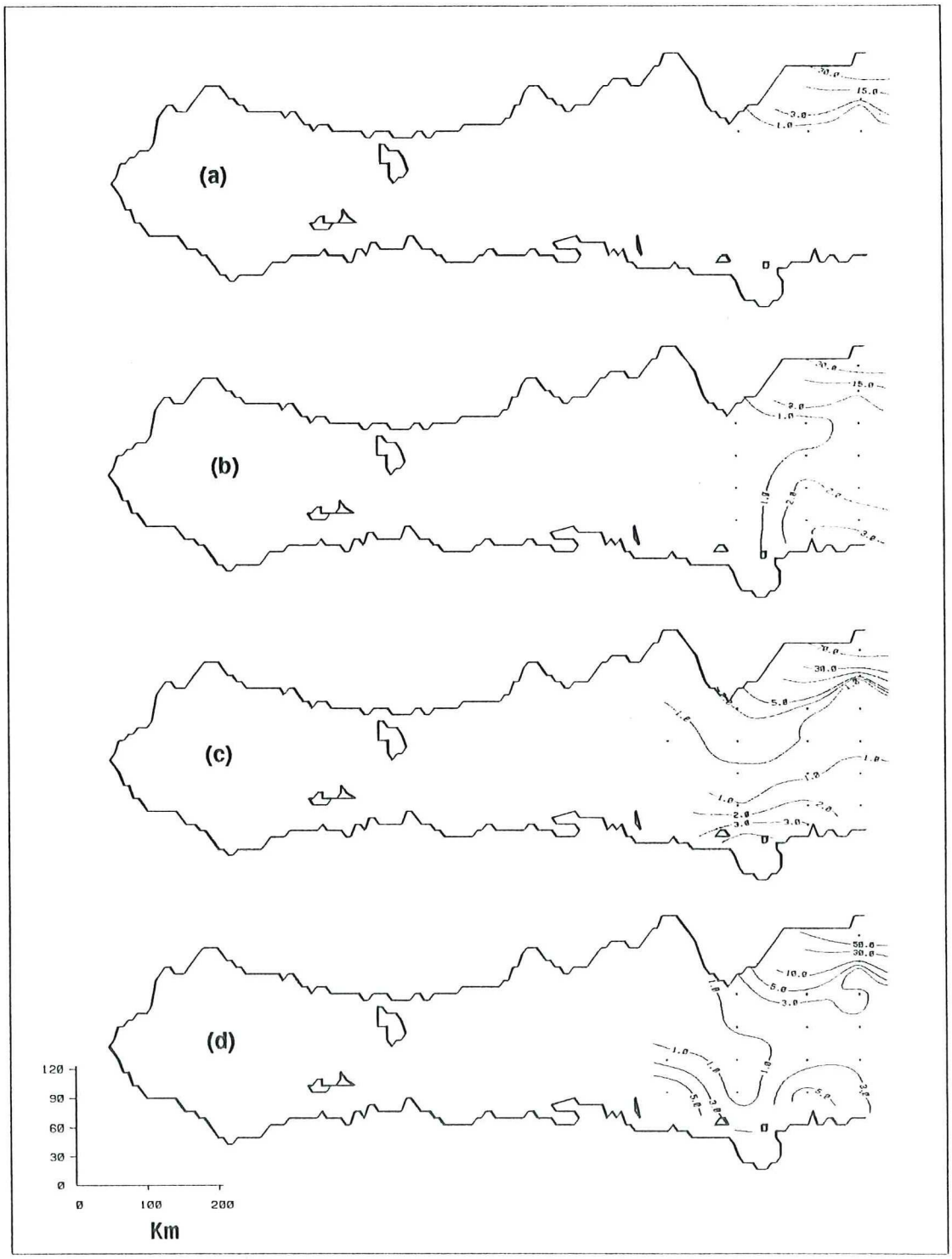


Fig. 20 . Distribución de la masa de Agua Superficial Ecuatorial (ASE) durante invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) en el Golfo de California.

de Guaymas y contribuye al volumen de esta cuenca con aproximadamente el 30%. Su extensión dentro del Golfo corresponde aproximadamente con la isóbata de 1200 m. Tanto el AIP como el APP reflejan en su distribución espacial los rasgos topográficos de las regiones Central y Sur del Golfo.

La masa de agua ASE se distribuye hasta las inmediaciones de la Cuenca del Carmen, extensión que alcanza en las épocas de verano y otoño (Fig. 20) cuando su volumen dentro del Golfo es mayor. Durante primavera e invierno su presencia es observada sólo hasta la Cuenca de Pescadero, en la región Sur del Golfo. Con respecto a su promedio anual (Fig. 9e) se encuentra distribuida más hacia el norte en verano y otoño y hacia el sur en invierno y primavera.

Con respecto a la masa de Agua de la Corriente de California (ACC) en este análisis no fué detectada. En el siguiente capítulo se tratará de explicar las posibles causas de ello.

V.4 Efectos de EL Niño-Oscilación del Sur (ENOS).

Con base en los antecendentes del área de estudio se procesó por separado la información de marzo y octubre de 1983 (marzo-83, oct-83 respectivamente), año en que ocurrió un evento de El Niño. El correspondiente diagrama volumétrico y el de profundidad promedio de ocurrencia para marzo-83 se muestran en las figuras 21a y 21b respectivamente. Para fines de comparación se procesó la información de marzo de 1984 (marzo-84) considerando la misma cobertura espacial que en marzo-83, obteniendo los resultados mostrados en las figuras 22a-b. La forma de los diagramas volumétricos de marzo-83 y marzo-84 muestra notables diferencias entre ambos periodos. En marzo-83 se

