

HIDROGRAFIA Y ESTIMACION DE CORRIENTES DE DENSIDAD EN EL SUR DE LA BAHIA DE CAMPECHE, MEXICO

HYDROGRAPHY AND ESTIMATION OF DENSITY CURRENTS IN THE SOUTHERN PART OF THE BAY OF CAMPECHE, MEXICO

María Adela Monreal Gómez
David Alberto Salas de León
Alma Rosa Padilla Pilotze
Miguel Angel Alatorre Mendieta

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Exterior, Ciudad Universitaria
México, D.F., 04510, México

Recibido en octubre de 1991; aceptado en marzo de 1992

RESUMEN

En otoño de 1987 se efectuó un muestreo multidisciplinario en la parte sur de la Bahía de Campeche. En este trabajo se muestran las distribuciones de temperatura, salinidad y $\sigma-t$ en la superficie, a 10 y 30 m de profundidad, así como la distribución de densidad a lo largo de dos secciones transversales que se intersecan frente al sistema fluvial más importante de la región. Con base en el patrón de densidad se estimó tanto la estratificación vertical mediante la anomalía de energía potencial como la velocidad inducida por el gradiente de densidad. Se observa la presencia de un fuerte gradiente halino que domina la distribución de $\sigma-t$, el cual está asociado con la descarga de los ríos en la región. La máxima anomalía de energía potencial calculada se presentó cerca a la desembocadura del sistema Grijalva-Usumacinta y de los ríos San Pedro y San Pablo, teniendo un valor de 70 J m^{-3} . La corriente superficial inducida por el gradiente de densidad fue estimada en 11.2 cm s^{-1} con dirección noreste. Por otro lado, la distribución de las isohalinas e isopicnas en la superficie y a 10 m de profundidad presenta una cierta simetría con respecto a un eje perpendicular a la costa, el cual se encuentra desplazado hacia el oeste de la desembocadura del sistema Grijalva-Usumacinta; dicho corrimiento refleja la posible existencia de una corriente litoral en sentido este-oeste.

Palabras claves: Bahía de Campeche, corrientes de densidad, frentes.

ABSTRACT

This paper reports the temperature, salinity and $\sigma-t$ distributions at the surface, 10 and 30 m depth, derived from data obtained in the autumn of 1987 in the southern part of the Bay of Campeche, as well as the density distribution along two cross sections which intersect near the most important river system in the region. Based on density field data, density driven currents and the vertical stratification were estimated, the latter by means of the potential energy anomaly. A strong haline gradient, that dominates the $\sigma-t$ distribution and is associated with the discharge of the rivers in the region, was observed. The calculated potential energy anomaly had a maximum value of 70 J m^{-3} near the mouth of the Grijalva-Usumacinta system and the San Pedro and San Pablo rivers. The surface current induced by the density gradient was estimated at 11.2 cm s^{-1} northeastward. On the other hand, the distribution of isohalines and

isopycnals at the surface and 10 m depth showed certain symmetry with respect to a normal axis to the coast. This axis was displaced towards the west of the mouth of the Grijalva-Usumacinta system, suggesting the existence of a littoral current in the east-west direction.

Key words: Bay of Campeche, density currents, fronts.

INTRODUCCION

La existencia y relevancia de la zona frontal superficial cerca de la desembocadura del sistema Grijalva-Usumacinta han sido mostradas por Czitrom *et al.* (1986) mediante un análisis de datos de tres campañas oceanográficas, en el cual describen el campo termohalino para diferentes épocas. Dichos autores atribuyen la existencia del frente halino observado en abril de 1984 a la descarga de los ríos de la zona. Por otra parte, como resultado de un análisis de datos de temperatura y salinidad de fondo, en la misma zona en época de secas, Cruz-Abrego (1991) muestra la presencia de un frente bentónico, el cual comparado con el frente superficial se encuentra confinado en una zona más próxima a la desembocadura del sistema de ríos.

