

## VARIABILIDAD HIDROGRAFICA DE BAHIA VIZCAINO, BAJA CALIFORNIA, MEXICO

## HYDROGRAPHIC VARIABILITY IN BAHIA VIZCAINO, BAJA CALIFORNIA, MEXICO

Manuel Mancilla-Peraza\*  
Emilio Palacios-Hernández  
Gabriel López-Castillo

Estación de Investigación Oceanográfica  
Secretaría de Marina  
Dirección General de Oceanografía Naval  
Vicente Guerrero 133, Fracc. Bahía  
Ensenada, Baja California, 22880 México

*Recibido en agosto de 1992; aceptado en mayo de 1993*

### RESUMEN

Se analizaron las variaciones hidrográficas más relevantes de Bahía Vizcaíno, Baja California, a partir de datos de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto medidos en el crucero oceanográfico ECONER 0391 (marzo 18 a 22, 1991) y datos similares proporcionados por el Banco de Datos e Información Oceanográfica de la Secretaría de Marina (1960 a 1968).

Durante el invierno la distribución vertical de propiedades de las aguas fue casi homogénea y poco estable mientras que en verano se formó una estratificación en tres capas principales, debido al efecto conjunto del calentamiento estacional y el evento anual promedio de surgencia. El agua de la capa inferior se originó en la Masa de Agua Ecuatorial Transformada, caracterizada por bajo contenido de oxígeno disuelto ( $< 3$  ml/l); la capa superior presentó mayor temperatura y oxígeno disuelto ( $> 5.5$  ml/l); la intermedia o termoclina estuvo generalmente asociada a un mínimo de salinidad debido a la influencia de la Masa de Agua Subártica del Pacífico. Al final del otoño se debilitó la estructura de tres capas principales y durante el invierno la columna de agua ya estaba bien mezclada. La propagación de calor desde la capa superficial y el evento anual promedio de surgencia controlaron la variación anual de temperatura en los niveles inferiores ( $> 30$  m). Por consiguiente, la temperatura superficial estuvo en fase con el ciclo estacional atmosférico, y en niveles inferiores se presentó enfriamiento en verano y calentamiento en invierno.

Los principales procesos que contribuyeron a la variabilidad hidrográfica estacional de la bahía fueron: el evento anual de surgencia, el calentamiento y enfriamiento estacionales (ciclo de radiación solar), la advección de agua desde la zona de surgencias enfrente de Punta Canoas y desde el océano adyacente al final del periodo de surgencias (septiembre), la convergencia de las aguas hacia la zona sur de la bahía y las intrusiones de Masa de Agua Subártica del Pacífico y Masa de Agua Ecuatorial Transformada.

### ABSTRACT

The outstanding hydrographic variations in Bahía Vizcaíno, Baja California, were analyzed from temperature, salinity and dissolved oxygen data collected during the ECONER-0391 oceanographic cruise (March 18-22, 1991) and from similar data obtained from a data bank (*Banco de Datos e Información Oceanográfica*) of the *Secretaría de Marina* (1960-1968).

---

\* Dirección actual: Estación de Investigación Oceanográfica del Pacífico Centro, Sector Naval Militar, Cerro Las Gallinas s/n, Topolobampo, 81870, Sinaloa, México.

In winter the vertical distribution of water properties was almost homogeneous and less stable, while in summer it was stratified into three main layers owing to seasonal warming and the annual mean upwelling event. The lower layer had its origin in the Equatorial Transformed Water Mass, which is characterized by low dissolved oxygen content ( $<3$  ml/l). The top layer had higher temperature and dissolved oxygen ( $>5.5$  ml/l). In general, the intermediate layer or thermocline was associated to a minimum in salinity of Subarctic Pacific Water Mass origin. At the end of the fall the vertical three-layered structure weakened and, during the winter, heat and other water properties were nearly homogeneous in the water column. The propagation of heat from the surface layer and the annual upwelling event controlled the annual variability in temperature in the lower levels ( $>30$  m). Consequently, the surface temperature was on phase with the normal annual atmospheric cooling and warming cycle, and lower levels cooled in summer and warmed in winter.

The main processes affecting the hydrographic variability in the bay were: the annual upwelling event, the seasonal warming and cooling, the water advection from the upwelling period (September), the convergence of waters to the south of the bay and the intrusions of the Subarctic Pacific Water Mass and Equatorial Transformed Water Mass.

## INTRODUCCION

Bahía Vizcaíno (BV) es un recurso natural importante para Baja California, cuya economía regional se basa, principalmente, en el aprovechamiento de los recursos marinos vivos. En general, el conocimiento de la variabilidad hidrográfica es importante por los efectos que puede tener sobre la flora y fauna marinas.

### Area de estudio

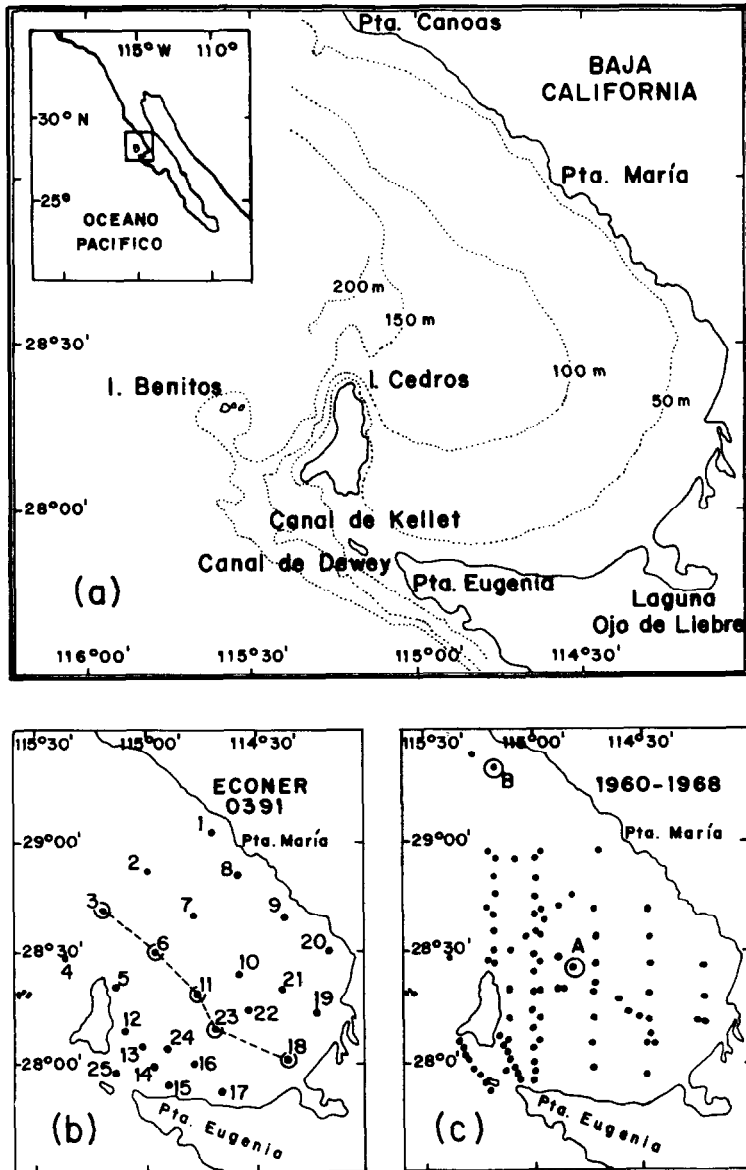
Esta bahía se localiza en el litoral occidental de la Península de Baja California. Está limitada por la costa de Punta María a Punta Eugenia, y por las Islas Cedros y Natividad (Fig. 1a). Tiene forma semicircular y, aproximadamente, 110 km de diámetro, 11,500 km<sup>2</sup> de área y 76 m de profundidad promedio. Mantiene amplia comunicación con el océano adyacente a través del canal entre Isla Cedros y Punta María, de cerca de 90 km de ancho y 150 m de profundidad máxima. En su extremo sur tal comunicación es más restringida. El Canal de Kellet (Keller), entre las islas Cedros y Natividad, tiene aproximadamente 15 km de ancho y 45 m de profundidad máxima. El Canal de Dewey entre Isla Natividad y Punta Eugenia tiene del orden de 7.5 km de ancho y 30 m de profundidad máxima. En el litoral interior de la bahía se encuentran las lagunas litorales Ojo de Liebre, Guerrero Negro y Manuela. La bahía está comprendida en una región de clima desértico, sin descargas de agua dulce y con régimen de vientos dominantes del noroeste (Secretaría de Marina, 1972).

## INTRODUCTION

Bahía Vizcaíno is an important natural resource of Baja California, whose regional economy is based mainly on the exploitation of live marine resources. In general, knowledge of the hydrographic variability is important because of the effects it may have on marine flora and fauna.

### Study area

Bahía Vizcaíno is located on the western coast of the peninsula of Baja California. It is limited by the coast between Punta María and Punta Eugenia, and by Isla Cedros and Isla Natividad (Fig. 1a). It has a semicircular shape, with a diameter of about 110 km, an area of approximately 11,500 km<sup>2</sup> and an average depth of about 76 m. There is ample communication with the adjacent ocean through the channel between Isla Cedros and Punta María, which is approximately 90 km wide and has a maximum depth of about 150 m. At the southern end this communication is more restricted. Kellet (Keller) Channel, between Isla Cedros and Isla Natividad, is approximately 15 km wide and has a maximum depth of about 45 m. Dewey Channel, between Isla Natividad and Punta Eugenia, has a width of about 7.5 km and maximum depth of about 30 m. The coastal lagoons Ojo de Liebre, Guerrero Negro and Manuela are found in the inner part of the bay. Bahía Vizcaíno is located in a region of arid climate, with no freshwater input and predominant northwesterly winds (Secretaría de Marina, 1972).