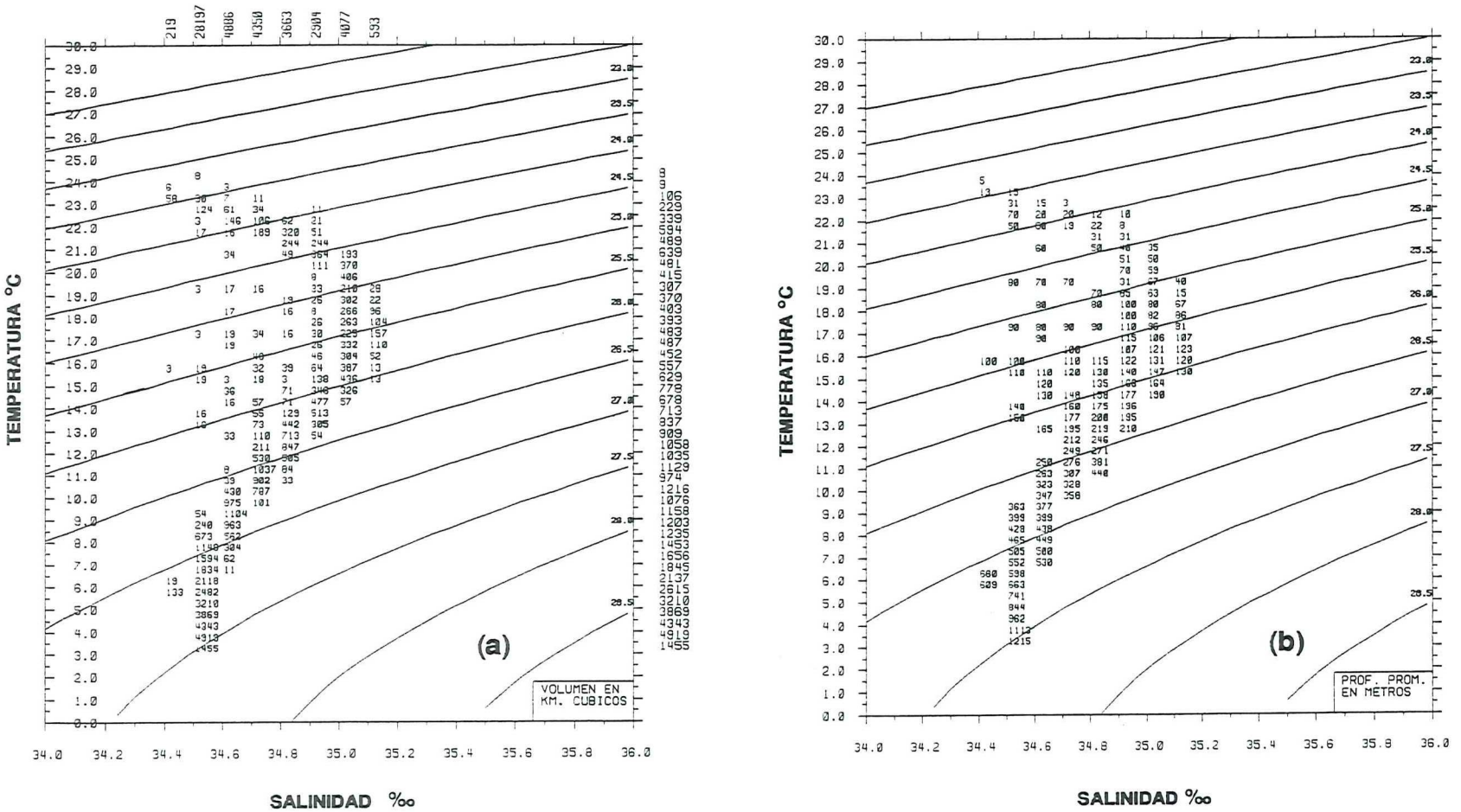


Fig. 21. Diagrama volumétrico (a) y profundidad promedio (b) en intervalos bivariantes (0.5°C X 0.1‰) para el Golfo de California para marzo de 1983. Las sumas en la parte superior y derecha de la figura (a) describen las distribuciones de salinidad y temperatura respectivamente. El volume procesado corresponde a 50,000 Km^3 distribuidos en 134 clases bivariantes, 43 univariantes de temperatura y 8 de salinidad.

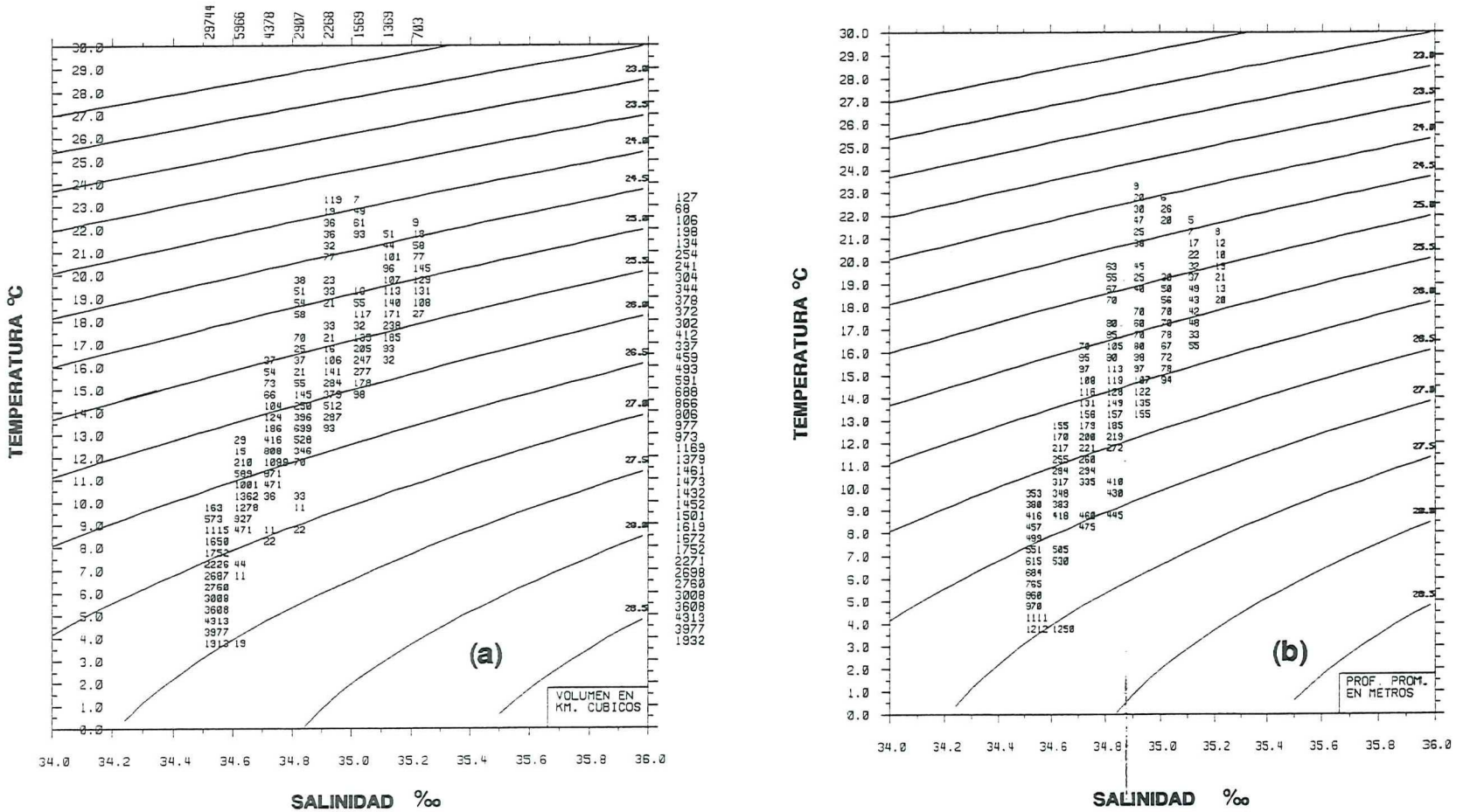
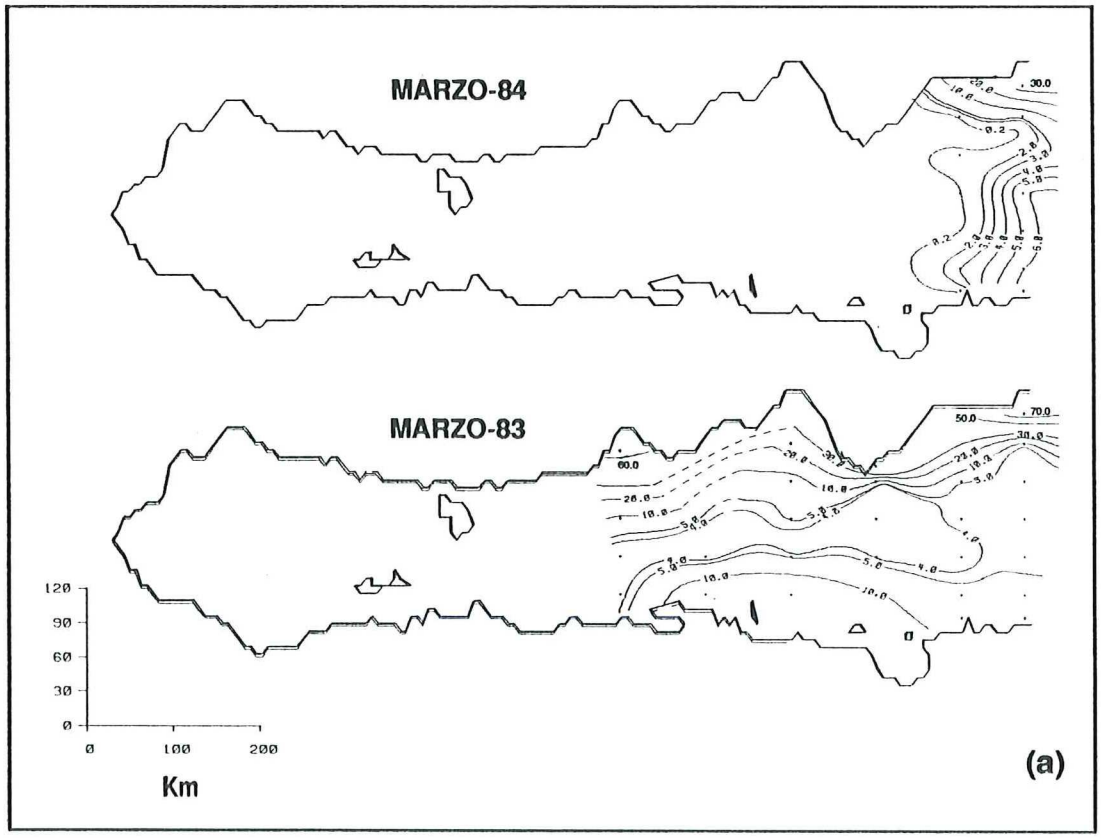