Existen diversos criterios numéricos para detectar los frentes halinos, tales como que el valor mínimo del gradiente de salinidad sea 0.1 ppm km^{-1} (Bowman y Esaías, 1978). Fedorov (1986) menciona que en los frentes los valores típicos del gradiente halino se encuentran en el rango de

$$0.1 \leq \frac{\partial S}{\partial x} \leq 10 \text{ ppm km}^{-1}$$

En el presente estudio se muestra el resultado del análisis de datos obtenidos durante la campaña oceanográfica OGMEX-III realizada a bordo del B/O *Justo Sierra*, del 27 de noviembre al 6 de diciembre de 1987.

DATOS

En esta campaña se efectuaron un total de 80 estaciones hidrográficas en la porción sur de la Bahía de Campeche, usando un CTD Neil Brown Mark-IIIB para la obtención de conductividad, temperatura y presión. En la Figura 1 se muestra el área de estudio, las isobatas de 30, 60 y 90 m, la localización de las estaciones hidrográficas y las secciones transversales A y B sobre las cuales fue analizada la distribución de densidad.

INTRODUCTION

The existence and relevance of a surface frontal zone, in the vicinity of the mouth of the Grijalva-Usumacinta river system, have been pointed out by Czitrom *et al.* (1986) who analyzed observational data derived from three oceanographic cruises. These authors described the thermohaline structure for different seasons and attributed the existence of the haline front observed in April 1984 to the river discharge in the zone. Cruz-Abrego (1991) analyzed bottom temperature and salinity in the same study area and reported a benthonic front during the dry season, which is located closer to the mouth of the rivers than the surface frontal zone.

Several numerical criteria might be used to detect haline fronts, such as the minimum value of the horizontal salinity gradient, which may be 0.1 ppt km^{-1} (Bowman and Esaías, 1978). Fedorov (1986) showed that in the frontal zone, typical values of the haline gradient are between

This study reports the results of the analysis of the data obtained during the oceanographic cruise OGMEX-III, conducted on board the R/V *Justo Sierra* from November 27 to December 6, 1987.

DATA

Eighty hydrographic stations were made in the southern part of the Bay of Campeche, using a CTD Neil Brown Mark-IIIB to obtain measurements of conductivity, temperature and pressure. Figure 1 shows the study area, the 30, 60 and 90-m isobaths, the position of the hydrographic sampling stations, and the cross sections A and B along which density distribution was analyzed.

La distribución vertical de los parámetros hidrográficos cerca de la desembocadura del sistema Grijalva-Usumacinta fue analizada en la estación 56 donde se intersecan las secciones transversales A y B (Fig. 1).

OBSERVACIONES

Los perfiles de salinidad y sigma-t en la estación 56 muestran una marcada covariación de los dos parámetros, con intervalos de 32.25 a 36.30 ppm y de 21.10 a 24.12 kg m⁻³ respectivamente (Fig. 2). La temperatura, por otra parte, es muy uniforme (25.75 ± 0.10°C) en toda la columna de agua. Tanto la salinidad como sigma-t presentan fuertes gradientes verticales cerca de la superficie y en la capa entre 10 y 15 m de profundidad con una gran homogeneidad en la capa del fondo.

La distribución de temperatura, salinidad y sigma-t, en la superficie, y a 10 y 30 m de profundidad, es mostrada en las Figuras 3 a 5.

En la superficie y a 10 m de profundidad la temperatura se presenta muy uniforme (Figs. 3 y 4), con un intervalo entre 25.25 y 25.75°C y distribuciones horizontales muy similares en los dos niveles. A 30 m de profundidad este parámetro muestra un intervalo de 25.00 a 25.75°C (Fig. 5), el cual es mayor que el observado en los dos niveles superiores.

