

Promedios de temperatura y salinidad sobre una superficie isopícnica en la capa superior del océano frente a Baja California

Mean temperature and salinity along an isopycnal surface in the upper ocean off Baja California

G Jerónimo, J Gómez-Valdés

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Km 107 Carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada, Baja California, México, * E-mail: gjeronim@cicese.mx

Resumen

Se estudiaron los campos medios de las propiedades termodinámicas de la superficie de $25\sigma_\theta$ en la parte sur de la Corriente de California utilizando datos del programa Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL) de 1998 a 2005. Se implementó el método de análisis objetivo para los datos de CTD. El método fue validado por medio de ensayos Monte Carlo. Las escalas de correlación óptimas fueron $L_Y = 110$ km y $L_X = 90$ km, en dirección paralela y perpendicular a la costa, respectivamente. En concordancia con el balance geostrofico, la superficie media de $25\sigma_\theta$ estuvo inclinada, con la parte más somera (38 m) cerca de la costa y la parte más profunda (68 m) mar adentro. El área más lejana de la costa se encontró dominada por remolinos. Al norte de Punta Eugenia resaltaron amplias áreas de baja temperatura ($<14.0^\circ\text{C}$) y salinidad (<33.6), mientras que al sur dominaron altas temperaturas ($>14.4^\circ\text{C}$) y salinidades (>33.7). De esta manera Punta Eugenia, en promedio, resulta la zona donde confluyen las aguas cálidas y saladas de origen ecuatorial y las aguas frías y poco saladas de origen subártico. La variabilidad de los campos termodinámicos indica que hay tres zonas distintas: la norte ($29\text{--}31^\circ\text{N}$), de variabilidad preponderantemente baja, la sur ($25\text{--}27.5^\circ\text{N}$), de variabilidad preponderantemente alta, y la central, de variabilidad media entre las otras dos. La discriminación entre estas tres zonas fue corroborada mediante análisis de gradientes de temperatura y de salinidad, y mediante perfiles verticales medios de las tres zonas.

Palabras clave: superficie $25\sigma_\theta$, temperatura potencial, salinidad, análisis objetivo, IMECOCAL.

Abstract

The mean thermodynamic fields along the $25\sigma_\theta$ surface in the southern region of the California Current were studied using the 1998–2005 data from the IMECOCAL (Mexican Research of the California Current) program. The method of objective analysis was implemented and subsequently validated by Monte Carlo tests. The optimum correlation scales, in parallel and perpendicular direction to the coast, were $L_Y = 110$ km and $L_X = 90$ km, respectively. In agreement with geostrophic balance, the mean $25\sigma_\theta$ surface was inclined, with the shallower part (38 m) near the shore and the deeper part (68 m) offshore. The area farthest from the coast was dominated by eddies. Extensive areas of low temperature ($<14.0^\circ\text{C}$) and salinity (<33.6) were found to the north of Point Eugenia, while higher temperatures ($>14.4^\circ\text{C}$) and salinities (>33.7) occurred to the south. Point Eugenia, therefore, is generally the converging zone where warm, salty equatorial water meets the cold, less salty subarctic water. The variability of the thermodynamic fields revealed the presence of three different zones: the northern ($29\text{--}31^\circ\text{N}$) low variability zone, the southern ($25\text{--}27.5^\circ\text{N}$) high variability zone, and the central zone of moderate variability. The distinction of these three zones was corroborated by analysis of temperature and salinity gradients, as well as by *in situ* vertical profiles.

Key words: $25\sigma_\theta$ surface, potential temperature, salinity, objective analysis, IMECOCAL.

Introducción

Varios autores han estudiado el campo de velocidades geostroficadas para dilucidar la variabilidad espacial y temporal de los flujos frente a Baja California, empleando datos hidrográficos ya sea del programa California Cooperative Fisheries Investigations (CalCOFI) o de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL) o de ambos (Gómez-Valdés 1983, Lynn y Simpson 1987, Durazo y Baumgartner 2002). Otra manera de investigar la variabilidad

Introduction

Several authors have studied geostrophic velocity fields to explain the spatial and temporal variability of flows off Baja California (Mexico), using hydrographic data from either the California Cooperative Fisheries Investigations (CalCOFI) or the Mexican Research of the California Current (IMECOCAL) programs, or from both (Gómez-Valdés 1983, Lynn and Simpson 1987, Durazo and Baumgartner 2002). Another way of studying the variability in circulation based on temperature,

de la circulación con datos de temperatura, salinidad y presión es con el uso de superficies de densidad potencial constante (You y McDougall 1990), ya que los procesos de mezcla de escala grande se desarrollan primero a lo largo de ellas (Montgomery 1938, Schmitt 1990).

Una de las superficies isopícnicas que se puede elegir para estudiar los procesos de mezcla inducidos por la circulación en la capa superior del océano frente a Baja California es la superficie de $25\sigma_\theta$ fundamentalmente porque en la Corriente de California el mínimo de salinidad ocurre cerca de esta superficie (Reid 1973, Talley 1985) y, en el área IMECOCAL, la profundidad de la misma se encuentra cerca de la pycnoclina (Gómez-Valdés 1983, Jerónimo y Gómez-Valdés 2003). Otros fenómenos, como los remolinos de mesoescala, también influyen la distribución de propiedades a lo largo de las isopícnicas (You y McDougall 1990). A diferencia de la relativamente gran cantidad de estudios sobre corrientes geostróficas, frente a Baja California no hay estudios sobre los efectos de la circulación en las superficies isopícnicas.

El propósito de este trabajo es entonces estimar los campos medios de temperatura potencial y salinidad de la superficie de $25\sigma_\theta$ que se encuentran frente a la costa oeste de Baja California. Se aborda también el problema de la zonificación, para lo cual se sigue el criterio del grado de variabilidad de las propiedades termodinámicas.