fig. 22. Diagrama volumétrico (a) y profundidad promedio (b) en intervalos bivariantes (0.5° C X 0.1°/‰) para el Golfo de California para marzo de 1984. Las sumas en la parte superior y derecha de la figura (a) describen las distribuciones de salinidad y temperatura respectivamente. El volumen procesado corresponde a 50,000 Km^3 distribuidos en 115 clases bivariantes, 40 univariantes de temperatura y 8 de salinidad.

observa agua más caliente y menos salina en la capa superficial (0-50 m) que en marzo-84 (Fig. 21a y 22a). En marzo-84 en la capa superficial la mínima clase univariante en salinidad es de 34.9 ppm (Fig. 22b), mientras que en marzo-83 corresponde a la clase de 34.4 ppm (Fig. 21b). La temperatura en esta capa superficial de 50 m abarca el intervalo de 18.5-23.0 °C en marzo-84 y de 20.5-23.5 °C en marzo-83. El volumen de ASE en marzo-83 (2490 Km^3) es mayor que en marzo-84 (600 Km^3) pero en oct-83 (3580 Km^3) es mayor que en marzo-83 y también lo es con respecto a otros períodos. En la distribución espacial del ASE (Fig. 23a) se observa que en marzo-83 se distribuye hasta la región Central, estando más hacia el norte que su promedio anual (Fig. 8e), y en marzo-84 se observa únicamente en la región Sur.



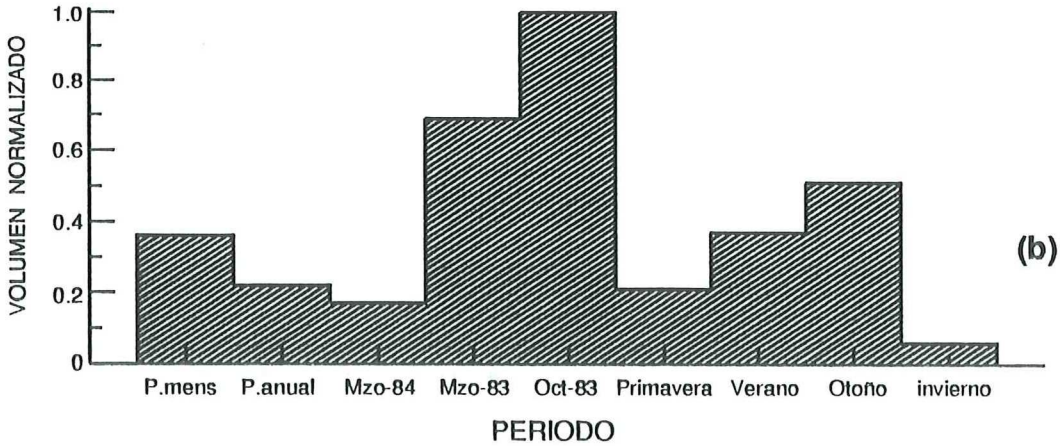


Fig. 23. Distribución de la proporción de la masa de Agua Superficial Ecuatorial en marzo de 1984 y marzo de 1983 en el Golfo de California (a), y su volumen asociado (b) en el promedio mensual de marzo (P.mens), promedio anual (P.anual), marzo de 1984 (Mzo-84) , marzo de 1983 (Mzo-83), octubre de 1983 (oct-83) y en las cuatro estaciones climáticas. El volumen está normalizado con respecto a oct-83 (3580 Km^3).

VI DISCUSIONES

En esta sección se inicia con una breve discusión sobre los índices T, S característicos de cada masa de agua presente en el Golfo de California (GC), luego se intenta establecer algunas tendencias generales sobre el comportamiento estacional y espacial de las masas de agua del GC y se sugieren posibles explicaciones sobre el comportamiento de las mismas. Finalmente se analiza una anomalía volumétrica detectada en la masa de Agua Superficial Ecuatorial en marzo y octubre de 1983.

VI.1 Intervalos T-S de las masas de agua.

La caracterización T,S de las masas de agua del Golfo de California (GC) en trabajos previos es un tanto confusa y limitante, particularmente para realizar análisis volumétricos. En gran parte de la literatura las masas de agua del GC no son distinguidas mediante intervalos de temperatura y salinidad característicos (tabla I), sino que son reconocidas por ciertos rasgos distintivos, principalmente máximos o mínimos en perfiles de salinidad. Por ello en este trabajo se realizó una caracterización de las masas de agua del GC en términos de sus intervalos T,S con el propósito de complementar y actualizar la información que al respecto existe, y de poder realizar el análisis volumétrico de ellas.