**Figura 1.** a) Localización de Bahía Sebastián Vizcaíno, Baja California. b) Posiciones de estaciones oceanográficas y transecto longitudinal de la bahía durante el crucero ECONER 0391 (marzo 18 a 22, 1991). c) Estaciones de varios cruceros históricos entre 1960 y 1968. Estaciones seleccionadas: A, en la zona central de la bahía, y B, enfrente de Punta Canoas.

**Figure 1.** a) Location of Bahía Sebastián Vizcaíno, Baja California (Mexico). b) Positions of the oceanographic stations and longitudinal transect of the bay during the ECONER-0391 cruise (March 18-22, 1991). c) Stations of several historic cruises conducted between 1960 and 1968. Stations chosen: A, in the central part of the bay, and B, off Punta Canoas.

## Antecedentes

Por estar comprendida el área de estudio dentro del Sistema de la Corriente de California, se presupone que la variación estacional de las características de las aguas está influenciada por diversos factores externos como: la variación del flujo hacia el sur de las aguas frías y de baja salinidad de la Corriente de California (CC), el evento anual de surgencia de aguas frías y ricas en nutrientes hacia la capa superficial, la variabilidad del régimen de vientos del noroeste, la variación del transporte de contracorrientes superficiales y subsuperficiales, el calentamiento y enfriamiento atmosférico según el ciclo estacional y las irregularidades batimétricas y de la línea de costa.

El campo de corrientes costeras está relacionado estacionalmente con la variabilidad del régimen de vientos del noroeste, que intensifica el esfuerzo sobre la superficie del mar paralelo a la línea de costa durante primavera y verano, lo que implica condiciones favorables de surgencia en estas estaciones del año (Sverdrup *et al.*, 1942; Reid *et al.*, 1958; Wyllie, 1960; Bakun y Nelson, 1977). El flujo máximo superficial de la CC hacia el sector sur concuerda con el máximo de surgencia en la primavera, mientras que en el otoño la componente general del flujo es hacia el sector norte (Bakun y Nelson, 1977).

Las variaciones estacionales de los campos de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto están relacionadas con ajustes verticales en el campo de densidad y con cambios en los transportes de la CC, la Subcorriente de California (SCC) y la contracorriente superficial costera (otoño) (Lynn y Simpson, 1987).

Las principales masas de agua de la región de BV son: la Masa de Agua Subártica del Pacífico (MASP), caracterizada por baja salinidad, alto contenido de oxígeno disuelto y relativamente alto contenido de fosfatos, la cual es transportada por la CC entre 0 y 200 m de profundidad (Reid *et al.*, 1958); la Masa de Agua Ecuatorial Transformada (MAET), caracterizada por bajo contenido de oxígeno disuelto, alta salinidad y alto contenido de fosfatos, la cual es transportada por la SCC entre 200 y 300 m de profundidad (Sverdrup *et al.*, 1942; Reid *et al.*, 1958); y, en los niveles superiores, la Masa de Agua Superficial Ecuatorial (20 a 25°C y 34.0 a 34.5‰) y la Masa de Agua Superficial Tropical (15 a 20°C y 33.5 a 34.2‰) (Kin'dyushev, 1970).

## Antecedents

As the study area is comprised within the California Current System, it is assumed that the seasonal variation of the characteristics of the waters is influenced by several external factors, such as: the variation of the southward flow of cold California Current (CC) water of low salinity; the annual upwelling event of cold waters, rich in nutrients, to the surface layer; the variability of the regime of northwesterly winds; the variation of the transport of surface and subsurface currents; the atmospheric warming and cooling according to the seasonal cycle; the bathymetric irregularities and those of the coastline.

The field of coastal currents is seasonally related to the variability of the regime of northwesterly winds, which intensifies the stress on the surface of the sea parallel to the coastline during spring and summer. This implies favourable upwelling conditions during these seasons of the year (Sverdrup *et al.*, 1942; Reid *et al.*, 1958; Wyllie, 1960; Bakun and Nelson, 1977). The maximum surface flow of the CC towards the southern section concurs with maximum upwelling in spring, whereas in autumn the general component of the flow is towards the northern section (Bakun and Nelson, 1977).

The seasonal variations of the temperature, salinity and dissolved oxygen fields are related to vertical fits in the density field and to changes in the transport of the CC, the California Subcurrent (CSC) and the coastal surface countercurrent (autumn) (Lynn and Simpson, 1987).

The main water masses in the region of Bahía Vizcaíno are: the Subarctic Pacific Water Mass (SPWM), characterized by low salinity, high dissolved oxygen content and relatively high phosphate content, which is transported by the CC between 0 and 200 m depth (Reid *et al.*, 1958); the Equatorial Transformed Water Mass (ETWM), characterized by low dissolved oxygen content, high salinity and high phosphate content, which is transported by the CSC between 200 and 300 m depth (Sverdrup *et al.*, 1942; Reid *et al.*, 1958); the Equatorial Surface Water Mass (20-25°C, 34.0-34.5‰) and the Tropical the Tropical Surface Water Mass (15-20°C, 33.5-34.2‰), both in the upper levels (Kin'dyushev, 1970).

In addition, Kin'dyushev (1970) identified the Southern California Water Mass,

Kin'dyushev (1970) identifica, además, la Masa de Agua Sudcaliforniana que se forma principalmente por la mezcla intensa entre MASP y MAET, en la región del Sistema de la Corriente de California. Esta masa se caracteriza por temperatura de 12°C, salinidad de 33.5‰, y entre 3 y 4 ml/l de oxígeno disuelto.

El análisis descriptivo de las masas de agua de la bahía sugiere la influencia de las masas de agua transportadas por la CC y la SCC, de aguas provenientes de zonas de surgencia (Punta Canoas y Punta Eugenia) y, con menor importancia, de las lagunas litorales adyacentes (Wyllie, 1960).

Los estudios hidrográficos de Dawson (1952) y Wyllie (1960), y las mediciones directas de corrientes con cuerpos de deriva (Scripps, 1962), demostraron la ocurrencia de un gran giro anticiclónico en la bahía, que afecta la estructura hidrográfica, especialmente de la zona central.

En este artículo se describe la variabilidad hidrográfica estacional de BV y se proponen algunos de los procesos físicos que la pueden generar.

## MATERIAL Y METODOS

Se analizaron datos hidrográficos, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto, de la bahía y mar adyacente, observados durante el crucero ECONER 0391 (marzo 18 a 22, 1991) y datos similares observados entre 1960 y 1968, proporcionados por el Banco de Datos e Información Oceanográfica de la Secretaría de Marina, cuyas posiciones se muestran en las Figs. 1b y c. Del Banco de Datos se seleccionaron las estaciones oceanográficas correspondientes a dos puntos geográficos con mayor número de observaciones: el punto A (latitud 28°18' N, longitud 114°53' O y profundidad 110 m), situado en la zona central de la bahía, y el punto B (latitud 29°22' N, longitud 115°18' O y profundidad 60 m), situado fuera de la bahía (80 km al noroeste de Punta María), enfrente de Punta Canoas (Fig. 1c).

Durante el crucero ECONER 0391 se muestreó la columna de agua (a profundidades estándar) con botellas Niskin y termómetros de inversión, en 25 estaciones hidrográficas distribuidas en la bahía (Fig. 1b). La posición de cinco estaciones oceanográficas de dicho

mainly formed by intense mixing between SPWM and ETWM, in the region of the California Current System. This mass is characterized by temperature of 12°C, salinity of 33.5‰ and between 3 and 4 ml/l of dissolved oxygen.

The descriptive analysis of the water masses of the bay indicates the influence of water masses transported by the CC and CSC, of waters originating in upwelling areas (Punta Canoas and Punta Eugenia) and, to a lesser extent, of the adjacent coastal lagoons (Wyllie, 1960).

The hydrographic studies of Dawson (1952) and Wyllie (1960), and current measurements with drogues (Scripps, 1962) showed the occurrence of a great anticyclonic eddy in the bay which affects the hydrographic structure, especially of the central part.

In this study, the seasonal hydrographic variability in Bahía Vizcaíno is described and some of the physical processes that may cause it are proposed.

## MATERIAL AND METHODS

An analysis was made of hydrographic data (temperature, salinity and dissolved oxygen) for the bay and adjacent sea, obtained during the ECONER-0391 cruise (March 18-22, 1991), and similar data collected between 1960 and 1968, obtained from a data bank (*Banco de Datos e Información Oceanográfica*) of the *Secretaría de Marina*, whose positions are shown in Figs. 1b and c. From the data bank, oceanographic stations corresponding to two geographical points with the largest number of observations were selected: point A (28°18' N, 114°53' W; depth 110 m) located in the central part of the bay, and point B (29°22' N, 115°18' W; depth 60 m) located outside the bay (80 km northeast of Punta María), off Punta Canoas (Fig. 1c).

During the ECONER-0391 cruise, the water column was sampled (at standard depths) with Niskin bottles and inversion thermometers, at 25 hydrographic stations distributed in the bay (Fig. 1b). The position of five oceanographic stations of this cruise, whose data are used in this paper, are also shown in this figure. Temperature was measured with reversing thermometers. Salinity was estimated by determining the ratio of conductivity of the sample to that of normal

crucero, cuyos datos son usados en este artículo, también se muestran en esta figura. La temperatura se midió con termómetros reversibles. La salinidad se estimó a partir de la determinación de la razón de conductividad de la muestra con respecto a la del agua de mar normal, mediante un salinómetro de inducción marca Beckman, modelo RS10 (U.S. Navy, 1970). El oxígeno disuelto se estimó mediante titulación por el método Macro-Winckler (U.S. Navy, 1970).

La variabilidad hidrográfica es descrita a partir de distribuciones de los datos en el plano tiempo-profundidad, junto con diagramas T-S, histogramas de distribución de frecuencias, transectos hidrográficos y topografías de superficies equiescalares.

## RESULTADOS

### Variación temporal en la zona central de la bahía

La variación temporal de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto para los años 1960 y 1963, en la estación A (en la zona central de la bahía), se muestra en la Fig. 2. Las series de temperatura y oxígeno disuelto mostraron una fuerte estratificación en tres capas principales durante el verano, lo que contrastó con la estructura débil de la columna de agua observada en el invierno.