Área de estudio y datos

En la figura 1 se muestra la red de estaciones, que cubre una malla que contiene 12 líneas hidrográficas. La mayoría de las estaciones de muestreo (puntos negros) están separadas por una distancia de 37 km, a excepción de las estaciones costeras, y la distancia entre cada línea hidrográfica es de 74 km. Además, aparte de las irregularidades del plan de muestreo, debe tomarse en cuenta que las mediciones no siempre ocurren en las posiciones marcadas en el derrotero y, en algunas ocasiones, algunas estaciones no fueron cubiertas por lo que, en general, las mediciones son espacial y temporalmente irregulares. Los datos analizados en el presente trabajo son de 29 cruceros, desde la expedición de julio de 1998 hasta el crucero de octubre de 2005. García-Córdova *et al.* (2005) reportan una descripción completa del procesamiento de los datos obtenidos con un Seabird CTD. Para este trabajo se revisaron los datos de cada lance del banco de datos IMECOCAL y se suavizaron los que mostraron desviaciones extremas.

Métodos

Se sabe que los datos de los campos escalares del programa IMECOCAL son inhomogéneos, es decir, la distancia entre estaciones no es uniforme; no obstante, el método de análisis objetivo no se había explorado antes. Aquí se presenta en forma resumida la implementación del método, siguiendo los desarrollos propuestos por Le Traon (1990) y Davis (1985). La malla de interpolación se generó por diferencias finitas por el

salinity and pressure data is by using constant potential density surfaces (You and McDougall 1990), since large-scale mixing processes first occur along them (Montgomery 1938, Schmitt 1990).

One of the isopycnal surfaces that can be chosen to study circulation-induced mixing in the upper ocean layer off Baja California is the $25\sigma_\theta$ surface, primarily because minimum salinity in the California Current occurs close to it (Reid 1973, Talley 1985) and, in the IMECOCAL area, the depth of this surface is found close to the pycnocline (Gómez-Valdés 1983, Jerónimo and Gómez-Valdés 2003). Other phenomena, such as mesoscale eddies, also influence the distribution of properties along isopycnals (You and McDougall 1990). Even though information can be found on geostrophic currents off Baja California, studies have not been conducted on the effects of circulation on isopycnal surfaces.

This study therefore aims to estimate the mean potential temperature and salinity fields along the $25\sigma_\theta$ surface off the west coast of Baja California. The problem of zonation is also dealt with, following the criterion for the degree of variability of thermodynamic properties.

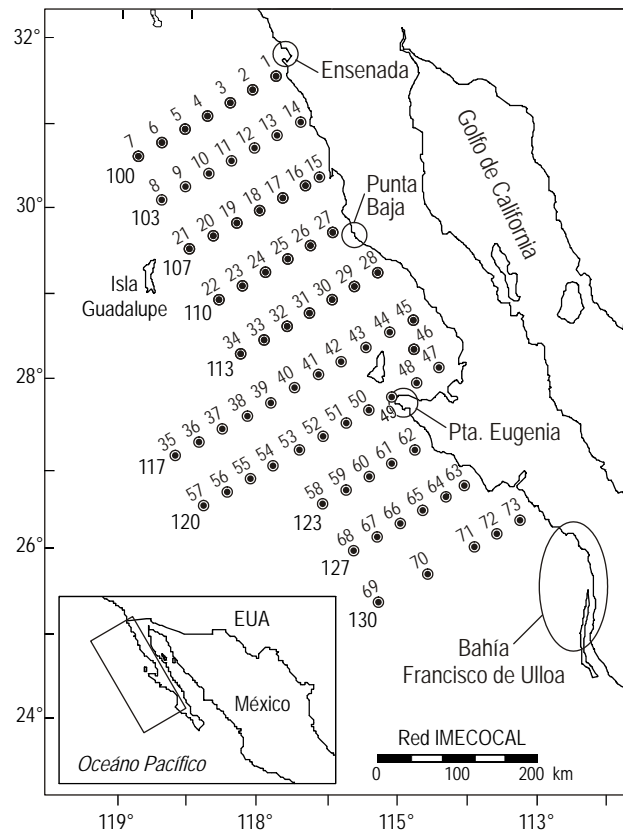


Figura 1. Red de estaciones del programa Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL). Los números enteros corresponden a la línea hidrográfica y los decimales a la estación.

Figure 1. Grid of stations from the IMECOCAL (Mexican Research of the California Current) program. Whole numbers correspond to the hydrographic lines and decimal numbers to the stations.

método de Tinoco-Ruiz (1997). A fin de minimizar el error, se utilizó una distancia entre los puntos de la malla de 18.0 km.

Con los datos de cada crucero se obtuvieron las escalas de autocorrelación de los campos de temperatura, salinidad y densidad. Se encontró por medio de variogramas (ver Cressie 1993) que la distribución de la correlación de esos campos tiene dos ejes principales, uno paralelo a la costa (L_x) y el otro perpendicular a la misma (L_y). Ajustando por mínimos cuadrados el modelo Gaussiano se obtuvieron las escalas de correlación, resultando $L_x = 90$ km y $L_y = 110$ km. De la información obtenida a partir de los variogramas, para la construcción del estimador se eligió la base de funciones:

$$\left\{ F_1 = 1, F_2 = e^{-\frac{(x/L_x)^2}{2}}, F_3 = e^{-\frac{(y/L_y)^2}{2}} \right\}, \quad (1)$$

de tal forma que la función de correlación empleada fue

$$C_{xy}(x, y) = E + (1 - E)e^{-\frac{(x/L_x)^2}{2} - \frac{(y/L_y)^2}{2}}, \quad (2)$$

en donde E es el porcentaje de la varianza explicada de las fluctuaciones del campo medio. Siguiendo a Bretherton *et al.* (1976) y Chereskin y Trunnell (1996) se seleccionó E como el 10% de la varianza.