La Figura 3 muestra las isohalinas en la superficie, las cuales presentan una distribución semicircular con centro en el sistema Grijalva-Usumacinta y valores que van de 33.25 a 37.00 ppm, así como un fuerte gradiente horizontal cercano a la desembocadura de dicho sistema y a los ríos San Pedro y San Pablo. Esta situación es muy similar a la observada en la distribución de sigma-t, en la cual se presentan valores que van de 21.75 a 24.75 kg m⁻³. En la zona cercana a los ríos, 42 km sobre la línea perpendicular a la costa, la salinidad y sigma-t sufren cambios de 2.5 ppm y 2.0 kg m⁻³ respectivamente.

Las isohalinas e isopicnas presentan una cierta simetría con respecto a un eje perpendicular a la costa, el cual se encuentra desplazado hacia el oeste de la desembocadura del sistema Grijalva-Usumacinta.

A 10 m de profundidad (Fig. 4), la distribución de salinidad y sigma-t muestran intervalos que van de 34.75 a 37.25 ppm y de 23.00 a 24.75 kg m⁻³ respectivamente, con

The vertical distribution of the hydrographic parameters near the mouth of the Grijalva-Usumacinta system was analyzed at station 56, where cross sections A and B intersect (Fig. 1).

OBSERVATIONS

The salinity and sigma-t profiles at station 56 show a strong covariation, ranging from 32.25 to 36.30 ppt and 21.10 to 24.12 kg m⁻³, respectively (Fig. 2). On the other hand, temperature was very uniform (25.75 ± 0.10°C) along the water column. Salinity and sigma-t show strong vertical gradients near the sea surface and in the layer between 10 and 15 m depth. The bottom layer was homogeneous.

Temperature, salinity and sigma-t horizontal distributions at the surface, 10 and 30 m depth, are shown in Figures 3 to 5.

At the surface and 10 m depth, temperature was very uniform (Figs. 3 and 4) ranging from 25.25 to 25.75°C, with very similar horizontal distribution in both levels. At 30 m depth temperature values ranged from 25.00 to 25.75°C (Fig. 5), a range larger than that observed in the two upper levels.

The isohalines at the surface are presented in Figure 3, showing a semicircular distribution, centered in the Grijalva-Usumacinta system, with values ranging from 33.25 to 37.00 ppt and a strong horizontal gradient near the mouth of these rivers and the San Pedro and San Pablo rivers. A similar pattern for sigma-t distribution is observed, with values from 21.75 to 24.75 kg m⁻³. In the vicinity of the rivers, over a distance of 42 km offshore, salinity and sigma-t present strong changes of 2.5 ppt and 2.0 kg m⁻³, respectively.

The isohalines and isopycnals show certain symmetry with respect to a perpendicular axis to the coast, displaced westward to the mouth of the Grijalva-Usumacinta system.

At 10 m depth (Fig. 4), salinity and sigma-t distribution ranged from 34.75 to 37.25 ppt and 23.00 to 24.75 kg m⁻³, respec-

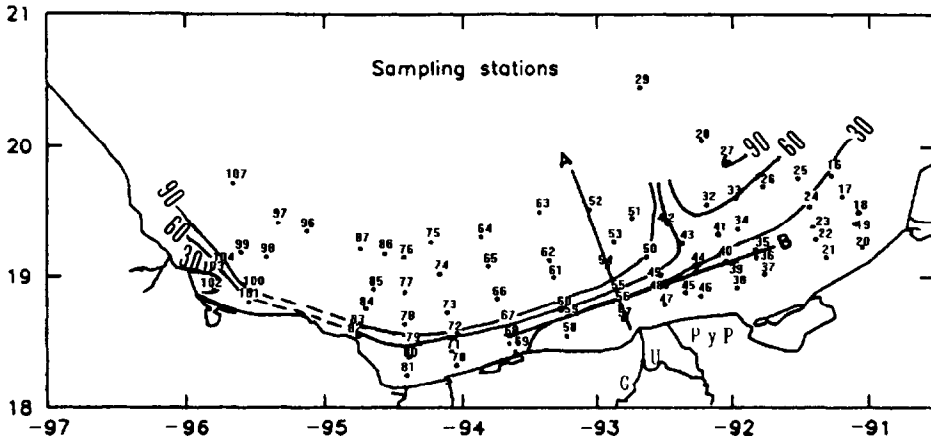


Figura 1. Bahía de Campeche, batimetría y localización de estaciones hidrográficas y secciones A y B.