En este trabajo la selección del límite inferior del intervalo de salinidad del AGC (35.0 ppm), se basó en el hecho de que en el Alto Golfo (donde es formada el AGC), toda la columna de agua tiene siempre salinidad ≥35.0 ppm (Figs. 5, 15 y 17 a 20; Wyrtki, 1967; Bray, 1988b; Lavín et al., sometida a J. Geophys. Res.). También en una relación T-S característica del interior del Golfo, donde no es común la presencia de

masas de agua superficiales de baja salinidad (ASE y ACC), por lo que los puntos T-S del AGC, ASsSt y AIP caen en una misma línea recta (Figs. 7a, b), y la mezcla vertical en la capa superficial puede ser entre AGC y ASsSt solamente. En tal relación T-S el valor de 34.9 ppm queda muy cerca del núcleo del ASsSt (~34.8 ppm, $\sigma_t \approx 26.4$), lo que sugiere una mayor proporción de ASsSt en su mezcla con AGC. Por lo tanto, en este trabajo, y de acuerdo con Wyrtki (1967), se decidió usar el valor de 35.0 ppm como límite inferior del intervalo de salinidad del AGC, en vez de 34.9 ppm como en Warsh et al., (1973), Alvarez-Sánchez et al. (1978), Alvarez-Borrego y Schwartloze (1979) y Alvarez-Borrego y Lara-Lara (1991).

Aunque Wyrtki (1967) distingue también el AGC con S≥35.0 ppm, difiere en cuanto al intervalo de temperatura (15 °C-30 °C). En la figura 7b se observa que para salinidades ≥35.0 ppm la mayor temperatura es de alrededor de 32 °C, a diferencia de los 30 °C que consideró Wyrtki (1967). Además, la mínima temperatura de 15 °C asignada al AGC por Wyrtki (1967) es mayor al valor usado en este trabajo (12 °C). Este valor de 12 °C se obtuvo en base a la asociación de la isohalina de 35.0 ppm con la isoterma de 12 °C (Figs. 5, 6 y 7). Al comparar el intervalo de temperatura del AGC reportado por Warsh et al., (1973) con el empleado en este trabajo, se observa una diferencia en el límite superior. Esta diferencia se debe a que estos autores emplearon datos del mes de julio, cuando la temperatura superficial alcanzada por el Golfo de California no era la máxima (ver Ripa y Marinone, 1989; su figura No. 4). Otros autores referidos en la tabla I no específican valores de temperatura.

En la literatura, pocos son los trabajos que indican ambos intervalos T,S para el ASsSt. Warsh et al., (1973) consideran que el ASsSt en la entrada del Golfo, es más bien una mezcla de ASsSt y ACC; a esta agua mezclada le llaman "Agua de Transición

B" y le asignan intervalos de 34.6-34.9 ppm y 13-20 °C, semejantes a los empleados aquí para el ASsSt (34.5< S ppm <35.0 ppm, 9≤ T °C <18.0). Estos últimos contienen claramente al núcleo del ASsSt (~34.8 ppm; Fig. 7a), a diferencia de los correspondientes al "Agua de Transición B" que están por encima de dicho núcleo.

En este trabajo se considera el AST como agua de origen ecuatorial modificada en su desplazamiento hacia el norte por exceso de precipitación sobre evaporación, por lo que se decidió hacer referencia a una sóla masa de agua bajo el nombre de ASE. A esta masa de agua se le asignó un intervalo de salinidad de S<35.0 ppm y de temperatura T≥18.0 °C, los que son más amplios que los mostrados en la tabla I para el AST. Sin embargo, dichos intervalos son consistentes con los asignados al ASE por Wyrtki (1967), así como con la caracterización por Roden y Groves (1959) del agua del Pacífico Tropical Oriental en la región de la entrada del Golfo (sus figuras 10, 11 y 12).

En el caso del ACC el intervalo de salinidad aquí usado es consistente con la mayoría de los autores referidos en la tabla I. Kin'dyushev (1968) indica un valor de salinidad mucho menor (33.5 ppm) al resto de los autores en la tabla I. Es evidente que tal valor de salinidad corresponde al ACC en la región de la Corriente de California.

Las masas de agua AIP y APP previamente han sido identificadas por ciertos rasgos característicos en los perfiles de salinidad. El AIP por un mínimo profundo de salinidad en su núcleo, y el APP por un incremento leve de la salinidad con la profundidad a partir del mínimo del AIP. Los intervalos empleados para el AIP encierran bien a su núcleo, su límite superior obedece a mezcla con el ASsSt, y el inferior con la del APP. El límite inferior del APP corresponde con el valor de la temperatura y salinidad de los niveles más profundos muestreados en el Golfo.

VI.2 Análisis volumétrico.

El notable incremento en el número de clases univariantes de temperatura a partir de los 22.5 °C de primavera a verano (Figs. 9-12), es consistente con el desarrollo de la termoclina estacional. Según Roden (1964), Robles y Marinone (1987) y Alvarez-Borrego (1983) la termoclina se desarrolla de abril a octubre, siendo más fuerte en agosto cuando el gradiente vertical de temperatura entre la superficie y los 150 m de profundidad es de ~16 °C. Tal comportamiento es evidente también en las secciones longitudinales de temperatura de este trabajo (Figs. 6).

La hipótesis de Sverdrup (1941) acerca de la formación de la masa de Agua del Golfo de California (AGC) en la región Norte del Golfo es apoyada por Alvarez-Borrego y Schwartzlose (1979), Bray (1988b) y recientemente por Lavín et al. (sometida a J. Geophys. Res.): sus resultados muestran un incremento en la salinidad con la profundidad, de 35.30 ppm en la superficie a 35.55 ppm en el fondo de la Cuenca Wagner. Lo anterior es consistente con ciertos resultados en este trabajo, particularmente con el hecho de que en el Golfo Norte, en la capa superficial (~200 m), las salinidades más altas (≥35.5 ppm) se asocian con bajas temperaturas (< 20°C) durante el invierno (Figs. 5a, 6a y 10a,b). Además, la proporción del volumen de agua con tales características T-S, supuestamente sólo observadas en el Golfo Norte (Roden, 1964; Bray, 1988a), es más alto en invierno que en primavera, e igual a cero en verano y otoño (Figs. 10 a 13). Sin embargo la proporción de volumen de AGC (como fué definida en este trabajo con S≥35.0 ppm) es poco mayor en verano y otoño (7%) que en invierno y primavera (6%) (Figs. 10 a 13, tabla V). Tal diferencia del 1% puede ser significativa, ya que se refiere al volumen total procesado (111,400 Km^3) y representa casi el 15% del volumen máximo de AGC (~8000 Km^3). Esta variación estacional en el volumen de AGC sugiere que esta masa de agua puede ser formada también en otras

épocas del año, no solamente durante invierno en el Alto Golfo, en tal caso, quizás por calentamiento solar y evaporación, sin convección vertical en el Alto Golfo y probablemente también en otras áreas costeras someras del Golfo Central y Sur.