Para evaluar la eficiencia del estimador obtenido mediante análisis objetivo se usó el método Monte Carlo, el cual consiste en generar un conjunto de vectores aleatorios con alguna distribución de probabilidad conocida que simulen los resultados de una variable física, para después comparar estadísticamente las observaciones con las simulaciones (Dufour 2005). Este método se empleó para los datos generados de la manera siguiente. Primero, para cada estación, se buscó la profundidad (H), la temperatura potencial (θ) y la salinidad (S) correspondientes a la superficie de $25\sigma_\theta$. Posteriormente se calcularon los promedios y desviación estándar de los campos de H , θ y S de los 29 cruceros utilizados. Enseguida, con los campos de H , θ y S interpolados con análisis objetivo se obtuvo la estimación ($25\sigma_\theta^i$) de la superficie de $25\sigma_\theta$. Luego se calculó la diferencia entre $25\sigma_\theta$ y $25\sigma_\theta^i$.

Dada la función de correlación obtenida al aplicar el método de análisis objetivo, para la implementación de los ensayos Monte Carlo se eligió la función de distribución de las diferencias entre $25\sigma_\theta$ y $25\sigma_\theta^i$ en la forma

$$G_{xy} = E\delta(x, y) + (1 - E)e^{-\frac{(x/L_x)^2}{2} - \frac{(y/L_y)^2}{2}}, \quad (3)$$

donde $\delta(x, y)$ es la función delta de Dirac, L_x y L_y son las escalas de correlación, (x, y) son las coordenadas de las diferencias, E es el porcentaje de varianza obtenido a partir de las diferencias (Von Storch 1997). Los ensayos Monte Carlo

Study area and data

The grid of stations covering 12 hydrographic lines is shown in figure 1. Most of the sampling stations (black points) are spaced 37 km apart, except for the coastal stations, and the distance between each hydrographic line is 74 km. It is important to note that besides the irregularities of the sampling plan, measurements are not always made at the positions marked on the chart and stations are sometimes not covered; thus, in general, the measurements are spatially and temporally irregular. The data analyzed herein were collected on 29 cruises between July 1998 and October 2005. A complete description of the Seabird CTD data processing can be found in García-Córdova *et al.* (2005). For this study, data from each cast of the IMECOCAL database were examined, and those with extreme deviations were smoothed.

Methods

The scalar field data of the IMECOCAL program are inhomogeneous, that is, the distance between stations is not uniform; nevertheless, the method of objective analysis has not been previously considered. A summary of the implementation of the analysis is presented, following the developments proposed by Le Traon (1990) and Davis (1985). The interpolation mesh was generated by finite differences according to Tinoco-Ruiz (1997). To minimize error, the distance between mesh points used was 18.0 km.

Using data from each cruise, we obtained the autocorrelation scales of the temperature, salinity and density fields. Variograms (see Cressie 1993) were constructed, which showed that the distribution of the correlation of those fields had two main axes, one parallel (L_y) and another perpendicular (L_x) to the coastline. A least-squares fit of the Gaussian model was performed to obtain the correlation scales: $L_x = 90$ km and $L_y = 110$ km. Based on the information provided by the variograms, the following function base was chosen to construct the estimator:

$$\left\{ F_1 = 1, F_2 = e^{-\frac{(x/L_x)^2}{2}}, F_3 = e^{-\frac{(y/L_y)^2}{2}} \right\} \quad (1)$$

Hence, the correlation function used was:

$$C_{xy}(x, y) = E + (1 - E)e^{-\frac{(x/L_x)^2}{2} - \frac{(y/L_y)^2}{2}}, \quad (2)$$

where E is the percentage of explained variance of the mean field fluctuations. Following Bretherton *et al.* (1976) and Chereskin and Trunnell (1996), E was considered to be 10% of the variance.

The Monte Carlo method was used to assess the estimator obtained by objective analysis. This method consists of

mostraron que el ruido es nulo en los errores de las diferencias. La media estadística de cada realización fue de 0.01 kg m^{-3} con una desviación estándar de 0.02 kg m^{-3} .

Resultados

En la figura 2 se muestra el promedio y la desviación estándar de la profundidad de la superficie de $25\sigma_\theta$. En la distribución media de la profundidad destacaron dos franjas: una en la que las isóbatas fueron paralelas a la costa y otra en donde dominaron los meandros y los remolinos. La profundidad media fue más somera (38 m) cerca de la costa y se hizo más profunda hacia mar adentro hasta alcanzar 74 m de profundidad. En la franja de remolinos se presentaron dos depresiones, una centrada en 29°N , 117°O , y la otra en 26°N , 117°O . La variabilidad preponderante de la profundidad fue $\sim 13 \text{ m}$; en particular, en la zona norte fue relativamente baja (10–12 m) y en el resto de la región relativamente alta (12–14 m). La depresión de H centrada en 29°N , 117°O fue más variable que la centrada en 26°N , 117°O .

La figura 3 muestra el promedio y la desviación estándar de la temperatura potencial de la superficie de $25\sigma_\theta$. La temperatura media mostró una distribución casi zonal con estructura de frente cerca de Punta Eugenia. La temperatura fue relativamente baja (13.8°C) al norte del frente y más alta (14.4 – 15.0°C) al sur. Una lengüeta de alta temperatura emergió de la Bahía Francisco de Ulloa. Por otra parte, la distribución de la variabilidad de la temperatura mostró que la región de menor variación (0.7°C) se dio en la zona más norte y aumentó hacia el sur hasta alcanzar 1.2°C en la Bahía Francisco de Ulloa.

La figura 4 muestra el promedio y la desviación estándar de la salinidad de la superficie de $25\sigma_\theta$. La distribución de la salinidad media fue casi zonal con valores bajos (33.5) al norte de Punta Eugenia y altos (33.7) al sur. El máximo de salinidad se presentó (33.8) frente a la Bahía Francisco de Ulloa. La distribución de la variabilidad de la salinidad fue también zonal, con valores bajos (0.2) al norte de Punta Eugenia y más altos (0.3) al sur.