La estratificación se inició en la primavera y se intensificó durante el verano. La capa superficial generalmente presentó alto contenido de oxígeno disuelto ( $\leq 5.0$  ml/l) y alcanzó la más alta temperatura al final del verano ( $> 21^\circ\text{C}$ ). La capa intermedia o de transición en temperatura (termoclina) estuvo asociada generalmente con mínimos de salinidad durante la primavera y el verano. La capa inferior presentó relativamente baja temperatura ( $< 13^\circ\text{C}$ ) y bajo contenido de oxígeno disuelto ( $< 3$  ml/l).

Durante el verano se inició el descenso de la termoclina, lo que indica el debilitamiento del evento anual promedio de surgencia. Durante el otoño, se debilitó la estratificación de las aguas y ocurrió distribución de calor de la capa superior hacia los niveles inferiores. El calor se propagó con amplitud decreciente, en cerca de seis meses, desde la superficie hasta el fondo. Por consiguiente, mientras que la temperatura superficial correspondió al ciclo esta-

seawater, using a Beckman induction salinometer, model RS10 (U.S. Navy, 1970). Dissolved oxygen was estimated by titration with the Macro-Winckler method (U.S. Navy, 1970).

The hydrographic variability is described from the distribution of the data in the time-depth plane, and with T-S diagrams, histograms of frequency distribution, hydrographic transects and topographies of equiscalar surfaces.

## RESULTS

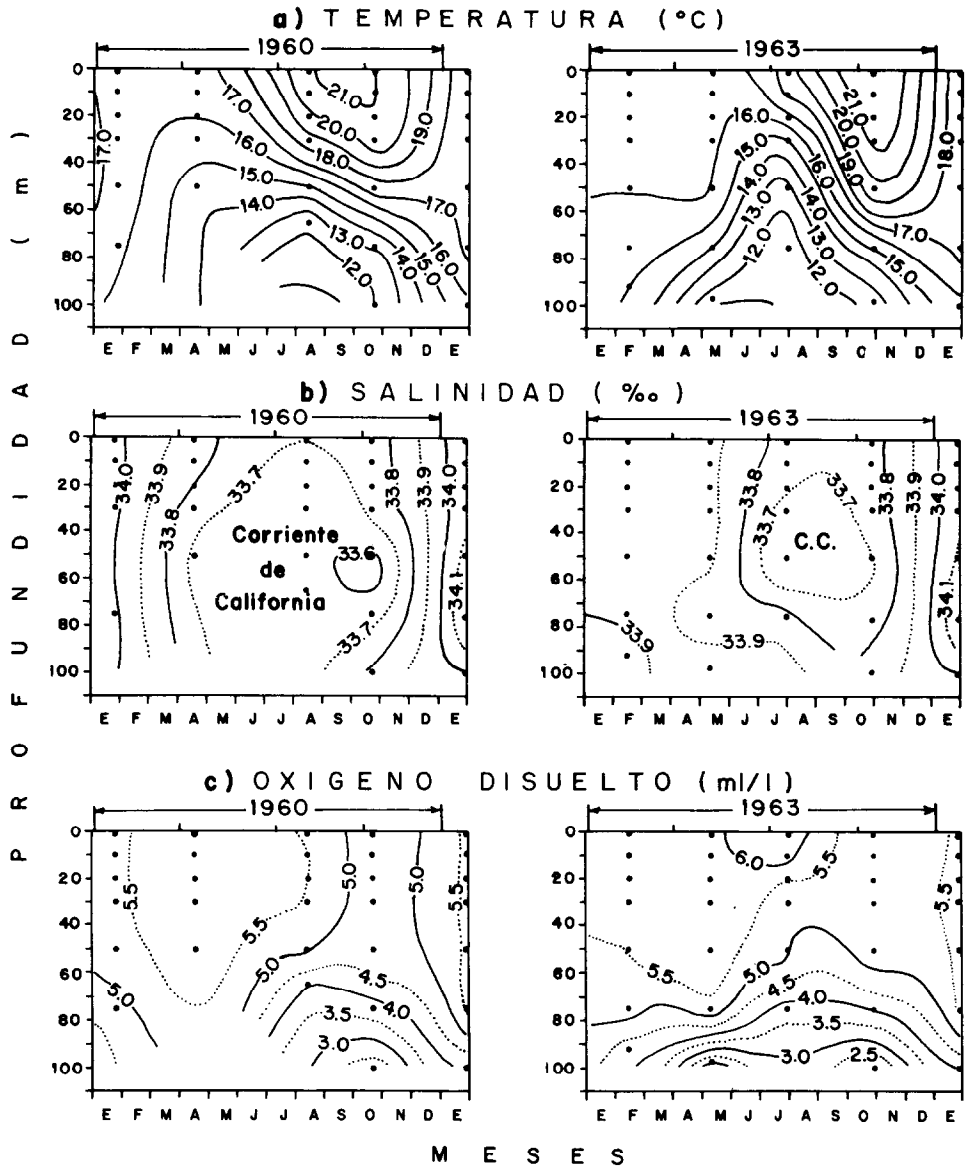
### Temporal variation in the central part of the bay

The temporal variation of temperature, salinity and dissolved oxygen for the years 1960 and 1963, at station A (in the central part of the bay), is shown in Fig. 2. The temperature and dissolved oxygen series showed a strong stratification into three main layers during summer, in contrast to the weak structure of the water column in winter.

Stratification began in spring and intensified during summer. The surface layer generally presented high dissolved oxygen content ( $\leq 5.0$  ml/l) and reached the highest temperature at the end of summer ( $> 21^\circ\text{C}$ ). The intermediate layer, or thermocline, was generally associated with salinity minima in spring and summer. The lower level presented relatively low temperature ( $< 13^\circ\text{C}$ ) and low dissolved oxygen content ( $< 3$  ml/l).

The descent of the thermocline began in summer, indicating the weakening of the annual mean upwelling event. During autumn, the stratification of the waters weakened and heat was distributed from the upper layer to the lower levels. Heat was propagated with decreasing amplitude in about six months, from the surface to the bottom. Therefore, whereas surface temperature corresponded to the seasonal atmospheric cycle, which depends on the cycle of solar radiation with cooling in winter and warming in summer, in the lower levels ( $> 60$  m) cooling occurred in summer and warming in winter.

In winter (January), the hydrographic structure was weak, dissolved oxygen was relatively high ( $\sim 5$  ml/l), salinity was relatively high ( $\sim 34.00/00$ ) and temperature was moderate ( $\sim 16^\circ\text{C}$ ).



**Figura 2.** Distribución temporal de la temperatura (a), salinidad (b) y oxígeno disuelto (c) en la zona central de la bahía (posición A, en la Fig. 1c).

**Figure 2.** Temporal distribution of temperature (a), salinity (b) and dissolved oxygen (c) in the central part of the bay (position A, shown in Fig. 1c).

cional atmosférico, que depende del ciclo de radiación solar, con enfriamiento en invierno y calentamiento en verano, en los niveles inferiores (>60 m) ocurrió enfriamiento en verano y calentamiento en invierno.

#### Temporal variation off Punta Canoas

The temporal variation of these same water properties for 1961 and 1963, at station B located outside the bay (off Punta Canoas,

Durante el invierno (enero) la estructura hidrográfica fue débil, el oxígeno disuelto relativamente alto ( $\sim 5$  ml/l), la salinidad también relativamente alta ( $\sim 34.0^\circ/00$ ) y la temperatura moderada ( $\sim 16^\circ\text{C}$ ).

#### Variación temporal enfrente de Punta Canoas

La variación temporal de estas mismas propiedades de las aguas para los años 1961 y 1963, en la estación B, situada fuera de la bahía (enfrente de Punta Canoas, Fig. 3), mostró en general un patrón similar al de la zona central de la bahía (estación A, Fig. 2). Sin embargo, la baja temperatura ( $\sim 12^\circ\text{C}$ ) de la capa superficial durante la primavera (mayo) de 1963 reveló intensos procesos de surgencia en el área. Así mismo, las aguas de bajo contenido de oxígeno disuelto ( $< 3$  ml/l) se detectaron muy cerca de la superficie ( $\sim 30$  m). Las temperaturas de la capa superficial no sobrepasaron  $18^\circ\text{C}$  durante el verano y generalmente fueron más frías que las del interior de la bahía.

#### Diagramas T-S mensuales

En los diagramas T-S correspondientes a datos de distintos sitios de la bahía observados entre 1960 y 1968 (Fig. 4), se apreció también el contraste de la casi homogeneidad de enero contra la presencia de distintas masas de agua durante abril, julio y septiembre. En estos meses se detectó la presencia cerca del fondo de aguas frías ( $< 13^\circ\text{C}$ ), de alta salinidad ( $> 34.0^\circ/00$ ), densas ( $\sigma_t > 26.0$ ) y de bajo contenido de oxígeno disuelto ( $< 3$  ml/l). El mínimo de salinidad subsuperficial es una evidencia de la influencia de la MASP, que es transportada por la CC (Reid *et al.*, 1958).

Por comparación entre los diagramas T-S de agosto y septiembre de la Fig. 4, se infirió que en el mes de septiembre ocurrió una marcada renovación del agua de la capa superior de la bahía (0 a 50 m), por aguas de relativamente mayor salinidad y temperatura, cuyas características concuerdan con las de la Masa de Agua Ecuatorial Superficial (Kin'dyushev, 1970). El decrecimiento del mínimo salino subsuperficial, como se apreció en los diagramas T-S de diciembre (Fig. 4), puede suponerse ocasionado por una mayor influencia de aguas de la CC. Este efecto no concuerda con observaciones previas que indican incrementos de salinidad y temperatura du-

Fig. 3), presented a similar pattern to that of the central part of the bay (station A, Fig. 2). However, the low temperature ( $\sim 12^\circ\text{C}$ ) of the surface layer in spring (March) 1963 indicated intense upwelling processes in the area. Likewise, waters of low dissolved oxygen content ( $< 3$  ml/l) were detected very close to the surface ( $\sim 30$  m). Temperatures of the surface layer did not exceed  $18^\circ\text{C}$  during summer and were generally cooler than those inside the bay.