En relación a la distribución espacial de la proporción de volumen de AGC, ésta aumenta de sur a norte tanto en el promedio anual (Fig. 9a) como en cualquier época del año (Figs. 15a-d). Sin embargo, la región donde el volumen total (100%) corresponde exclusivamente al AGC, se restringe al Alto Golfo y a las áreas costeras más someras del Golfo Norte, principalmente frente a Sonora. En otras palabras, sólo en dichas áreas la salinidad en toda la columna de agua es mayor o igual que 35.0 ppm (lo que en este trabajo caracteriza al AGC) por lo que en dichas áreas sólo existe AGC en cualquier época del año.

Lo anterior es explicable en parte por la formación del AGC en el Alto Golfo y por el aumento hacia el sur tanto en el número como en el volumen de otras masas de agua, particularmente desde el umbral hacia la boca del Golfo. Conforme la profundidad del fondo aumenta hacia el sur la proporción de AGC decrece, mientras la mayor parte del volumen del Golfo Central y Sur es ocupada por otras masas de agua de gran cobertura océanica y más densas que el AGC, como el AIP y el APP. Adëmás, en su camino hacia el sur el AGC puede ser modificada y perder su identidad por mezcla con aguas menos salinas. Específicamente con ASsSt en la región del umbral de Salsipuedes-Tiburón, en donde las corrientes fuertes de marea provocan agitamiento de la columna de agua, y la ocurrencia de saltos hidráulicos propicia la mezcla sobre el umbral (Paden, 1990; Simpson et al., en prensa). Más al sur, también por mezcla con otras masas de agua superficiales como ASE y ACC.

Otro rasgo sobresaliente en las figuras 9a y 15 es la conformación y magnitud de las isolíneas de volumen de AGC al norte del umbral de Salsipuedes-Tiburón. Su forma, como una lengua desde el umbral hacia el norte, se asemeja a la batimetría del Golfo Norte (Fig. 1) y su magnitud decrece abruptamente hacia las cuencas más profundas de la región. Esto implica que al menos una masa de agua invade al Golfo Norte desde el sur a través del umbral de Salsipuedes-Tiburón, la cual contribuye significativamente al volumen total del Golfo Norte, específicamente al de sus cuencas más profundas. Más adelante se argumentará que se trata de la masa de Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt).

El desplazamiento hacia el sur de la isolínea del 50% del volumen de AGC (Fig. 15) sugiere un incremento del volumen de AGC durante verano-otoño en el Golfo Norte. Ambos, el calentamiento solar y la evaporación también son más grandes durante verano-otoño en el Golfo Norte (Lavín y Organista, 1988), también para todo el Golfo al norte de la línea Guaymas-Santa Rosalía, B. C. S. (Paden, 1990).

Sin embargo, en ciertas áreas someras al sur de la Isla Tiburón y frente al sur de Sonora, la proporción de AGC es mayor que la observada en aguas vecinas más alejadas de la costa o más norteñas; la tendencia general del decremento hacia el sur en la proporción del AGC es interrumpida (Figs. 9a y 15). Esto es más evidente frente al sur de Sonora (Bahía de Yavaros, Son.) asociado probablemente a la formación local de AGC en esta región, y no a advección desde el norte de AGC; quizás lo mismo pudiera ocurrir en regiones similares como al sur de la Isla Tiburón, aunque aquí la advección de AGC desde el norte puede ser también importante en la generación de tal rasgo. Estos rasgos perduran a través del año (Figs. 15a-d). Frente al sur de Sonora la mayor proporción de AGC (40%) ocurre en otoño-invierno y la mínima (20%) en verano. En la

Bahía de Yavaros, Son., la evaporación puede ser tan grande como en el Golfo Norte (Figueroa y Palacios, 1991; su figura 15). Por lo tanto, la formación de AGC en las regiones más someras del Golfo Central y Sur puede estar asociada a procesos de evaporación favorecidos por los vientos del Noroeste durante otoño-invierno (más fuertes, secos y fríos que los que soplan del sureste durante primavera-verano). La superficie total de varias regiones costeras someras del Centro y sur de Sonora, y norte de Sinaloa, no es despreciable con respecto a la del Golfo Norte; si el proceso es generalizado, su aporte al volumen de AGC, específicamente al que se ha observado en el Golfo Sur, puede ser significativo. Pero el volumen de tal AGC "Sureña", junto con el de AGC transportada desde el norte, es pequeño en comparación al de otras masas de agua con las que se puede mezclar en la vecindad de la boca del Golfo (ASE, ASsSt y ACC), por lo que el AGC no ejerce mucha influencia fuera del Golfo (Wyrtki, 1967).

El comportamiento estacional de la masa de Agua Superficial Ecuatorial (ASE) está estrechamente relacionado con el sistema de circulación del Pacífico Tropical-Oriental. Wyrtki (1965,1966) diferenció tres patrones de circulación típicos en esta región, correspondiendo con tres períodos del año. El primero se desarrolla en agosto-diciembre cuando la Zona Intertropical de Convergencia (ZIC) se encuentra desplazada más hacia el norte (aproximadamente a los 10° N) permitiendo el máximo desarrollo de la Contracorriente Ecuatorial (CCE). En este período la CCE transporta en mayor cantidad sus aguas alrededor del Domo de Costa Rica. Durante este período la Corriente Costera de Costa Rica (CCCR) se intensifica, extendiéndose hacia el norte hasta la región de la boca del Golfo de California llevando consigo agua de la región Ecuatorial. El volumen mayor de ASE en el Golfo de California se presenta en otoño (Fig. 13a y tabla V) correspondiendo con las características de la circulación en el Pacífico Tropical-Oriental descritas anteriormente.

El segundo período o segundo patrón de circulación comprende de febrero-abril, cuando la ZIC está desplazada hacia el sur (~3° N) y la CCE y la CCCR están debilitadas o prácticamente ausentes. Esta situación implica una menor advección de ASE hacia el norte, y a esto se puede deber que la proporción de esta masa de agua en el Golfo de California sea mínima en invierno (Fig. 13a y tabla V).

De mayo a julio se presenta el tercer patrón de circulación típico del Pacífico Tropical-Oriental. En este período la ZIC se desplaza nuevamente hacia el norte permitiendo el desarrollo de la CCE y de la CCCR. En el Golfo de California la proporción del volumen de ASE en primavera y verano es intermedia a la de invierno y otoño (Fig. 13a y tabla V). Por lo tanto la variación del volumen de ASE en el Golfo de California es consistente con el patrón de circulación del Pacífico Tropical-Oriental. Wyrtki (1967) y Reid y Mantyla (1978; citados por Badan-Dangon et al., 1986) indicaron la importancia de la Corriente Costera de Costa Rica en la recirculación del Agua Ecuatorial en el sistema de corrientes ecuatoriales y en su acarreo hasta la región de la boca del Golfo de California. Finalmente se observa que en cualquier estación climática la mayor proporción de ASE (Fig. 19) se encuentra del lado oriental del Golfo, lo cual indica que los flujos superficiales hacia el interior del Golfo ocurren principalmente a lo largo de su frontera este, lo que también ha sido señalado por Roden y Groves (1959).