Discusión

Las variaciones de la temperatura potencial y la salinidad a la largo de la isopicna $25\sigma_\theta$ fueron estudiadas en el océano adyacente a Baja California. Se construyó un interpolador aplicando el método de análisis objetivo a los datos de CTD del programa IMECOCAL. Dada la anisotropía en la geometría de las observaciones en la malla IMECOCAL, la técnica de análisis objetivo resultó una buena opción para la interpolación de los campos. Con las escalas de correlación encontradas $L_x = 90 \text{ km}$ (dirección ortogonal a la costa) y $L_y = 110 \text{ km}$ (dirección paralela a la costa), el interpolador obtenido por análisis objetivo resultó óptimo (en el sentido de mínima varianza) para los campos escalares de la región de estudio. La validez del interpolador fue analizada usando experimentos Monte Carlo.

generating a set of random vectors with some known probability distribution that simulate the results of a physical variable, and then statistically comparing the observations and simulations (Dufour 2005). The method was applied to the data as follows. First, for each station, the depth (H), potential temperature (θ) and salinity (S) corresponding to the $25\sigma_\theta$ surface were determined. The means and standard deviations of the H , θ and S fields of the 29 cruises were then calculated. Second, using the H , θ and S fields interpolated by objective analysis, the estimate ($25\sigma_\theta^i$) of the $25\sigma_\theta$ surface was obtained. The difference between $25\sigma_\theta$ and $25\sigma_\theta^i$ was then calculated.

Based on the correlation function obtained from the objective analysis, the distribution function of the differences between $25\sigma_\theta$ and $25\sigma_\theta^i$ was chosen to implement the Monte Carlo tests:

$$G_{xy} = E\delta(x, y) + (1 - E)e^{-((x/L_x)^2 + (y/L_y)^2)}, \quad (3)$$

where $\delta(x, y)$ is the Dirac delta function, L_x and L_y are the correlation scales, (x, y) are the coordinates of the differences and E is the percentage of variance obtained from the differences (Von Storch 1997). The Monte Carlo tests showed null noise for the errors of the differences. The mean statistic of each run was 0.01 kg m^{-3} , with a standard deviation of 0.02 kg m^{-3} .

Results

The mean and standard deviation of the depth of the $25\sigma_\theta$ surface is shown in figure 2. The mean depth distribution revealed two sectors: one where the isobaths were parallel to the coastline and another where meanders and eddies dominated. Mean depth was shallower (38 m) near the coast and increased offshore, reaching 74 m. Two depressions occurred in the eddy-dominated sector, one centered at 29°N , 117°W , and the other at 26°N , 117°W . The prevailing depth variability was $\sim 13 \text{ m}$, and it was relatively low (10–12 m) in the northern part and relatively high (12–14 m) in the rest of the region. The depression at 29°N , 117°W was more variable than that at 26°N , 117°W .

The mean and standard deviation of the potential temperature of the $25\sigma_\theta$ surface is shown in figure 3. Mean temperature presented a near-zonal distribution with a frontal structure off Point Eugenia. The temperature was relatively low (13.8°C) to the north of the front and higher (14.4 – 15.0°C) to the south. A high-temperature plume emerged from Francisco de Ulloa Bay. The temperature variability distribution showed that variation was lowest (0.7°C) in the northernmost part and increased southwards until reaching 1.2°C in Francisco de Ulloa Bay.

The mean and standard deviation of salinity of the $25\sigma_\theta$ surface is shown in figure 4. Mean salinity presented a near-zonal distribution, with low values (33.5) to the north of Point

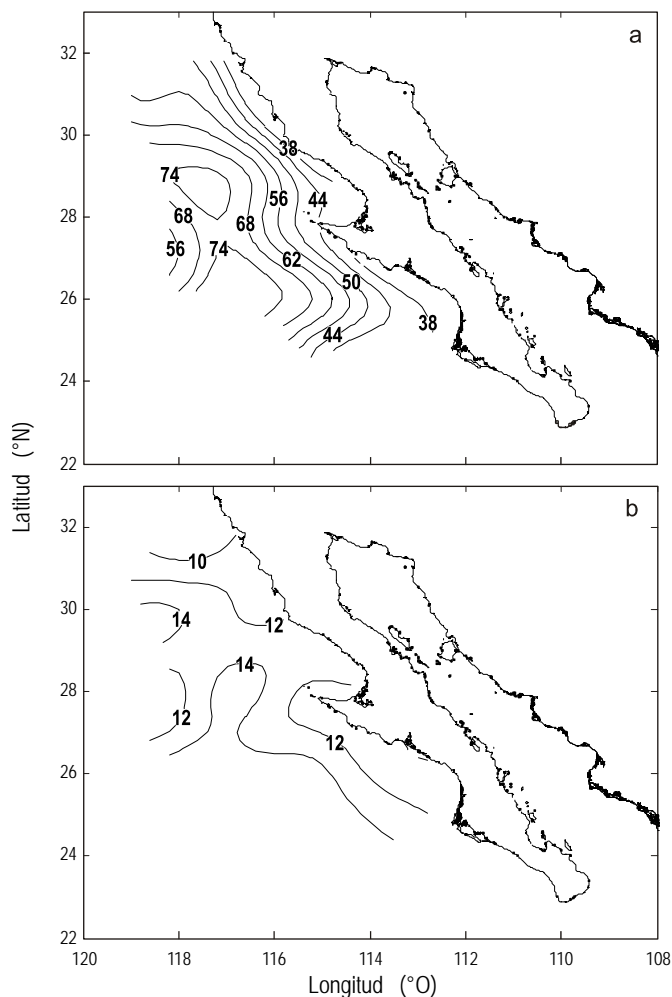


Figura 2. Profundidad (m) de la superficie de $25\sigma_\theta$: (a) promedio y (b) desviación estándar.
Figure 2. Depth (m) of the $25\sigma_\theta$ surface: (a) mean and (b) standard deviation.

Chereskin y Trunnell (1996), con datos de altura dinámica obtenidos de los datos hidrográficos de CalCOFI, obtuvieron para el sur de California una $L_x = 120$ km y una $L_y = 130$ km. Las discrepancias entre las escalas de Chereskin y Trunnell (1996) y las escalas obtenidas en este trabajo se pueden explicar con base en la intensidad de los fenómenos de mesoescala, como remolinos y meandros, que influyen en la varianza de los campos en cada región. También debe tenerse en consideración que CalCOFI e IMECOCAL tienen bases de datos de calidad diferente.