#### Monthly T-S diagrams

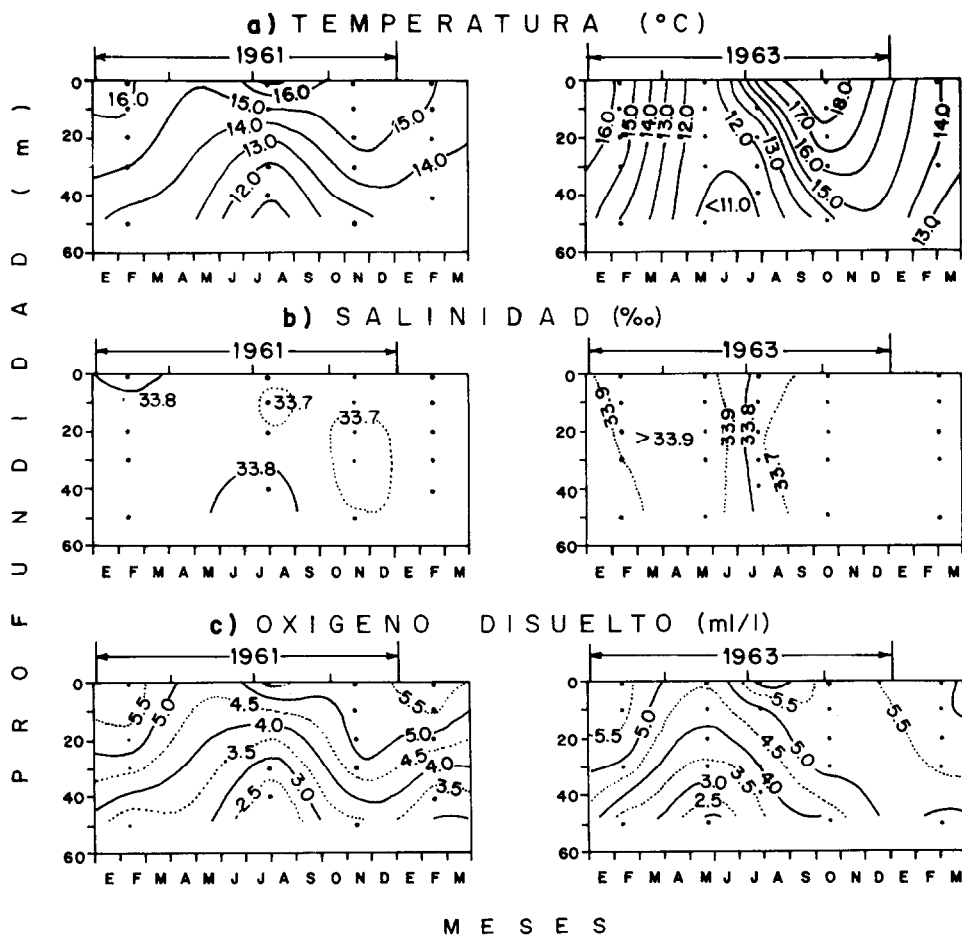
The T-S diagrams corresponding to data obtained between 1960 and 1968 from different sites of the bay (Fig. 4), also show the contrast between the near homogeneity of January and the presence of different water masses in April, July and September. The presence, near the bottom, of cold waters ( $< 13^\circ\text{C}$ ), of high salinity ( $> 34.0^\circ/00$ ), dense ( $\sigma_t > 26.0$ ) and low dissolved oxygen content ( $< 3$  ml/l) was detected during these months. The subsurface salinity minimum is evidence of the influence of SPWM, which is transported by the CC (Reid *et al.*, 1958).

From the comparison between the T-S diagrams for August and September (Fig. 4), it was inferred that in September there was marked replacement of the water in the upper layer of the bay (0-50 m) by waters of relatively higher salinity and temperature, whose characteristics coincide with those of the Equatorial Surface Water Mass (Kin'dyushev, 1970). The decrease in minimum subsurface salinity, as can be seen in the December T-S diagram (Fig. 4), can be assumed to be caused by greater influence of CC waters. This effect does not concur with previous observations that indicate increases in salinity and temperature during autumn (Wyllie, 1960) and can be indicative of the interannual hydrographic variability.

#### Histograms of frequency distribution

The histograms of frequency distribution of all the temperature, salinity and dissolved oxygen data, for each month between 1960 and 1968, showed bimodalities and greater dispersion of the data especially during spring and summer (Fig. 5). This suggests the combined effect of two or more





**Figura 3.** Distribución temporal de la temperatura (a), salinidad (b) y oxígeno disuelto (c) en la zona enfrente de Punta Canoas (posición B, en la Fig. 1c).

**Figure 3.** Temporal distribution of temperature (a), salinity (b) and dissolved oxygen (c) in the area off Punta Canoas (position B, shown in Fig. 1c).

rante el otoño (Wyllie, 1960) y puede ser un indicativo de la variabilidad hidrográfica in-terannual.

**Histogramas de distribución de frecuencias**

Los histogramas de distribución de fre-cuencias de todas las observaciones de tempe-ratura, salinidad y oxígeno disuelto, para cada mes entre 1960 y 1968, mostraron bimodalidades y una mayor dispersión de los datos, especialmente durante la primavera y el vera-no (Fig. 5). Lo anterior sugiere el efecto

physical processes on the hydrographic char-acteristics of the bay in those seasons of the year.

**Hydrographic sections of the bay**

The vertical distribution of temperature along a northwest-southeast longitudinal section of the bay, during the ECONER-0391 cruise (Figs. 1b, 6), showed a rise of the thermocline in the central part of the bay and a descent in the northwestern and southeast-ern parts. Water of low temperature (<13°C),

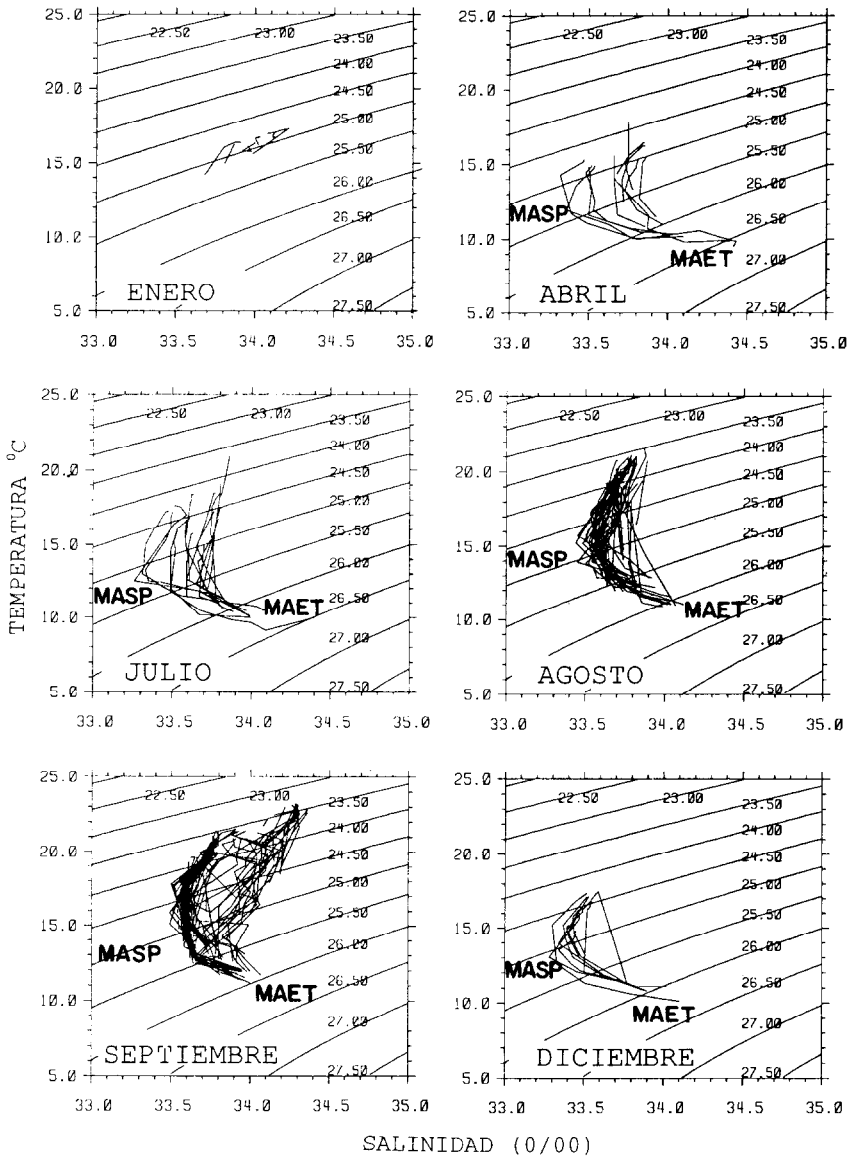


Figura 4. Diagramas T-S para distintos meses en el periodo 1960 a 1968.  
 Figure 4. T-S diagrams for different months in the period 1960 to 1968.

conjunto de dos o más procesos físicos sobre las características hidrográficas de la bahía en esas estaciones del año.