La variación estacional del volumen del Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) muestra un comportamiento estacional semejante al ASE (Fig. 13a). Esto era de esperarse ya que ambas masas de agua son acarreadas al norte por la CCCR; el ASE en los niveles superiores y el ASsSt en los inferiores (Wyrtki, 1966). Sin embargo, la distribución espacial del ASsSt no muestra un comportamiento estacional único para todo

el Golfo de California. En el Golfo Norte la proporción de volumen de ASsSt en cada estación climática (Fig. 16) tiene una relación inversa con la proporción de AGC, ya que al norte del umbral de Salsipuedes-Tiburón estas dos masas de agua son las únicas que pueden ocurrir, tal que cuando el volumen de una aumenta el de la otra disminuye. Al igual que el AGC, la conformación de las isolíneas de volumen de ASsSt se asemeja a la batimetría del Golfo Norte. Sin embargo, a diferencia del AGC la proporción de ASsSt aumenta abruptamente hacia la región de las islas contribuyendo notablemente al volumen total de esta región y al volumen total del Canal de Ballenas y sur de la Isla Tiburón. Otras masas de agua no se presentan en el Golfo Norte porque el umbral de Salsipuedes-Tiburón restringe el desplazamiento de las masas de agua más profundas que el ASsSt (AIP y APP). Además, el volumen de otras masas de agua superficiales es muy pequeño tal que pierden su identidad por mezcla sobre el umbral o más al sur del mismo. En la región de las islas la notable contribución del ASsSt -como lo denota la isolínea del 50% (Fig. 17)- se debe a las restricciones topográficas mencionadas anteriormente y a la mezcla sobre el umbral Salsipuedes-Tiburón. Estos procesos mezclan el ASsSt con AGC y con AIP a profundidades de 400-500 m (Paden, 1990; Simpson et al., en prensa). En la región Central el ciclo estacional del ASsSt está en relación con el AGC, particularmente en la Bahía de Yavaros, Son., su comportamiento es similar al Golfo Norte. Esto es, en verano cuando la proporción de AGC es mínima la de ASsSt es mayor y cuando es máxima la de AGC la de ASsSt disminuye. En la región Sur el ciclo estacional del ASsSt esta relacionado con el ciclo estacional de las masas de agua superficiales situadas por encima del ASsSt. Es decir, en la región Sur durante invierno y primavera cuando la proporción de ASE es menor y la del AGC es mayor en la frontera occidental, la proporción del ASsSt es mayor en la mitad oriental del Golfo. Esta situación se modifica en verano cuando disminuye la proporción de AGC en la frontera occidental y el volumen de ASE se incrementa en el lado oriental, de tal forma

que en esta época la mayor proporción de ASsSt se presenta en el extremo de Baja California.

Alvarez S. et al., (1978a) y Robles y Marinone (1987) indicaron la presencia de ACC en el Golfo de California. Sin embargo en este trabajo no se tuvo evidencia de ella. La razón de ésto se considera que es debido a la pequeña proporción en que se encuentra presente en el Golfo, de tal forma que su señal fué filtrada por el promedio aritmético realizado para obtener los perfiles promedio de temperatura y salinidad. Es por ello que para poder estimar la contribución de esta masa de agua al volumen del Golfo de California, debe emplearse una escala de tiempo menor a la considerada en este estudio; tal vez por campaña oceanográfica. Aunque la metodología empleada es apropiada para estos propósitos, no lo es así la escala temporal utilizada para esta masa de agua. Esto es porque una cosa es la señal estacional - el volumen grande- de la Corriente de California en la costa oeste de Baja California y otra cosa es en la boca del Golfo. Aunque eventualmente por procesos de la dinámica mísma de la boca o circulación local de corta escala el ACC puede ser acarreada hacia en interior del Golfo, ésta es rápidamente diluida por los volúmenes más grandes de las otras masas de agua que están allí (de mayor temperatura y salinidad que el ACC, como el ASE y AGC).

Tanto en la masa de Agua Intermedia (AIP) como en la Profunda del Pacífico (APP) no se observan variaciones estacionales notables en su distribución espacial (Figs. 19 y 20 repectivamente), debido a que éstas se encuentran localizadas por debajo de la profundidad de la señal estacional (menor a 400 m, Castro V., 1992; Bray, 1988a). En el caso del APP, su distribución espacial está fuertemente restringida a las partes más profundas de las cuencas del Golfo (profundidad >1200 m) y refleja los rasgos topográficos profundos de estas regiones (Fig. 18). Estas restricciones son también

observadas en la distribución de la AIP (Fig. 17) puesto que no penetra más allá de la isóbata de 500 m, razón por la cual en el Canal de Ballenas no presenta el mínimo profundo de salinidad característico de esta masa de agua (Roden, 1964; Alvarez-Borrego y Schwartloze, 1979; Alvarez-Borrego, 1983). Las anomalías observadas en ambas masas de agua (AIP y APP) más que indicar aspectos propiamente físicos se considera que obedecen a cuestiones numéricas. Esto es porque la profundidad a partir de la cual se realizaron las extrapolaciones corresponde con la profundidad en que se localizan estas masas de agua.

La información volumétrica obtenida con los datos de marzo y octubre de 1983 es anómala: el volumen de ASE es mayor que el de cualquier mes de otros años; lo que al parecer está asociado con el evento del El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) ocurrido en 1982-83. Baumgartner y Christensen (1985) concluyeron que la ocurrencia de fluctuaciones no estacionales en el nivel del mar y en el clíma oceanográfico interanual del Golfo de California se asocia con episodios ENOS, señalando que la principal fuente de tal variabilidad es la intensificación del giro Nor-ecuatorial que se presenta durante tales eventos. La CCCR representa el límite oriental de dicho giro y su intensificación asociada a un evento ENOS, como sugieren Baumgartner y Christensen (1985), pudo ser la causa de la invasión anómala de ASE hasta el Golfo de California durante marzo de 1983.

Alvarez-Borrego y Schwartloze (1979) indicaron la posibilidad de que en verano de 1957 (año en que ocurrió un evento ENOS) el ASE invadiera hasta la región de las islas. Recientemente, Robles y Marinone (1987), Bray (1988a) y Bray y Robles (1991) sugirieron que una invasión hasta la Cuenca de Guaymas de agua superficial del Pacífico Ecuatorial en marzo de 1983, fué la causa de la baja salinidad y alta

temperatura encontrada en esta región. Esta posibilidad queda de manifiesto en la distribución de ASE, la cual efectivamente invadió hasta la Cuenca de Guaymas en marzo de 1983, a diferencia de otros períodos (Figs. 23a y 19) en donde sólo se observa en la región Sur. Esto es consistente con la distribución de temperatura y salinidad para marzo de 1983 mostrada en Bray y Robles (1991; su Fig. 34).