El campo de profundidad media es consistente con un flujo hacia el sur (Corriente de California). Mediante un modelo baroclínico sencillo de dos capas en balance geostrófico (Pedlosky 1983), en el que si tomamos la latitud 28°N , una distancia media de 70 km en la dirección perpendicular a la costa, un espesor de la primera capa de 12 m, y suponemos una densidad de la segunda capa de 1026 kg m^{-3} y una de 1025 kg m^{-3} de la primera (que es la correspondiente a la isopícnica que estamos

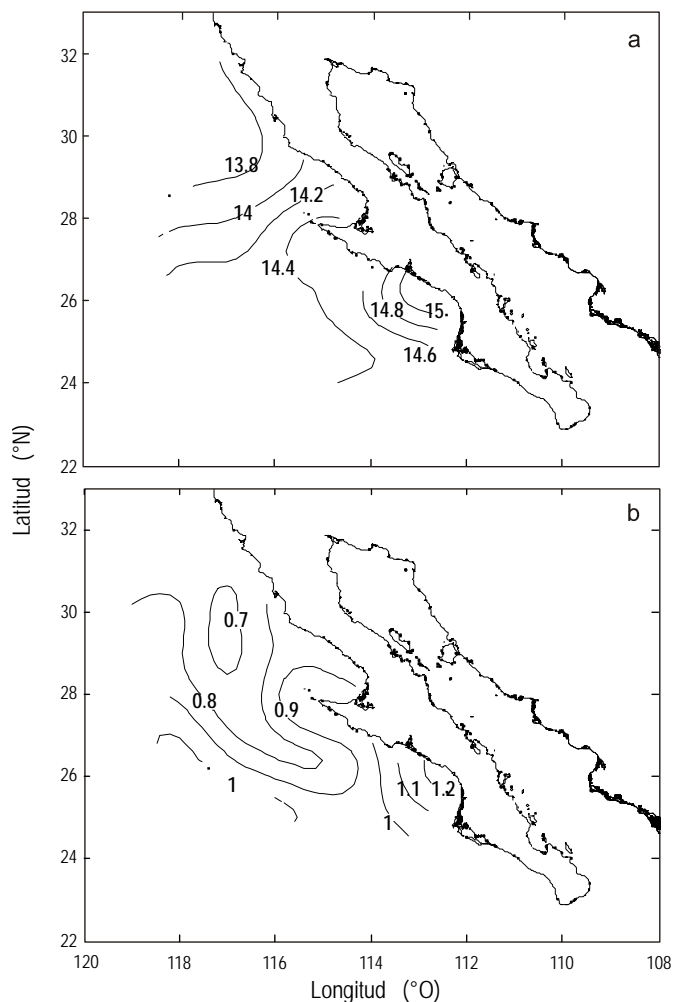


Figura 3. Temperatura potencial ($^\circ\text{C}$) de la superficie de $25\sigma_\theta$: (a) promedio y (b) desviación estándar.
Figure 3. Potential temperature ($^\circ\text{C}$) of the $25\sigma_\theta$ surface: (a) mean and (b) standard deviation.

Eugenia and high (33.7) to the south. Maximum salinity (33.8) occurred off Francisco de Ulloa Bay. The salinity variability distribution was also zonal, with low values (0.2) to the north of Point Eugenia and higher (0.3) to the south.

Discussion

The variations of potential temperature and salinity along the $25\sigma_\theta$ isopycnal surface were studied in the ocean off Baja California. An interpolator was constructed by applying the technique of objective analysis to the CTD data from the IMECOCAL program. Given the anisotropy in the geometry of the IMECOCAL grid observations, objective analysis proved to be a good option for the interpolation of the fields. Based on the correlation scales found ($L_x = 90$ km, perpendicular to the coast, and $L_y = 110$ km, parallel to the coast), the interpolator obtained by objective analysis was optimum (in regard to minimum variance) for the scalar fields of the study area. The

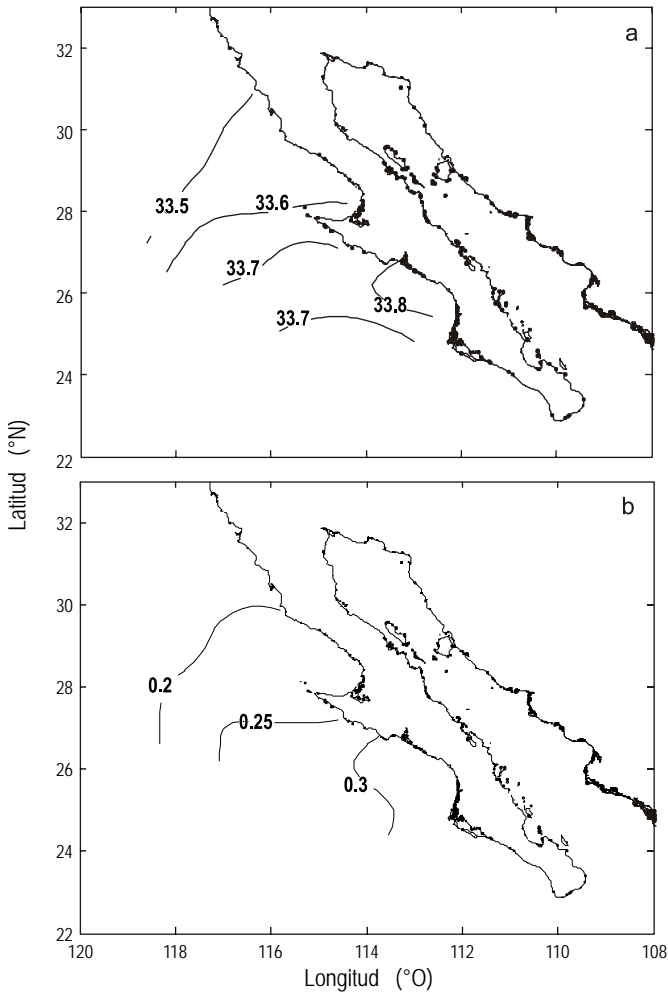


Figura 4. Salinidad de la superficie de 25σ_θ: (a) promedio y (b) desviación estándar.