Figura 1. Bahía de Campeche, batimetría, localización de estaciones hidrográficas y secciones A y B.

configuraciones muy similares de dichos parámetros hidrográficos entre este nivel y los observados en la superficie, no obstante que sus gradientes horizontales son menores a 10 m de profundidad.

En la Figura 5 se muestra el comportamiento de los parámetros hidrográficos a 30 m de profundidad, donde se presenta una distribución muy uniforme en salinidad y sigma-t, con variaciones que van de 36.25 a 36.75 ppm y de 24.00 a 24.50 kg m⁻³, respectivamente.

El análisis de la distribución de las isopícnas a lo largo de las secciones transversales A y B, perpendiculares entre sí, cuya orientación se presenta en la Figura 1, muestra un gradiente superficial de 0.07 kg m⁻³ km⁻¹ entre las estaciones 54 y 55, donde la isopícnica de 23.75 kg m⁻³, frontera con el agua de carácter oceánico (sección A), alcanza una profundidad de 15 m. En la sección B, casi paralela a la costa, se nota la influencia del sistema Grijalva-Usumacinta entre las estaciones 48 y 59, y se observa también la presencia de un núcleo de baja densidad en la estación 56, frente a la desembocadura de los ríos (Fig. 6).

La Figura 7 muestra la distribución de salinidad y densidad en las proximidades del sistema Grijalva-Usumacinta y los ríos San Pedro y San Pablo. Se indican gradientes de salinidad de 0.07 ppm km⁻¹ sobre el eje de

tively. These two hydrographic parameters exhibit very similar patterns at this level and at the sea surface. Nevertheless, the gradient at 10 m depth is smaller than the gradient found at the surface.

Figure 5 shows the hydrographic parameters at 30 m depth, where a very uniform distribution in salinity and sigma-t is observed, with variations from 36.25 to 36.75 ppt and 24.00 to 24.50 kg m⁻³, respectively.

The analysis of the isopycnal distribution along cross sections A and B, which are perpendicular to each other, is shown in Figure 1. They present a surface gradient of 0.07 kg m⁻³ km⁻¹ between hydrographic sampling stations 54 and 55, where the isopycnal of 23.75 kg m⁻³, which is the boundary of the oceanic waters (section A), reaches 15 m depth. In section B, nearly parallel to the coast, the influence of the Grijalva-Usumacinta system is observed at stations 48 and 59 as well as at station 56 near the inlet of the rivers, with the presence of a low density core (Fig. 6).

Figure 7 shows the salinity and density distributions in the vicinity of the Grijalva-Usumacinta system and the San Pedro and San Pablo rivers. Horizontal salinity gradients of 0.07 ppt km⁻¹ can be detected along the