**Secciones hidrográficas de la bahía**

La distribución vertical de temperatura a lo largo de una sección longitudinal nor-

relatively high salinity (>33.7‰) and low dissolved oxygen content (<3 ml/l) was observed at the bottom of the bay. This low dissolved oxygen content indicates the influence of ETWM (based on Sverdrup *et al.*, 1942; Reid *et al.*, 1958; Wyllie, 1960). Nuclei of low salinity ( $\approx 33.4‰$ ) were observed in subsurface water associated with high values

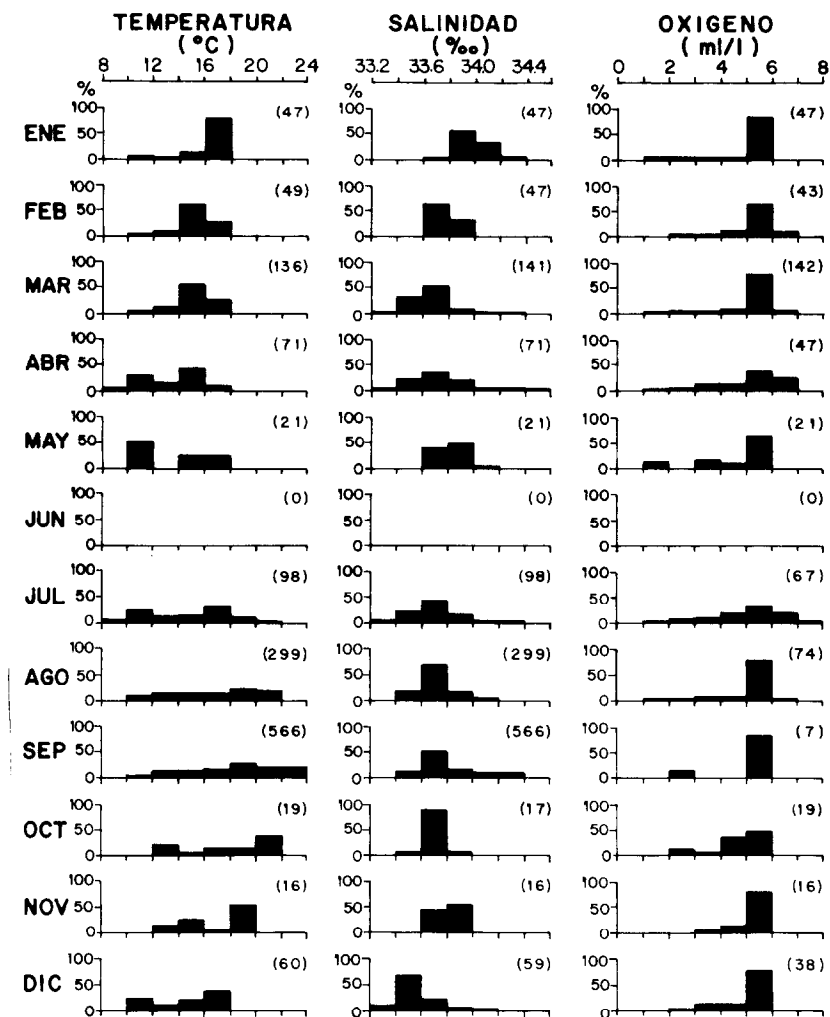
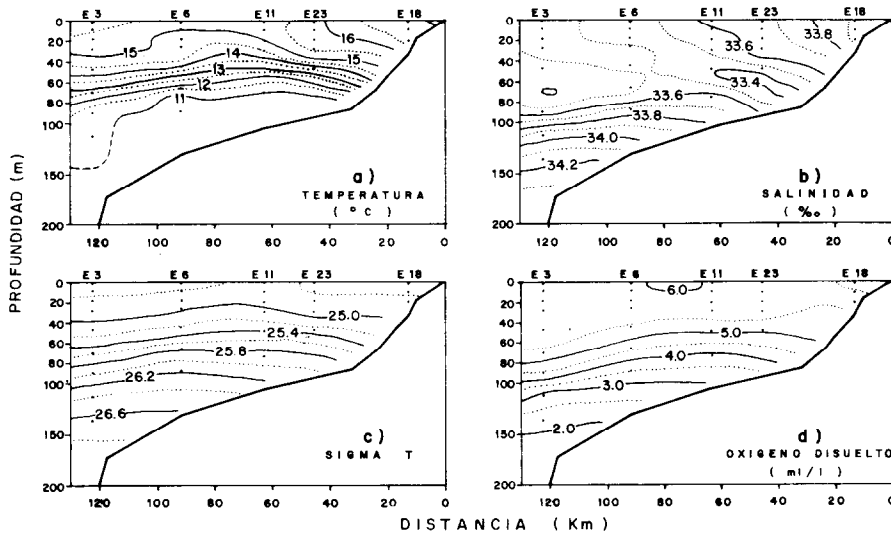


Figura 5. Histogramas de porcentaje de distribución de frecuencias de todos los datos de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto, disponibles entre 1960 y 1968. Número de datos entre paréntesis.

Figure 5. Histograms of percentage of frequency distribution of all the temperature, salinity and dissolved oxygen data for 1960 to 1968. Number of data in parentheses.

oeste-sureste de la bahía, durante el crucero ECONER 0391 (Figs. 1b y 6), mostró el ascenso de la termoclina en la zona central de la bahía y el descenso en las zonas noroeste y sureste de la misma. Sobre el fondo de la bahía se pudo apreciar el agua de baja temperatura (<13°C), relativamente alta salini-

of dissolved oxygen (>5 ml/l) and low values of temperature (~13°C). These nuclei of low salinity indicated the influence of SPWM. The occurrence, in the southern part of the bay, of a layer of water of higher salinity and temperature, that on occasions reaches the bottom (~50 m), is also shown in Fig. 6.



**Figura 6.** Secciones hidrográficas longitudinales del crucero ECONER 0391 (marzo 18 a 22, 1991), cuya posición se muestra en la Fig. 1b: a) temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), b) densidad ( $\sigma_t$ ), c) salinidad ( $\text{‰}$ ), d) oxígeno disuelto ( $\text{ml/l}$ ).

**Figure 6.** Longitudinal hydrographic sections of the ECONER-0391 cruise (March 18-22, 1991), whose position is shown in Fig. 1b: a) temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), b) density ( $\sigma_t$ ), c) salinity ( $\text{‰}$ ), d) dissolved oxygen ( $\text{ml/l}$ ).

dad ( $>33.7\text{‰}$ ) y bajo contenido de oxígeno disuelto ( $<3\text{ ml/l}$ ). Este bajo contenido de oxígeno disuelto revela la influencia de la MAET (con base en Sverdrup *et al.*, 1942; Reid *et al.*, 1958; Wyllie, 1960). En el agua subsuperficial, se observaron núcleos de baja salinidad ( $\approx 33.4\text{‰}$ ) asociados con valores altos de oxígeno disuelto ( $>5\text{ ml/l}$ ) y valores bajos de temperatura ( $\sim 13^{\circ}\text{C}$ ). Estos núcleos de baja salinidad revelaron la influencia de la MASP. La Fig. 6 muestra la ocurrencia, en la zona sur de la bahía, de una capa de agua de mayor salinidad y temperatura, que en ocasiones llega al fondo ( $\sim 50\text{ m}$ ).

#### Topografías de superficies equiscalesares

Las topografías de la isoterma de  $13^{\circ}\text{C}$ , isoxina de  $4\text{ ml/l}$  e isanosteras de  $280$  y  $300\text{ cl/t}$ , durante el crucero ECONER 0391 (Fig. 7), mostraron una elevación en la zona norte de la bahía y hundimientos en las zonas noroeste y sureste de la misma. Esta distribución de altos y bajos revela la ocurrencia de zonas de divergencia y convergencia dentro de la bahía, probablemente asociadas con el fenómeno de surgencia en el área. De la

#### Topographies of equiscalar surfaces

The topographies of the  $13^{\circ}\text{C}$  isotherm,  $4\text{ ml/l}$  oxygen isopleth and  $280$  and  $300\text{ cl/t}$  isanosteric surfaces, during the ECONER-0391 cruise (Fig. 7), showed an elevation in the northern part of the bay and sinkings in the northwestern and southeastern parts. This distribution of highs and lows shows the occurrence of divergence and convergence zones within the bay, probably associated with upwelling in the area. From the topography of the  $300\text{ cl/t}$  isanosteric surface (Fig. 7c), the occurrence (March 18-22, 1991) of an anticyclonic eddy of the waters, off the northwestern entrance of the bay, and another in the inner part, to the east of Isla Cedros, was inferred. The latter eddy is not observed in the topography of the  $280\text{ cl/t}$  isanosteric surface (Fig. 7d).

## DISCUSSION

### Stratification

The temporal variation of the characteristics of the waters in the central part of