Figure 4. Salinity of the 25σ_θ surface: (a) mean and (b) standard deviation.

analizando), la velocidad resultante es de $v = -5.8 \text{ cm s}^{-1}$, que resulta consistente con lo reportado en la literatura para la región de estudio (Lynn y Simpson 1987). Por otra parte, se calculó el campo geostrofico medio a 10 db relativo a 1000 db (información no mostrada), y se encontró que las distribuciones de ambos campos son similares. Así, el modelo de capas en balance geostrofico y el método geostrofico indican que los resultados de la profundidad de la superficie de 25σ_θ son confiables.

Las depresiones y meandros que se localizan fuera de la costa en el campo de profundidad media son consistentes con lo reportado en el muy citado trabajo de Lynn y Simpson (1987). Ellos calcularon el promedio y la desviación estándar de la altura dinámica (cm din) de 23 años de datos del programa CalCOFI. En la figura 4(d) de su artículo se localizan dos zonas de alta variabilidad de altura dinámica frente a Baja California, mismas que corresponden a la ubicación de las depresiones aquí documentadas.

validity of the interpolator was analyzed by the Monte Carlo method. Chereskin and Trunnell (1996), using CalCOFI hydrographic dynamic height data, obtained $L_x = 120 \text{ km}$ and $L_y = 130 \text{ km}$ for southern California. One explanation for the discrepancies between Chereskin and Trunnell's (1996) scales and those found in this study could be the intensity of the mesoscale phenomena, such as eddies and meanders, which influence the variance of the fields in each region. It should also be noted that the quality of the CalCOFI and IMECOCAL databases differs.

The mean depth field is consistent with a southward flow (California Current). Based on a simple two-layer baroclinic model in geostrophic balance (Pedlosky 1983), if we take a latitude of 28°N, a mean distance of 70 km in a perpendicular direction to shore and a thickness of the first layer of 12 m, and if we assume a density of 1026 kg m⁻³ for the second layer and of 1025 kg m⁻³ for the first (which corresponds to the isopycnal under study), the resulting velocity is $v = -5.8 \text{ cm s}^{-1}$; this coincides with that reported in the literature for the region under study (Lynn and Simpson 1987). Moreover, the mean geostrophic field was calculated at 10 db relative to 1000 db (information not shown), and the distribution of both fields was found to be similar. Thus, the model of layers in geostrophic balance and the geostrophic method indicate that the results obtained for the depth of the 25σ_θ surface are reliable.

The depressions and meanders located offshore in the mean depth field are consistent with that reported in the highly cited work of Lynn and Simpson (1987). These authors calculated the mean and standard deviation of dynamic height (cm din) of 23 years of CalCOFI data. Figure 4(d) of their article shows two high variability zones of dynamic height off Baja California, and these correspond to the location of the depressions reported herein.

The spatial variability of the mean thermodynamic fields of the 25σ_θ surface reveals three areas off Baja California. Minimum variability in depth, potential temperature and salinity occurs in the northern area (29–31°N) because of the strong influence of the California Current. In the southern area (25–27.5°N), near the coast, the variability in potential temperature and salinity is high, in this case because of the influence of the countercurrents. In the middle of these two areas, the variability in depth is higher, while those of potential temperature and salinity correspond to their averages owing to the competition between these two influences and to the occurrence of eddies. Espinosa-Carreón *et al.* (2004) and Soto-Mardones *et al.* (2004) reported cyclonic eddies to the west of Point Eugenia.

To obtain further elements supporting the presence of three different areas depending on the degree of variability of the thermodynamic fields, we calculated the mean and standard deviation of all the IMECOCAL CTD data for lines 107 (northern area), 120 (central area) and 130 (southern area). The standard deviation of the vertical profiles from 0 to 800 m of the three lines are shown in figure 5. In the northern area, the

La variabilidad espacial de los campos termodinámicos medios de la superficie de $25\sigma_\theta$ revela que frente a Baja California se distinguen tres zonas. En la zona norte ($29\text{--}31^\circ\text{N}$) ocurre el mínimo de variabilidad en H , θ y S , porque el dominio de la Corriente de California es muy fuerte. En la zona sur ($25\text{--}27.5^\circ\text{N}$), cerca de la costa, la variabilidad es alta en θ y S , en este caso por el dominio de las contracorrientes. En medio de estas dos zonas, la variabilidad es más alta en H y corresponde al promedio en θ y S por la competencia entre estas dos influencias y por la existencia de remolinos. Espinosa-Carreón *et al.* (2004) y Soto-Mardones *et al.* (2004) reportan remolinos ciclónicos al oeste de Punta Eugenia.

Para aportar más elementos sobre la presencia de tres zonas distintas según el grado de variabilidad de los campos termodinámicos, nosotros calculamos el promedio y la desviación estándar de todos los datos de CTD del programa IMECOCAL de las líneas 107 (zona norte), 120 (zona central) y 130 (zona sur). La figura 5 muestra la desviación estándar de los perfiles verticales de 0 a 800 m de las tres líneas. En la zona norte la variabilidad de la salinidad muestra dos picos. El pico superficial está asociado a la variabilidad de la Corriente de California y el subsuperficial a la de las contracorrientes. En la zona central la variabilidad de la densidad potencial muestra dos máximos locales, uno asociado a la variabilidad de la temperatura y el otro a la variabilidad de la salinidad. En esta zona la variabilidad de las aguas subsuperficiales es la más alta de las tres zonas. En la zona sur el máximo de variabilidad de la salinidad es más profundo, en comparación con la ubicación de los máximos de las otras dos zonas.