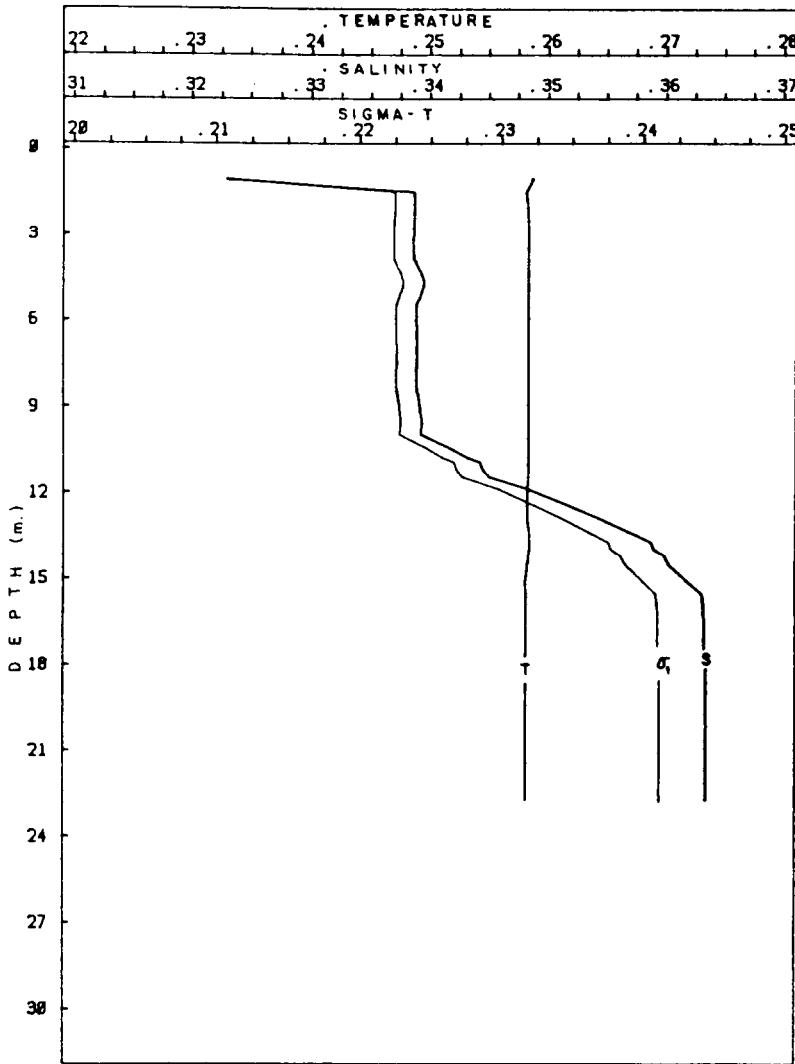


Figura 2. Distribución vertical de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad (ppm) y sigma-t (kg m^{-3}) en la estación 56.

Figure 2. Profiles of temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity (ppt) and sigma-t (kg m^{-3}) at hydrographic station 56.

simetría, en una banda de 26.82 km, y de 0.13 ppm km^{-1} a los lados de dicho eje, en los extremos de las isolíneas en una banda de 10 km. Los gradientes de densidad, relacionados con los de salinidad son de $0.06 \text{ kg m}^{-3} \text{ km}^{-1}$ en la primera zona y de $0.15 \text{ kg m}^{-3} \text{ km}^{-1}$ en los extremos de las isolíneas.

symmetry axis over a distance of 26.82 km and of 0.13 ppt km^{-1} on both sides of this axis, at the ends of the isolines over a distance of 10 km. Horizontal density gradients related to salinity are of $0.06 \text{ kg m}^{-3} \text{ km}^{-1}$ in the first zone and $0.15 \text{ kg m}^{-3} \text{ km}^{-1}$ at the end of the isolines.