Meet et al., (1985; citado por Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991) a partir de series de tiempo de temperatura y clorofila *a*, obtenidas en la región de la boca del Golfo, encontraron anomalías en tales propiedades, indicando que el evento ENOS 1982-1983 ocurrió en el Golfo Sur de septiembre-octubre de 1982 hasta junio de 1984. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que el volumen de ASE en marzo de 1984 (Fig. 23a) es semejante al promedio estacional de primavera e inferior al promedio anual. Por lo tanto, en términos volumétricos los efectos de El Niño de 1982-83 no se manifestaron hasta marzo de 1984 en el Golfo de California; probablemente sólo se manifestó hasta finales de 1983, durante la fase "madura" del evento (Herrera C., 1992), ya que el volumen de ASE en oct-83 es el mayor de toda la serie (1939-1986) debido a que en este mes se sumaron los dos efectos, el estacional y el interanual (ENOS).

VI CONCLUSIONES

La caracterización de las masas de agua del Golfo de California presenta ventajas sobre las encontradas en la literatura, en el sentido de que aquí se establecen sus intervalos de temperatura y salinidad.

Agua del Golfo de California (AGC)	[$S \geq 35.0$ ppm , $T > 12.0$ °C]
Agua Superficial Ecuatorial (ASE)	[$S < 35.0$ ppm, $T \geq 18.0$ °C]
Agua de la Corriente de California (ACC)	[$S < 34.5$ ppm, $12.0 \leq T$ °C < 18.0]
Agua Subsuperficial Subtropical(ASsSt)	[$34.5 < S$ ppm < 35.0, $9.0 \leq T$ °C < 18.0]
Agua Intermedia del Pacífico (AIP)	[$34.5 \leq S$ ppm < 34.8, $4.0 \leq T$ °C < 9.0]
Agua Profunda del Pacífico (APP)	[$S > 34.5$ ppm, $T < 4.0$ °C]

Poco más del 70% del volumen total del Golfo de California es ocupado por las masas de agua Intermedia (33%) y Profunda del Pacífico (41%), el 19% por ASsSt, el 6% por AGC y con menor proporción el ASE (1%). La ausencia de ACC en los resultados sugiere que su contribución al volumen del Golfo de California es muy pequeña.

La masa de Agua del Golfo de California (AGC) es dominante (100%) en el Alto Golfo y en las áreas costeras más someras del Golfo Norte. Su volumen y extensión vertical aumenta de sur a norte tanto en el promedio anual como en cualquier época del año.

El mayor volumen de AGC se presenta en verano-otoño (7%) y el mínimo en invierno-primavera (6%). Esta variación estacional sugiere que el AGC puede ser

formada en otras épocas del año y no solamente durante invierno en el Alto Golfo. En tal caso, quizá por calentamiento solar y evaporación sin convección vertical en el Alto Golfo.

El incremento de AGC al sur de la Isla Tiburón y extremo sur de Sonora sugiere formación de AGC en esta región durante otoño-invierno, cuya contribución al volumen de AGC en las regiones Sur y Central del Golfo puede no ser despreciable. Sin embargo, el volumen cumulativo del AGC formada en estas regiones y la transportada desde el norte, es pequeño en comparación al de otras masas de agua con las que se puede mezclar en la vencindad de la boca del Golfo (ASE, ASsSt y ACC), por lo que el AGC no ejerce mucha influencia fuera del Golfo de California.

El comportamiento estacional del ASsSt en la región Norte está en relación inversa con el ciclo estacional del AGC y en la región Sur con el de AGC y ASE. Esta masa de agua es dominante en la región de las Islas, en donde contribuye con más del 70% al volumen del Canal de Ballenas. En la boca se encuentra más cercana a la superficie (~100 m) y por debajo de los 200 m el interior del Golfo.

La distribución espacial de las masas de agua más profundas está fuertemente restringida por la batimetría del Golfo y los umbrales de la región de las islas. El Agua Intermedia del Pacífico es dominante en la región Central (50%) y su desplazamiento hacia el interior del Golfo corresponde con la isóbata de 500 m. El Agua Profunda del Pacífico domina sobre las cuencas profundas de la región Sur (55%) y penetra hasta la isóbata de 1200 m. Ambas masas de agua no presentan un ciclo estacional en su distribución espacial.

El comportamiento estacional del ASE en el Golfo de California depende del patrón de circulación del Pacífico Tropical-Oriental y su volumen se incrementa contínuamente de invierno (1%) a otoño (2%).

La ocurrencia del evento ENOS de 1982-83 ocasionó una mayor advección de agua Ecuatorial hacia el interior del Golfo de California en marzo de 1983, penetrando hasta la Cuenca de Guaymas. En marzo de 1983 el volumen de ASE fué de 2,490 Km^3 y en octubre del mismo año fué de 3580 Km^3, superior a todos los períodos procesados: Marzo de 1984 (600 Km^3), promedio anual (800 Km^3), invierno (240 km^3) y otoño (1810 Km^3).

Desde el punto de vista volumétrico, la transición entre períodos de anti-Niño y Niño en el Golfo de California, puede ser marcada por un incremento en el volumen de Agua Ecuatorial (ASE) y su presencia en la región Central del Golfo.

LITERATURA CITADA:

Alvarez-Borrego, S., 1983. Gulf of California, in Estuaries and Enclosed Seas. B. H. Ketchum (eds.), Elsevier, Amsterdam, 500 pp.

Alvarez-Borrego, S. y Lara-Lara, J. R., 1991. The Physical environment and primary productivity of the Gulf of California. Invited review paper, Part V, Chapter 26, in the Gulf and Peninsular Province of the Californias. Amer. Assoc. of Petrol. Geol., edited by J. P. Douphin and B. R. Simoneit, Tulsa, Oklahoma. Memoir 47, 555-567.

Alvarez, S. L. G., M. R. Stevenson y B. Wyatt, 1978a. Circulación y masas de agua en la región de la boca del Golfo de California en la primavera de 1970. Ciencias Marinas, 5(1):57-69.

Alvarez, S. L. G., M. R. Stevenson y B. Wyatt., 1978b. Corrientes en la región de la boca del Golfo de California en la primavera de 1970. Ciencias Marinas, 5(1):105-117.

Alvarez-Borrego, S. y R. Schwartzlose, 1979. Masas de agua del Golfo de California. Ciencias Marinas, 6(1-2):43-63.

Andrey, S. M., V. M. Kamenkovich y V. G. Kort, 1976. Variability of the Oceans. John Wiley and Sons, Inc., New York. 241 pp.

Argote, M. L., A. Amador y C. Morales, 1985. Variación estacional de la estratificación en la región norte del Golfo de California. En: J. Urrutia-Fucugauchi y J. F. Valdés-Galindo (eds.), Memoria de la Reunión Anual 1985. Unión Geofísica Mexicana, A. C., México, D. F. 437 pp.

Badan-Dangon, A., J. M. Robles y J. García, 1989. Poleward flows off Mexico's Pacific Coast. Neshyba, S. J., Ch. N. K. Mooers, R. L. Smith y R. T. Barber (eds.). Poleward Flows Along Easten Ocean Boundaries. In Coastal and Estuarine Studies. Vol. 34, 374 pp.