Los campos medios de temperatura potencial y de salinidad indican que frente a Punta Eugenia se encuentra la zona de confluencia de la masa de agua del norte, fría y poco salada, y la del sur, cálida y salada, lo que implica que ahí puede desarrollarse una estructura frontal. Siguiendo a McDougall (1984), si tomamos una parcela de agua de origen subártico con salinidad de 33.4 y temperatura potencial de 13.5°C , y una parcela de agua de origen ecuatorial con salinidad de 33.9 y temperatura potencial de 15.9°C , y suponemos que se mezclan en la superficie de $25\sigma_\theta$, se generará una inestabilidad debido a la no linealidad de la ecuación de estado, y la parcela resultante será más densa que las parcelas originales y tenderá a hundirse.

Por otra parte, las lengüetas de temperatura y salinidad que se forman frente a la Bahía Francisco de Ulloa se pueden tomar como señal de la existencia de una Contracorriente Superficial a lo largo de la costa como lo sugieren Lynn y Simpson (1987). Durazo y Baumgartner (2002), por otra parte, documentaron que en El Niño 1997–1998 la contracorriente superficial fue claramente distinguible en toda la región.

De una estimación cualitativa de los gradientes horizontales de los campos medios de θ y H sobre la superficie de $25\sigma_\theta$, resulta que en la zona sur $\nabla H \cdot \nabla \theta < 0$, lo que puede producir una inestabilidad termobárica (McDougall 1984) tal, que si se mezclan dos parcelas de agua sobre la superficie de $25\sigma_\theta$, la parcela resultante se moverá hacia la superficie del océano. En cambio en la zona norte $\nabla H \cdot \nabla \theta \sim 0$, lo que indica que la

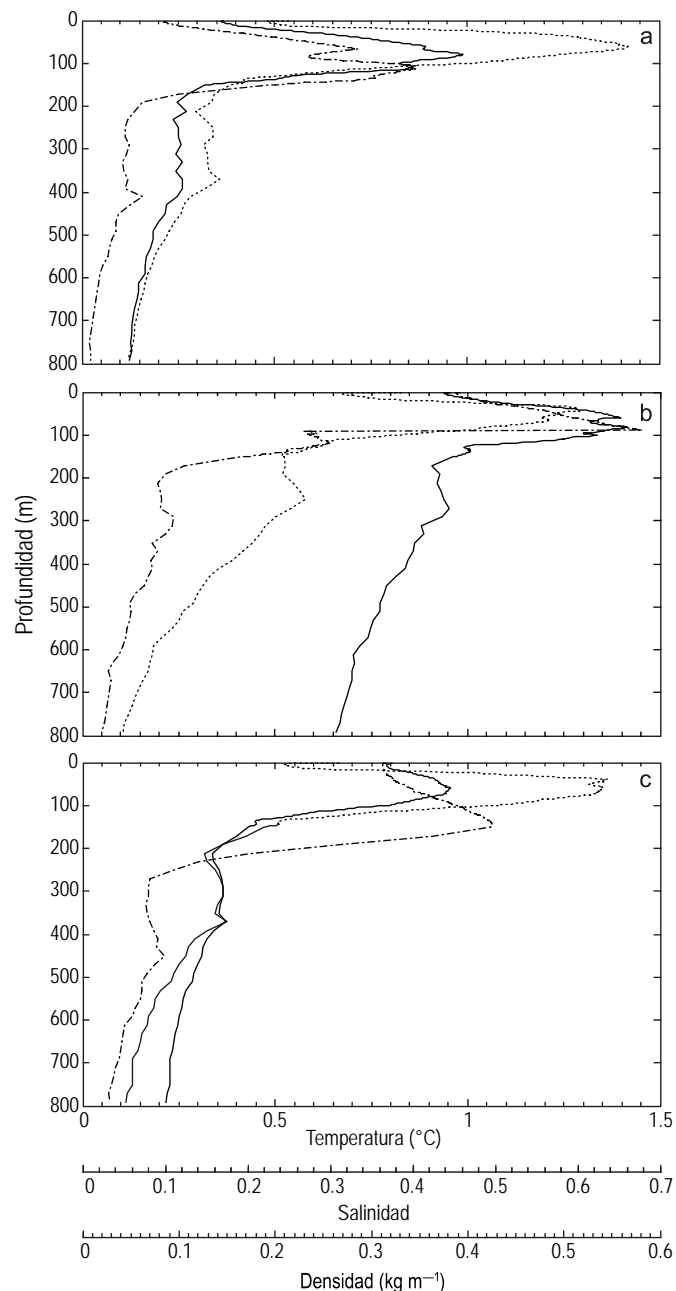


Figura 5. Desviación estándar de los perfiles verticales de densidad (kg m^{-3}) (línea continua), temperatura ($^\circ\text{C}$) (línea punteada) y salinidad (línea punto y guión), desde la superficie hasta 800 m, de las líneas hidrográficas 107 (a), 120 (b) y 130 (c).

Figure 5. Standard deviation of the vertical profiles of density (kg m^{-3}) (continuous line), temperature ($^\circ\text{C}$) (dotted line) and salinity (dashed line), from the surface to 800 m, of hydrographic lines 107 (a), 120 (b) and 130 (c).

variability in salinity indicates two peaks. The surface peak is associated with the variability of the California Current and the subsurface peak with that of the countercurrents. In the central area the variability in potential density shows two local maxima, one related to the variability in temperature and the other to the variability in salinity; variability of subsurface

parcela es estable. La estimación de los gradientes de los campos medios de temperatura potencial y salinidad indican que en la zona norte y en la zona sur, los gradientes de temperatura y salinidad son perpendiculares a la costa, mientras que en la zona central dichos gradientes son paralelos a la costa. En toda la región IMECOCAL, los gradientes de temperatura y salinidad son aproximadamente paralelos entre sí, lo que indica que la mezcla de masas de agua en la superficie de $25\sigma_\theta$ genera procesos termohalinos alineados a los gradientes.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto CONACYT SEP-2003-CO2-42569 y por el CICESE. J García-Córdova hizo el procesamiento de los datos de CTD. El primer autor recibió una beca de postgrado del CONACYT para realizar sus estudios de doctorado en el Departamento de Oceanografía Física del CICESE.