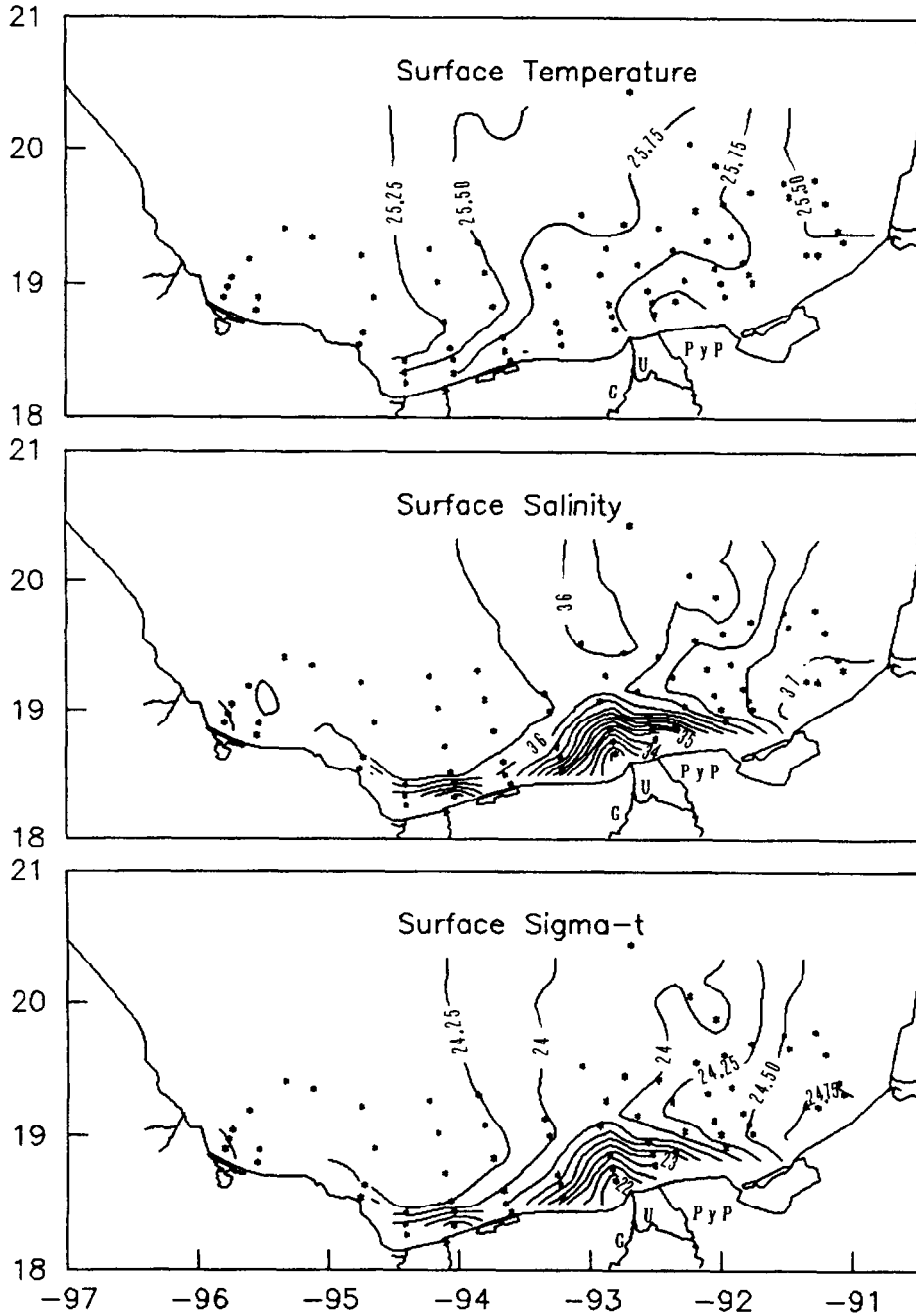


Figura 3. Distribución superficial de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad (ppm) y sigma-t (kg m^{-3}) en la superficie, con intervalo de contorno de 0.25.

Figure 3. Temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity (ppt) and sigma-t (kg m^{-3}) distribution at the ocean surface, with a contour interval of 0.25.