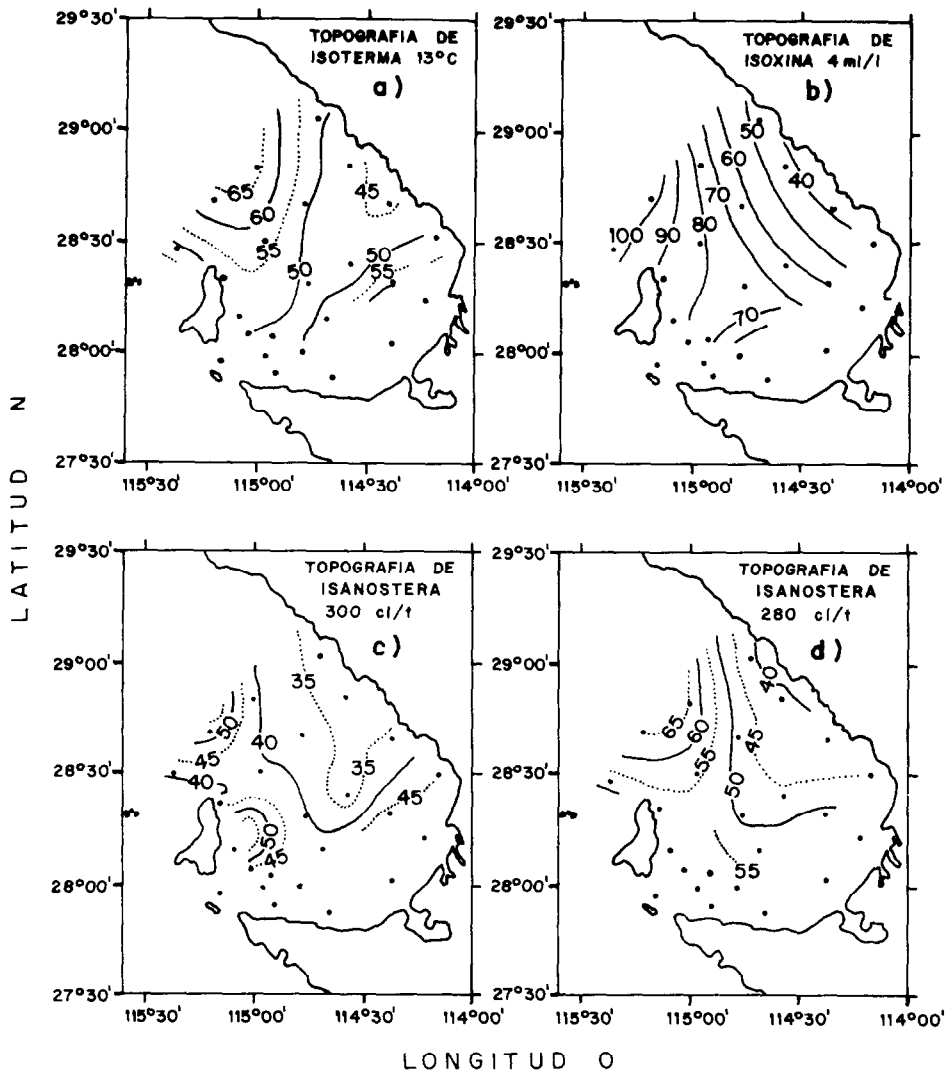


Figura 7. Topografías de superficies equiescalares del crucero ECONER-0391 (marzo 18 a 22, 1991): a) isoterma de 13°C, b) isoxina de 4 ml/l, c) y d) isanosteras de 300 y 280 cl/t.

Figure 7. Topographies of equiscalar surfaces of the ECONER-0391 cruise (March 18-22, 1991): a) 13°C isotherm, b) 4 ml/l oxygen isopleth, c) and d) 300 and 280 cl/t isanosteres.

topografía de la isanostera de 300 cl/t de esta misma figura, se infirió la ocurrencia (marzo 18 a 22, 1991) de un giro anticiclónico de las aguas, enfrente de la entrada noroeste de la bahía y otro giro anticiclónico en el interior, al este de Isla Cedros. En la topografía de la isanostera de 280 cl/t no se apreció este último giro (Fig. 7d).

the bay (station A; Figs. 1c, 2) and the T-S diagrams for different months (Fig. 4) show the contrast between the strong stratification in summer and the weak structure of the water column in winter. In general, this pattern was observed outside the bay, in the adjacent coastal area (station B, off Punta Canoas; Figs. 1c, 3). However, the low tem-

## DISCUSION

### Estratificación

La variación temporal de las características de las aguas en la zona central de la bahía (estación A; Figs. 1c, 2) y los diagramas T-S de distintos meses (Fig. 4) muestran el contraste de la fuerte estratificación del verano contra la débil estructura de la columna de agua observada en el invierno. En general, este mismo patrón fue observado fuera de la bahía, en la zona costera adyacente (estación B, enfrente de Punta Canoas; Figs. 1c y 3). Sin embargo, las bajas temperaturas ( $\sim 12^{\circ}\text{C}$ ) en la capa superficial durante la primavera, en la zona costera enfrente de Punta Canoas, revelan intensos procesos de surgencia en el área (máximo en mayo). La mecánica de este proceso de estratificación puede iniciarse durante la primavera, cuando el evento anual promedio de surgencia fuerza la intrusión de las aguas relativamente más frías de la capa inferior. Mientras tanto, en la superficie de las aguas se recibe más calor, como es de esperarse por la mayor incidencia de radiación solar en esa época del año (Miller y Thompson, 1975) y, por los procesos de mezcla, se forma una capa superficial mezclada de mayor temperatura, que al final del verano puede alcanzar  $>21^{\circ}\text{C}$  y una profundidad de aproximadamente 30 m. La capa intermedia (termoclina estacional), por su alta estabilidad, puede reducir el transporte vertical a través de la pincolina, lo que puede causar el incremento de calor en la capa superior (fenómeno de retroalimentación positiva).

La estructura vertical en tres capas principales es un fenómeno que ha sido ampliamente observado durante primavera y verano, en la región costera del Sistema de la Corriente de California (Reid *et al.*, 1958; Winant y Bratkovich, 1981). La estructura vertical de las aguas de BV presenta un comportamiento similar al de la Bahía de Todos Santos, B.C. (Mancilla y Martínez, 1991).

La bimodalidad y mayor dispersión de los datos disponibles entre 1960 y 1968, en los histogramas de distribución de frecuencias (Fig. 5), especialmente durante primavera y verano, apoyan la idea del efecto conjunto de cuando menos dos procesos físicos, el calentamiento estacional de la superficie del mar como respuesta a la mayor incidencia de

temperaturas ( $\sim 12^{\circ}\text{C}$ ) en la superficie layer during spring, off Punta Canoas, showed intense upwelling processes in the area (maximum in May). The mechanics of this process of stratification may begin during spring, when the annual mean upwelling event forces the intrusion of relatively cooler waters from the lower layer. Meanwhile, more heat is received at the surface, as might be expected due to greater incidence of solar radiation at this time of year (Miller and Thompson, 1975) and, because of the mixing processes, a mixed surface layer of higher temperature is formed, which at the end of summer can reach  $>21^{\circ}\text{C}$  and a depth of about 30 m. The intermediate layer (seasonal thermocline), because of its high stability, can reduce the vertical transport through the pycnocline, which can cause the increase in heat in the upper layer (positive retroalimentary phenomenon).

The three-layer vertical structure is a phenomenon that has been widely observed during spring and summer in the coastal region of the California Current System (Reid *et al.*, 1958; Winant and Bratkovich, 1981). The vertical structure of the waters of Bahía Vizcaíno presents a similar behaviour to that of Bahía de Todos Santos, Baja California (Mancilla and Martínez, 1991).

The bimodality and greater dispersion of the data for 1960 to 1968 in the histograms of frequency distribution (Fig. 5), especially during spring and summer, support the idea of a combined effect of at least two physical processes, the seasonal warming of the sea surface caused by greater incidence of solar radiation and the cooling of the lower level due to the annual upwelling event, that affect the characteristics of the waters in those seasons of the year.

Though the sinking of the thermocline suggests that relaxation of the annual upwelling event began in summer (Fig. 2), it was not until the end of this season that the stratification of the waters began to weaken, and the distribution of heat from the upper layer to the lower layers occurred during autumn. The vertical propagation of heat presented a decreasing amplitude, reaching the bottom in about six months. Therefore, whereas the surface temperature corresponded to the seasonal atmospheric cycle, cooling in winter and heating in summer, the opposite occurred in the lower levels. This phenomenon is a common characteristic of areas of the

radiación solar y el enfriamiento de la capa inferior debido al evento anual de surgencia, que afectan las características de las aguas en esas estaciones del año.

No obstante que el hundimiento de la termoclina sugiere que el relajamiento del evento anual de surgencia se inició en el verano (Fig. 2), no fue sino hasta el final de esa estación que se inició el debilitamiento de la estratificación de las aguas y durante el otoño ocurrió distribución de calor de la capa superior a los niveles inferiores. La propagación vertical del calor presentó una amplitud decreciente y en aproximadamente seis meses alcanzó la zona del fondo. Por consiguiente, mientras que la temperatura superficial correspondió al ciclo estacional atmosférico, con enfriamiento en invierno y calentamiento en verano, en los niveles inferiores fue a la inversa. Este fenómeno es una característica común de zonas del océano donde los efectos de advección enmascaran a los de conducción y convección de calor desde la superficie (zonas de surgencia y hundimiento) (Emilsson, comunicación personal\*) y ocurre a lo largo de la plataforma continental oeste de E.U.A. y Baja California (Huyer, 1977; Winant y Bratkovich, 1981).

### Masas de agua

Las características de la capa inferior durante primavera y verano respecto a salinidad ( $> 33.70/00$ ), baja temperatura ( $< 13^{\circ}\text{C}$ ), y el especialmente bajo contenido de oxígeno disuelto ( $< 3 \text{ ml/l}$ ; Figs. 2, 3, 6), permiten identificar la influencia de la MAET. Aunque las características térmicas de esta masa de agua son similares a las de la MASP, se distingue porque constituye la única fuente de agua de bajo contenido de oxígeno disuelto en la bahía (Wyllie, 1960). Puede suponerse que la MAET asciende sobre el talud continental, forzada por el evento anual de surgencia, desde una profundidad de cerca de 200 m. La MAET es transportada al norte sobre el talud continental, por la SCC con su núcleo a aproximadamente 200 m de profundidad y la MASP es transportada al sur por la CC (con base en Sverdrup *et al.*, 1942; Reid *et al.*, 1958; Wyllie, 1960; Wooster y Jones, 1970; Barton y Argote, 1980; Badan-Dangon *et al.*,

ocean where the effects of advection mask those of conduction and convection of heat from the surface (upwelling and downwelling areas) (Emilsson, personal communication\*), and occurs throughout the western continental platform of the United States and Baja California (Huyer, 1977; Winant and Bratkovich, 1981).

### Water masses

The characteristics of the lower layer during spring and summer with regard to salinity ( $> 33.70/00$ ), low temperature ( $< 13^{\circ}\text{C}$ ), and the especially low dissolved oxygen content ( $< 3 \text{ ml/l}$ ) (Figs. 2, 3, 6), show the influence of ETWM. Even though the thermal characteristics of this water mass are similar to those of SPWM, it can be distinguished because it is the only source of water of low dissolved oxygen content in the bay (Wyllie, 1960). It can be assumed that ETWM rises over the continental slope, forced by the annual upwelling event, from a depth of about 200 m. ETWM is transported northward over the continental slope by the CSC, with its nucleus at approximately 200 m depth, and SPWM is transported southward by the CC (based on Sverdrup *et al.*, 1942; Reid *et al.*, 1958; Wyllie, 1960; Wooster and Jones, 1970; Barton and Argote, 1980; Badan-Dangon *et al.*, 1989). Thus, it is to be expected that the variations in the transport of the CC and CSC will have an important effect on the hydrographic variability of the bay (based on Lynn and Simpson, 1987).