Referencias

- Bretherton FP, Davis RE, Fandry CB. 1976. A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73. *Deep Sea Res.* 23: 559–582.
- Chereskin TK, Trunnell M. 1996. Correlation scales, objective mapping, and absolute geostrophic flow in the California Current. *J. Geophys. Res.* 101: 22619–22629.
- Cressie AC. 1993. *Statistics for Spatial Data*. Wiley & Sons, New York, 900 pp.
- Davis RE. 1985. Objective mapping by least squares fitting. *J. Geophys. Res.* 90: 4773–4777.
- Dufour JM. 2005. Monte Carlo tests with nuisance parameters: A general approach to finite-sample inference and non-standard asymptotic. *Scientific Series*, Montreal. CIRANO, 37 pp.
- Durazo R, Baumgartner T. 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997–1999. *Prog. Oceanogr.* 54: 7–31.
- Espinosa-Carreón TL, Strub PT, Beier E, Ocampo-Torres F, Gaxiola-Castro G. 2004. Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California. *J. Geophys. Res.* 109(C3): C03039.
- García-Córdova J, Robles-Pacheco JM, Gómez-Valdés J. 2005. Informe de datos de CTD. Campaña IMECOCAL 0504/05. B/O *Francisco de Ulloa*. Abril 14–mayo 5 de 2005. Informe Técnico, Departamento de Oceanografía Física, CICESE, 119 pp.
- Gómez-Valdés J. 1984. 1983. Estructura hidrográfica promedio frente a Baja California Norte. *Cienc. Mar.* 9: 75–86.
- Jerónimo G, Gómez-Valdés J. 2003. Seasonal mixed layer depth changes in the southern region part of the California Current. *EOS Trans. Am. Geophys. Union* 84(52): OS151.
- Le Traon PY. 1990. A method for optimal analysis of fields with spatially variable mean. *J. Geophys. Res.* 95: 13543–13547.
- Lynn RJ, Simpson JJ. 1987. The California Current system: The seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.* 92: 12947–12966.
- McDougall TJ. 1984. The relative roles of diapycnal and isopycnal mixing on subsurface water-mass conversions. *J. Phys. Oceanogr.* 14: 1577–1589.
- Montgomery RB. 1938. Circulation in upper layers of southern North Atlantic deduced with use of isentropic analysis. *Cambridge and Woods Hole, Massachusetts*, 57 pp.

water is greatest in this area of the three. In the southern area, the maximum variability in salinity occurs at a greater depth than in the other two areas.

The mean potential temperature and salinity fields indicate a convergence zone off Point Eugenia, where the warm, salty southern water mass and the cold, less salty northern water mass meet. This means that a frontal structure can develop there. Following McDougall (1984), if we take a subarctic water parcel having a salinity of 33.4 and potential temperature of 13.5°C and an equatorial water parcel having a salinity of 33.9 and potential temperature of 15.9°C, and if we assume that they mix on the $25\sigma_\theta$ surface, instability would occur owing to the nonlinearity of the equation of state and the resulting parcel would be denser than the original ones and would tend to sink.

The temperature and salinity plumes that form off Francisco de Ulloa Bay can be taken as a signal of the presence of a surface countercurrent along the coast, as has been suggested by Lynn and Simpson (1987). Durazo and Baumgartner (2002) reported that a surface countercurrent was clearly visible throughout the region during the 1997–1998 El Niño event.

A qualitative estimation of the horizontal gradients of the mean potential temperature (θ) and depth (H) fields along the $25\sigma_\theta$ surface shows that in the southern area, $\nabla H \cdot \nabla \theta < 0$. This can produce thermobaric instability (McDougall 1984), and if two water parcels mix over the $25\sigma_\theta$ surface the resulting parcel would move towards the ocean surface. In the northern area, however, $\nabla H \cdot \nabla \theta \sim 0$, which indicates that the parcel is stable. Estimates of the gradients of the mean potential temperature and salinity fields indicate that they are perpendicular to shore in the northern and southern areas, whereas in the central area they are parallel to the coastline. Throughout the IMECOCAL region, the temperature and salinity gradients are approximately parallel to each other, indicating that the mixing of water masses along the $25\sigma_\theta$ surface generates thermohaline processes aligned to the gradients.

Acknowledgements

This study was financed by CONACYT (SEP-2003-CO2-42569) and CICESE. The CTD data were processed by J García-Córdova. The first author acknowledges the receipt of a postgraduate scholarship from CONACYT.

English translation by Christine Harris.

- Pedlosky J. 1983. *Geophysical Fluid Dynamics*. Springer-Verlag, New York, 703 pp.
- Reid JL. 1973. *Northeast Pacific Ocean waters in winter*. Johns Hopkins Oceanography Studies, No. 5, 96 pp.
- Schmitt RW. 1990. On the density ratio balance in the central water. *J. Phys. Oceanogr.* 20: 900–906.
- Soto-Mardones L, Parés-Sierra A, García J, Durazo R, Hormazabal S. 2004. Analysis of the mesoscale structure in the IMECOCAL

- region (off Baja California) from hydrographic, ADCP and altimetry data. *Deep-Sea Res.* 51: 785–798.
- Talley LD. 1985. Ventilation of the subtropical North Pacific: The shallow salinity minimum. *J. Phys. Oceanogr.* 15: 633–649.
- Tinoco-Ruiz G. 1997. Funcionales discretos en la generación de mallas suaves y convexas sobre regiones planas irregulares. Tesis de doctorado, Centro de Investigación en Matemáticas AC, 136 pp.
- Von Storch H. 1997. Conditional Statistics Models: A discourse about the local scale in climate simulations. Proc. 9th 'Aha Huliko'a Hawaiian Winter Workshop.
- You Y, McDougall TJ. 1990. Neutral surfaces and potential vorticity in the world's oceans. *J. Geophys. Res.* 95: 13235–13261.

*Recibido en marzo de 2006;
aceptado en octubre de 2006.*