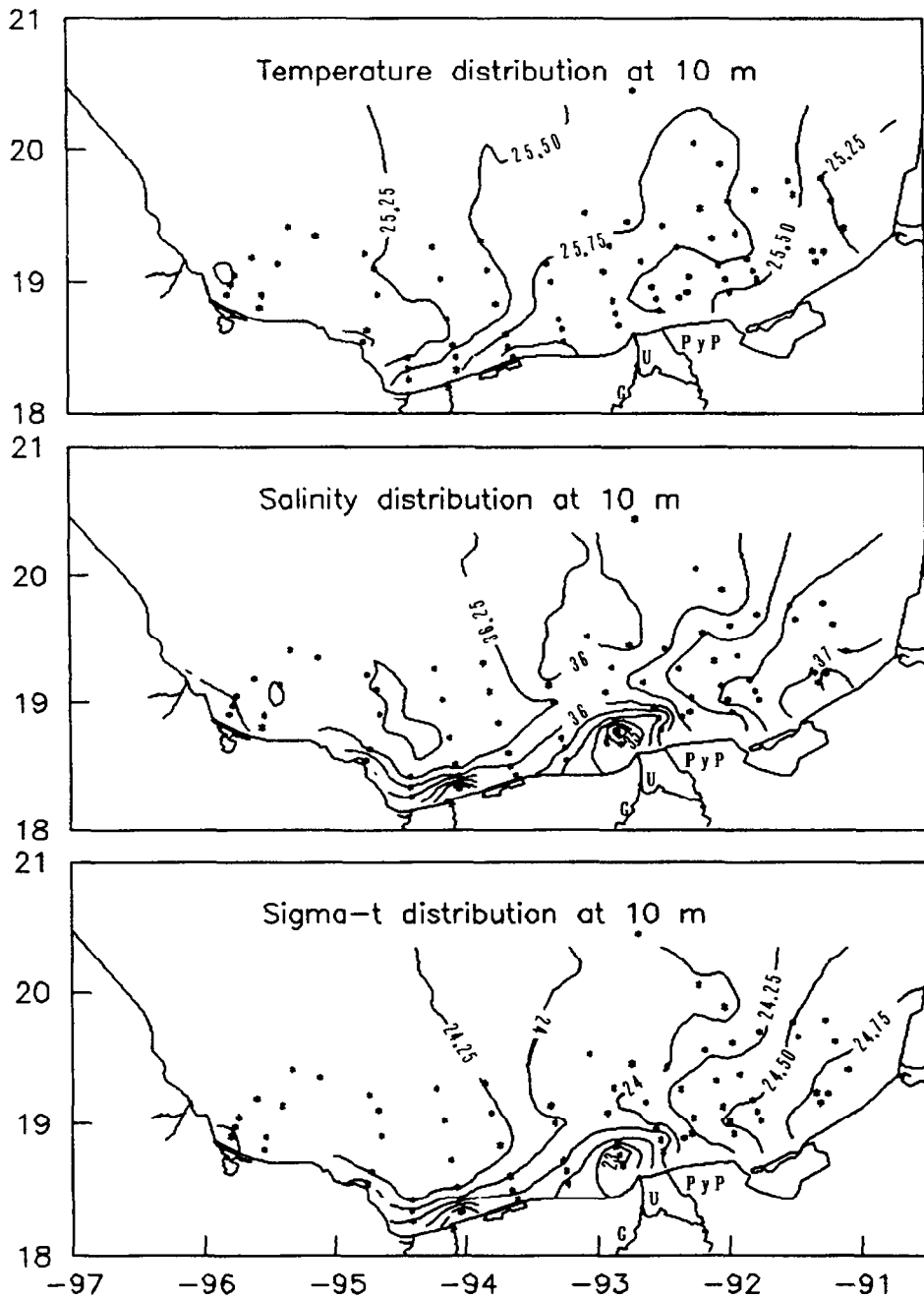


Figura 4. Distribución de temperatura (°C), salinidad (ppt) y sigma-t (kg m⁻³) a 10 m de profundidad, con intervalo de contorno de 0.25.

Figure 4. Temperature (°C), salinity (ppt) and sigma-t (kg m⁻³) distribution at 10 m depth, with a contour interval of 0.25.