The subsurface salinity minima shown in the temporal variation of the water properties (Fig. 2), during spring and summer, in the T-S curves of April to December (Fig. 4) and in the longitudinal transect of salinity (Fig. 6b), are associated with high values of dissolved oxygen ( $> 5 \text{ ml/l}$ ) and with low temperatures ( $\sim 13^{\circ}\text{C}$ ) and can be considered a remnant of SPWM. These low salinity nuclei and the anticyclonic eddies off the northwestern entrance and to the east of Isla Cedros, shown in the topographies of the isanosteric surfaces of the ECONER-0391 cruise (Figs. 6b, 7c, 7d), can be assumed to be caused by recurrent penetrations of the CC through the wide and deep ( $\sim 150 \text{ m}$ ) northwestern en-

\* Emilsson, I. (s/año). Elementos de Oceanografía Física. Apuntes de clase, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

1989). De esta manera, puede esperarse que las variaciones en los transportes de la CC y la SCC tengan un efecto importante en la variabilidad hidrográfica de la bahía (con base en Lynn y Simpson, 1987).

Los mínimos salinos subsuperficiales que se muestran en la variación temporal de las propiedades de las aguas (Fig. 2), durante primavera y verano, en las curvas T-S de abril a diciembre (Fig. 4) y en el transecto longitudinal de salinidad (Fig. 6b), están asociados a valores altos de oxígeno disuelto ( $>5$  ml/l) y a bajas temperaturas ( $\sim 13^{\circ}\text{C}$ ), y pueden ser considerados como un remanente de la MASP. Estos núcleos de baja salinidad y los giros anticiclónicos enfrente de la entrada noroeste y al este de Isla Cedros, que se muestran en las topografías de las isanosteras del crucero ECONER 0391 (Figs. 6b, 7c, 7d), puede suponerse que son ocasionados por penetraciones recurrentes de la CC por la entrada amplia y profunda ( $\sim 150$  m) del noroeste y muestran evidencia del forzamiento a que están expuestas las aguas de la bahía, por la CC (con base en Wyllie, 1960; Bakun y Nelson, 1977). En relación con este efecto, en los diagramas T-S de diciembre (Fig. 4) también se observó decrecimiento de salinidad en las aguas; sin embargo, Wyllie (1960) observó incremento de salinidad durante el otoño. La discrepancia de resultados es una muestra de la variabilidad hidrográfica interanual de la bahía. Esta situación ya había sido prevista por Sverdrup *et al.* (1942), quienes clasificaron a la región como de transición de masas de agua.

Durante el mes de septiembre (Fig. 4) ocurrió una marcada renovación del agua de la capa superior de la bahía (0 a 50 m), por aguas de relativamente mayor salinidad y temperatura, cuyas características concuerdan con la Masa de Agua Ecuatorial Superficial (Kin'dyushev, 1970). Este mismo fenómeno fue observado por Wyllie (1960) durante septiembre en 1953 y 1958, quien lo atribuyó a la advección de agua oceánica superficial (0 a 50 m) desde la región adyacente a Isla Cedros y Punta Eugenia. La generación de esta contracorriente superficial que permite que las aguas del océano adyacente penetren en la bahía puede atribuirse a los ajustes verticales en el campo de la densidad y a la variación de los transportes, como lo sugieren Lynn y Simpson (1987) para la región costera del Sistema de la Corriente de California. Este

trance and show evidence of the forcing to which the waters of the bay are exposed, by the CC (based on Wyllie, 1960; Bakun and Nelson, 1977). In relation to this effect, in the T-S diagram for December (Fig. 4) a decrease in salinity is also observed. However, Wyllie (1960) observed an increase in salinity during autumn. This discrepancy is an example of the interannual hydrographic variability in the bay. This situation had already been predicted by Sverdrup *et al.* (1942), who classified the region as one of transition of water masses.

In September (Fig. 4) there was marked replacement of the water in the upper layer of the bay (0-50 m) by waters of relatively higher salinity and temperature, whose characteristics coincide with the Equatorial Surface Water Mass (Kin'dyushev, 1970). Wyllie (1960) observed this phenomenon in September of 1953 and 1958, and attributed it to advection of oceanic surface water (0-50 m) from the region adjacent to Isla Cedros and Punta Eugenia. The generation of this surface countercurrent, which allows the waters of the adjacent ocean to enter the bay, can be attributed to the vertical adjustments in the density field and to the variation of the transport, as suggested by Lynn and Simpson (1987) for the coastal region of the California Current System. This phenomenon may be related to the maximum penetration of the Equatorial Surface Water Mass during autumn in the Gulf of California (Torres-Orozco, 1993).

From the hydrographic characteristics found, it can be assumed that the water masses that most influence the characteristics of the waters of the bay are ETWM and SPWM, the former underlying the latter (based on Sverdrup *et al.*, 1942; Reid *et al.*, 1958; Wyllie, 1960; Hickey, 1979). Whereas SPWM is the only source of water of low salinity in the bay, ETWM contributes to the low dissolved oxygen content. Both water masses are the most important source of nutrients in the bay (Wyllie, 1960) and, consequently, of the biostimulating effect of the upwelling. Transformations of both water masses, with different proportions of mixing, were generally found in the lower and intermediate layers. Those derived from ETWM are more saline and have less dissolved oxygen than those derived from SPWM, even though they presented similar temperatures ( $< 13^{\circ}\text{C}$ ). As they are beneath the thermocline their



fenómeno pudiera estar relacionado con la máxima penetración de la Masa de Agua Ecuatorial Superficial durante el otoño en el Golfo de California (Torres-Orozco, 1993).

Por las características hidrográficas encontradas, puede suponerse que las masas de agua que más influyen en las características de las aguas de la bahía son la MAET y MASP, la primera subyacente a la última (con base en Sverdrup *et al.*, 1942; Reid *et al.*, 1958; Wyllie, 1960; Hickey, 1979). Mientras que la MASP constituye la única fuente de agua de baja salinidad en la bahía, la MAET contribuye al bajo contenido de oxígeno disuelto. Ambas masas de agua son la fuente más importante de nutrientes de la bahía (Wyllie, 1960) y, en consecuencia, del efecto bioestimulante de la surgencia. Transformaciones de ambas masas de agua, con diferentes proporciones de mezcla, se encontraron generalmente en las capas inferior e intermedia. Las derivadas de la MAET poseen más salinidad y menos oxígeno disuelto que las derivadas de la MASP, aunque presentaron temperaturas muy similares ( $< 13^{\circ}\text{C}$ ). Como subyacen la termoclina, puede esperarse que su identificación sea correcta, ya que no deben de estar tan alteradas por procesos externos como las masas de agua superficiales (Ecuatorial y Tropical).

### Surgencia

El evento anual promedio de surgencia, que está asociado con los mayores esfuerzos del viento (abril-mayo) en la región (Reid *et al.*, 1958; Bakun y Nelson, 1977), fuerza la intrusión sobre el fondo de la bahía de las masas de agua subártica y ecuatorial (MASP y MAET, respectivamente). Sin embargo, aunque la termoclina y la oxiclina ascienden en el interior de la bahía por dicho evento, no llegan a alcanzar la superficie (Fig. 2). En cambio, fuera de la bahía, enfrente de Punta Canoas el proceso de surgencia resulta más intenso (Fig. 3), como debe esperarse enfrente de puntas y cabos que se proyectan en la corriente (Sverdrup *et al.*, 1942); en consecuencia, la MASP y la MAET pueden surgir en la capa superior enfrente de Punta Canoas (Wyllie, 1960). Por lo mismo, las temperaturas de la capa superior del mar se presentan relativamente bajas ( $< 18^{\circ}\text{C}$ ) durante el verano. Puede esperarse que este fenómeno modifique algunas condiciones climáticas de la región (clima desértico con neblina) al soplar viento húmedo sobre una superficie del mar

identificación can be presumed to be correct, since they should not be as altered by external processes as the surface water masses (Equatorial and Tropical).

### Upwelling

The annual mean upwelling event, which is associated with the greatest wind stress (April-May) in the region (Reid *et al.*, 1958; Bakun and Nelson, 1977), forces the intrusion at the bottom of the bay of subarctic and equatorial water masses (SPWM and ETWM, respectively). However, even though the thermocline and the oxycline rise inside the bay because of this event, they do not reach the surface (Fig. 2). On the other hand, outside the bay, off Punta Canoas, the upwelling process is more intense (Fig. 3), as can be expected off points and capes that jut out into the current (Sverdrup *et al.*, 1942). Consequently, SPWM and ETWM can rise to the upper layer off Punta Canoas (Wyllie, 1960) and, in summer, the temperatures of the upper layer are relatively low ( $< 18^{\circ}\text{C}$ ). This phenomenon can be expected to modify some climatic conditions of the region (arid climate with mist) as humid wind blows on a relatively cooler sea surface (based on Köppen, 1934, in Neumann and Pierson, 1966).

In satellite images of sea surface temperature, especially in those taken during spring, a plume of colder waters from the upwelling area off Punta Canoas has been observed (Amador Buenrostro, personal communication).

### The anticyclonic eddy of the bay

The anticyclonic eddy to the east of Isla Cedros at the beginning of spring (Fig. 7c) was also inferred by Dawson (1952) and Wyllie (1960) from hydrographic data, and by Scripps (1962) from the trajectories of drogues during summer. This anticyclonic eddy of warmer waters has also been detected in satellite images of sea surface temperature, especially in autumn (Amador Buenrostro, personal communication). We can presume that it is a semipermanent characteristic of the circulation of the bay, which merits special attention.

### CONCLUSIONS

a) In winter, the vertical structure of the waters of the bay shows a very weak

relativamente más fría (con base en Köppen, 1934, citado por Neumann y Pierson, 1966).

En imágenes de satélite de la temperatura superficial del mar, especialmente en las tomadas durante la primavera, se ha observado la pluma de aguas más frías provenientes de la zona de surgencias de Punta Canoas (Amador Buenrostro, comunicación personal).