Badan-Dangon, A., C. J. Koblinsky y T. Baumgartner, 1985. Spring and summer in the Gulf of California: Observations of surface thermal patterns. Oceanol. Acta, 8:13-22.

Bray, N. A., 1988a. Termohaline circulation in the Gulf of California. J. Geophys. Res. 93(C5):4993-5020.

Bray, N. A., 1988b. Water mass formation in the Gulf of California. J. Geophys. Res. 93(C8):9223-9240.

Bray, N. A. y J. M. Robles, 1991. Physical oceanography of the Gulf of California. Invited review paper, Part V, Chapter 25, in the Gulf and Peninsular Province of the Californias. Amer. Assoc. of Petrol. Geol., edited by J. P. Douphin and B. R. Simoneit, Tulsa, Oklahoma. Memoir 47, 511-553.

Baumgartner, T. R. y Christensen, N., 1985. Coupling of the Gulf of California to large-scale interannual climatic variability. J. Mar. Res. 43:825-848.

Carmack, E. C., 1974. A quantitative characterization of water masses in the Weddell Sea during summer. Deep-Sea Research, 21:431-443.

Cochrane, J. D., 1956. The frequency distribution of surface-water characteristics in the Pacific Ocean. Deep-Sea Research, 4:45-53.

Castro, V. R., 1992. Balance estacional de calor en el Golfo de California. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California

Cochrane, J. D., 1958. The frequency distributions of water characteristics in the Pacific Ocean. Deep-Sea Reasearch, 5:111-127.

Emery, W. J. y J. Meincke, 1986. Global water masses: sumary and review. Oceanol. Acta 9(4):383-391.

Figueroa, R. J. M. y R. Palacios, 1991. Flujos de calor y momentum a través de la superficie en el Golfo de California. Ciencias Marinas, 17(2):109-149.

Gaxiola, C. G., Alvarez, B. S. y R. A. Schwartzlose, 1978. Sistema del bióxido de carbono en el Golfo de California. Ciencias Marinas, 5(2):25-40.

Gómez, V. J., 1980. Variación estacional en el sistema de la Corriente de California frente a Ensenada, B. C. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California.

Herrera, C. H., 1992. Propagación de señales de baja frecuencia en la temperatura superficial del mar analizadas a partir de datos de satelite en el Pacífico Nor-Oriental. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California.

Kin'dyushev, V. I., 1968. Seasonal variations of water masses in the California Region of the Pacific Ocean. Oceanology 10: 456-464.

Lavín, M. F., G. Gaxiola, J. M. Robles y K. Richter, 1991. Winter water-masses and nutrients in the Northern Gulf of California. Sometida a J. Geosphys. Res.

Lavín, M. F., V. Godinez y S. Sánchez, 1989. El Alto Golfo de California en el invierno 1987-1988. GEOS 9(4):347-355.

Lavín, M. F. y S. Organista, 1988. Surface heat flux in the Northern Gulf of California. J. Geophys. Res. 93(C11):14,033-14,038.

Mamayev, O. I., 1975. Temperature-Salinity analysis of world ocean waters. Elsevier Oceanography Series. Vol. 11, 374 pp.

Marinone, S. G., 1988. Una nota sobre la variabilidad no estacional de la región central del Golfo de California. Ciencias Marinas. 14(4):117-134.

Marinone, S. G. y P. Ripa. 1988. Geostrophic flow in the Guaymas Basin, central Gulf of California. Continental Shelf Research, 8(2):159-166.

Matthias Tomozak, 1991. Water masses: we can see them, but can we define them ?. Ocean Modelling. 8-10.

Merrifield, M. A. y C. D. Winant, 1989. Shelf Circulation in the Gulf of California: A Description of the Variability. J. G. R. 94(C12): 18133-18160

Montgomery, R. B., 1955. Characteristics of surface water Ship J. Deep-Sea research, 3, supplement. Papers in Marine and Oceanography, 331-334.

Montgomery, R. B., 1958. Water characteristic of Atlantic Ocean. Deep-Sea Research, 5:134-148.

Pollak, M. J., 1958. Frequency distribution of potential temperatures and salinities in the Indian Ocean. Deep-Sea Research, 5:128-133.

Paden, C. A., 1990. Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California. Tesis de doctorado. SCRIPPS Institution of Oceanography, UCSD: 86 pp.

Reid, J. L., 1965. Intermediate waters of the Pacific Ocean. Johns Hopkins Oceanographic Studies 2, 85 p.

Ripa, P. y Marinone, S. G., 1989. Seasonal variability of temperature, salinity, velocity, vorticity and sea leavel in the Central Gulf of California, as inferred from historical data. Q. J. R. Meteorol. Soc. 115:887-913.

Robles, J. Ma. y S. G. Marinone., 1987. Seasonal and interannual termohaline variability in the Guaymas Basin of the Gulf of California. Continental Shelf Research, 7:715-733.

Roden, G. I., 1964. Oceanographyc aspects of Gulf of California. Marine Geology in the Gulf of California. In: Tj. H. Van Andel y G. G. Shor Jr., (editors), Mem. Am petrol. Geol., 3:30-58.

Roden, G. I., 1972. Thermohaline structure and baroclinic flow across the Gulf of California entrance and in the Revilla Gigedo Islands region. I. Phys. Oceanogr., 2:177-183.

Roden, G. I. y G. W. Groves, 1959. Recent oceanographyc investigations in the Gulf of California. J. Mar. Res., 18(1):10-35.

Roden, G. I., 1958. Oceanographic and Meteorological aspects of the Gulf of California. Pacific Science, XII:21-45

Simpson, J. H., A. J. Souza y M. F. Lavín, (en prensa). Tidal mixing in the Gulf of California. in Physical Mechanism of Transport and Dispersion in the Environment. Beven, K., Chatwen P. and Millbank J (eds.).

Sverdrup, H. U., 1941. The Gulf of California: preliminary discussion on the crusie of the E. W. Scripps in February and March 1939. 6 th Pac. Sci. Congr. Proc., 3:161-166.

Vélez, M. H. S., 1981. Análisis cuantitativo de la variación estacional y espacial de las masas de agua de 0 a 500 m en la región de la Corriente de California. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California.

Warsh, C. E. y K. L. Warsh, 1971. Water exchange at the mounth of the Gulf of California. J. Geophys. Res., 76:8098-8106.

Warsh, C. E. y K. L. Warsh y R. C. Stanley., 1973. Nutrients and water masses at the mouth of the Gulf of California. Deep-Sea Res. 20:561-570.

Worthington, L. V., 1981. The water masses of the world ocean: some results of a fine-scale census. Capítulo 2 en: Evolution of physical oceanography. Warren, B. A. y Wunsh, C. (eds.). segunda edición. The Massachusetts Institute of Technology. 663 pp.

Wyrtki, K., 1967. Circulation and water masses in the Eastern Equatorial Pacific Ocean. J. Oceanol. Limnol., 1(2):117-147.

Wyrtki, K., 1966. Oceanography of the Eastern Equatorial Pacific Ocean. Oceanogr. Mar. Biol. Am. Rev. 4:33-68.