#### **El remolino anticiclónico de la bahía**

El remolino anticiclónico observado al este de Isla Cedros, al inicio de la primavera (Fig. 7c), también ha sido inferido por Dawson (1952) y Wyllie (1960), a partir de datos hidrográficos, y por Scripps (1962), a partir de las trayectorias de cuerpos de deriva observadas durante el verano. En imágenes de satélite de la temperatura superficial del mar también se ha detectado este giro anticiclónico de aguas más calientes, especialmente durante el otoño (Amador Buenrostro, comunicación personal). Podemos suponer que se trata de una característica semipermanente de la circulación de la bahía, que merece especial atención.

#### **CONCLUSIONES**

a) Durante el invierno, la estructura vertical de las aguas de la bahía acusa un gradiente vertical térmico muy débil y, en consecuencia, es poco estable.

b) Debido al calentamiento estacional y al evento anual de surgencia, al final de la primavera se inicia una estructura vertical térmica de tres capas principales, la cual se refuerza durante el verano y persiste hasta mediados del otoño. El agua profunda es derivada de la MAET, de alta salinidad y bajo oxígeno disuelto. La capa intermedia o termoclina se caracteriza por un mínimo de salinidad. La temperatura en la capa superior generalmente excedió 17°C y mostró alto contenido de oxígeno disuelto (>5 ml/l).

c) Durante el otoño se distribuyó el calor de la capa superior a los niveles inferiores. El calor se propagó con amplitud decreciente desde la superficie al inicio del otoño y alcanzó el fondo de la bahía en el invierno. En consecuencia, el ciclo térmico en la superficie siguió el ciclo estacional atmosférico. Sin embargo, en los niveles inferiores ocurrió

thermal vertical gradient and, in consequence, is not very stable.

b) Due to seasonal warming and the annual upwelling event, a thermal vertical structure of three main layers begins at the end of spring, which strengthens in summer and persists until mid-autumn. The deep water is derived from ETWM, of high salinity and low dissolved oxygen. The intermediate layer or thermocline is characterized by a minimum in salinity. Temperature in the upper layer generally exceeded 17°C and showed high dissolved oxygen content (>5 ml/l).

c) In autumn, heat from the upper layer was distributed to the lower levels. Heat was propagated with decreasing amplitude from the surface in early autumn and reached the bottom of the bay in winter. Consequently, the thermal cycle at the surface followed the seasonal atmospheric cycle. However, in the lower levels, cooling occurred in summer and warming in winter, as a result of the annual upwelling event and the shift in the propagation of heat from the surface layer.

d) The types of water beneath the thermocline presented different proportions of mixing of ETWM and SPWM. ETWM, of relatively high salinity, low temperature and low dissolved oxygen, occurred at the bottom (>80 m) and in shallower levels off Punta Canoas. SPWM, of relatively low salinity and high dissolved oxygen content, occurred associated to the southward flow of the CC and was located above ETWM.

e) The upwelling process was well developed during spring, to the north of the bay (Punta Canoas). Inside the bay, this process manifested itself as a rise of the thermocline. However, in the southern part, relatively more saline and warmer waters converged, with the consequent sinking and eventual disappearance of the thermocline.

f) The main processes affecting the hydrographic variability in the bay were: the annual upwelling event, the seasonal warming and cooling, the advection of water from the upwelling area off Punta Canoas and from the adjacent ocean at the end of the upwelling period (September), the convergence of waters towards the southern part of the bay and the contributions of waters of low salinity, of SPWM, and of low dissolved oxygen, of ETWM.

enfriamiento en verano y calentamiento en invierno, por efecto del evento anual de surgencia y el desfase en la propagación del calor desde la capa superficial.

d) Los tipos de agua bajo la termoclina presentaron diferentes proporciones de mezcla de MAET y MASP. La MAET, de relativamente alta salinidad, baja temperatura y bajo oxígeno disuelto, se presentó sobre el fondo (>80 m) y en niveles más someros enfrente de Punta Canoas. La MASP (de relativamente baja salinidad y alto contenido de oxígeno disuelto) se asoció al flujo hacia el sur de la CC y se situó por encima de la MAET.

e) El proceso de surgencia se presentó muy desarrollado durante la primavera, al norte de la bahía (Punta Canoas), y se manifestó dentro de la bahía como una elevación de la termoclina. Sin embargo, en la zona sur convergieron aguas relativamente más calientes y salinas, con el consecuente hundimiento y eventual desaparición de la termoclina.

f) Las principales contribuciones a la variabilidad hidrográfica de la bahía fueron: el evento anual de surgencia, el calentamiento y enfriamiento estacionales, la advección de agua desde la zona de surgencias enfrente de Punta Canoas y desde el océano adyacente al final del periodo de surgencias (septiembre), la convergencia de las aguas hacia la zona sur de la bahía y las contribuciones de aguas de baja salinidad, de la MASP, y de bajo oxígeno disuelto, de la MAET.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de la Secretaría de Marina a través del Banco de Datos e Información Oceanográfica de la Dir. Gral. de Oceanografía Naval, de la tripulación del B/O *H05 Altair* de la Armada de México, de Luis C. Jiménez Pérez y del personal técnico de la Estación de Investigación Oceanográfica de Ensenada, quienes prestaron valiosa colaboración durante el crucero ECONER0391. Se agradecen asimismo las facilidades brindadas por el Centro de Cómputo del CICESE durante el procesamiento de los datos, y la discusión de los resultados con José María Robles Pacheco, quien aportó numerosas sugerencias a una versión preliminar de este artículo.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks are due to the *Secretaría de Marina* for the *Banco de Datos e Información Oceanográfica* of the *Dirección General de Oceanografía Naval*, to the crew of the R/V *H05 Altair* of the Mexican Navy and to Luis C. Jiménez Pérez and technical personnel of the *Estación de Investigación Oceanográfica de Ensenada* for their valuable collaboration during the ECONER-0391 cruise. Thanks are also due to CICESE for the facilities provided by the *Centro de Cómputo* for the processing of the data, and to José María Robles Pacheco for the discussion of the results and numerous suggestions to a preliminary version of this paper.

English translation by Christine Harris.

---

#### REFERENCIAS

- Badan-Dangon, A., Robles, J.M. and García, J. (1989). Poleward flows off Mexico's Pacific coast, pp. 176-202. In: S.J. Neshyba, C.N.K. Mooers, R.L. Smith and R.T. Barber (eds.), *Coastal and estuarine studies. Poleward flows along eastern ocean boundaries*. Springer-Verlag, New York, 374 pp.
- Bakun, A. and Nelson, C.S. (1977). Climatology of upwelling related processes off Baja California. *CALCOFI Rep.* (1 July 1975 to 30 June 1976), 19: 107-127.
- Barton, E.D. and Argote, M.L. (1980). Hydrographic variability in an upwelling area off northern Baja California in June 1976. *J. Mar. Res.*, 38(4): 631-649.
- Dawson, E.Y. (1952). Circulation within Bahía Vizcaíno, Baja California, and its effects on marine vegetation. *J. Botany*, 39(7): 425-432.
- Hickey, B.M. (1979). The California Current System - hypotheses and facts. *J. Prog. Oceanogr.*, 8: 191-279.
- Huyer, A. (1977). Seasonal variation in temperature, salinity and density over the continental shelf off Oregon. *Limnol. Oceanogr.*, 22(3): 442-453.

- Kin'dyushev, V.I. (1970). Seasonal variations of water mass in the California region of the Pacific Ocean. **Oceanology**, 10(4): 456-464.
- Lynn, J.R. and Simpson, J.J. (1987). The California Current System. Variability of its physical characteristics. **J. Geophys. Res.**, 92(C12): 12947-12966.
- Mancilla, P.M. y Martínez, G.G.M. (1991). Variación estacional de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en la Bahía de Todos Santos, B.C., México. **Revista de Investigación Científica, UABCS**, 2(2): 33-45.
- Miller, A. and Thompson, J.C. (1975). **Elements of meteorology**. Bell and Howell, Columbus, 362 pp.
- Neumann, G. and Pierson, W.J. Jr. (1966). **Principles of physical oceanography**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 545 pp.
- Pond, S. and Pickard, G.L. (1978). **Introductory dynamic oceanography**. Pergamon Press, Oxford, 241 pp.
- Reid, J.L., Roden, G.I. and Wyllie, J.G. (1958). Studies of the California Current System. **CALCOFI Progress Rep.**, 7-1-56 to 1-1-58, pp. 27-57.
- Scripps Institution of Oceanography (1962). Results of current measurements with drogues, 1958-1961. Scripps Institution of Oceanography Reference 62-27. **Univ. California, San Diego**, Data Rep., 11 pp.
- Secretaría de Marina (1972). Derrotero de las costas sobre el Océano Pacífico de México, América Central y Colombia. **Secretaría de Marina, Dirección Gral. de Oceanografía**, Pub. F.H. 102, México, D.F., 349 pp.
- Sverdrup, H.U., Johnson, M.W. and Fleming, R.H. (1942). **The oceans, their physics, chemistry and general biology**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1087 pp.
- Torres Orozco, E. (1993). Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de maestría, CICESE, Ensenada, B.C., 80 pp.
- U.S. Navy. (1970). Instruction manual for obtaining oceanographic data. **U.S. Navy, Oceanographic Office**, Pub. H.O. 607.
- Winant, C.D. and Bratkovich, A.W. (1981). Temperature and currents on the Southern California Shelf: a description of the variability. **J. Phys. Oceanogr.**, 11(1): 71-86.
- Wooster, W.S. and Jones, J.H. (1970). California Undercurrent off northern Baja California. **J. Mar. Res.**, 28(2): 235-250.
- Wyllie, J.G. (1960). The water masses of Sebastian Vizcaino Bay. **CALCOFI Rep.**, 8 (1 July 1959-30 June 1960): 83-93. [Contrib. Scripps Inst. Oceanogr. 1357, pp. 907-917.]