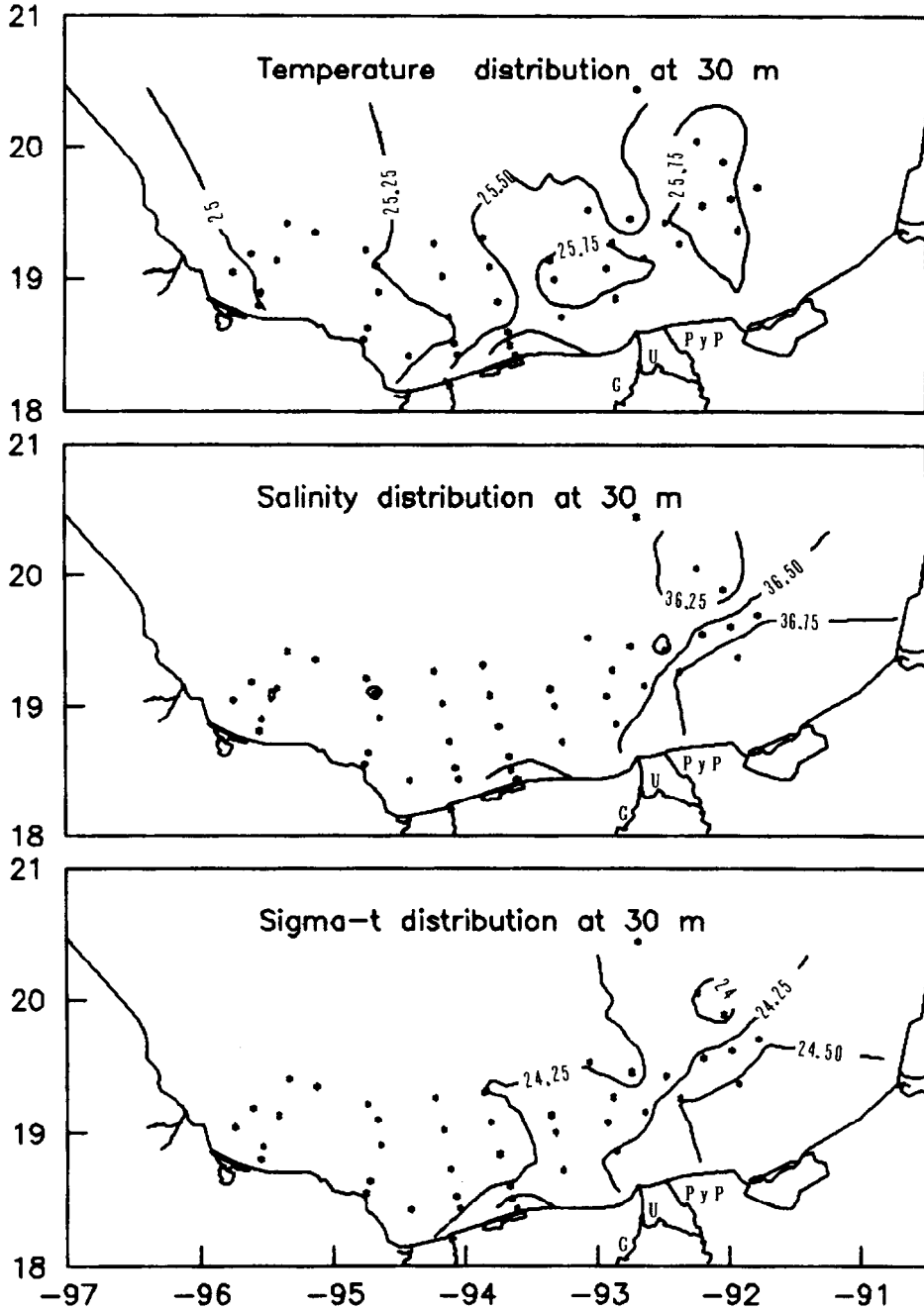


Figura 5. Distribución de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad (ppm) y sigma-t (kg m^{-3}) a 30 m de profundidad, con intervalo de contorno de 0.25.

Figure 5. Temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity (ppt) and sigma-t (kg m^{-3}) distribution at 30 m depth, with a contour interval of 0.25.

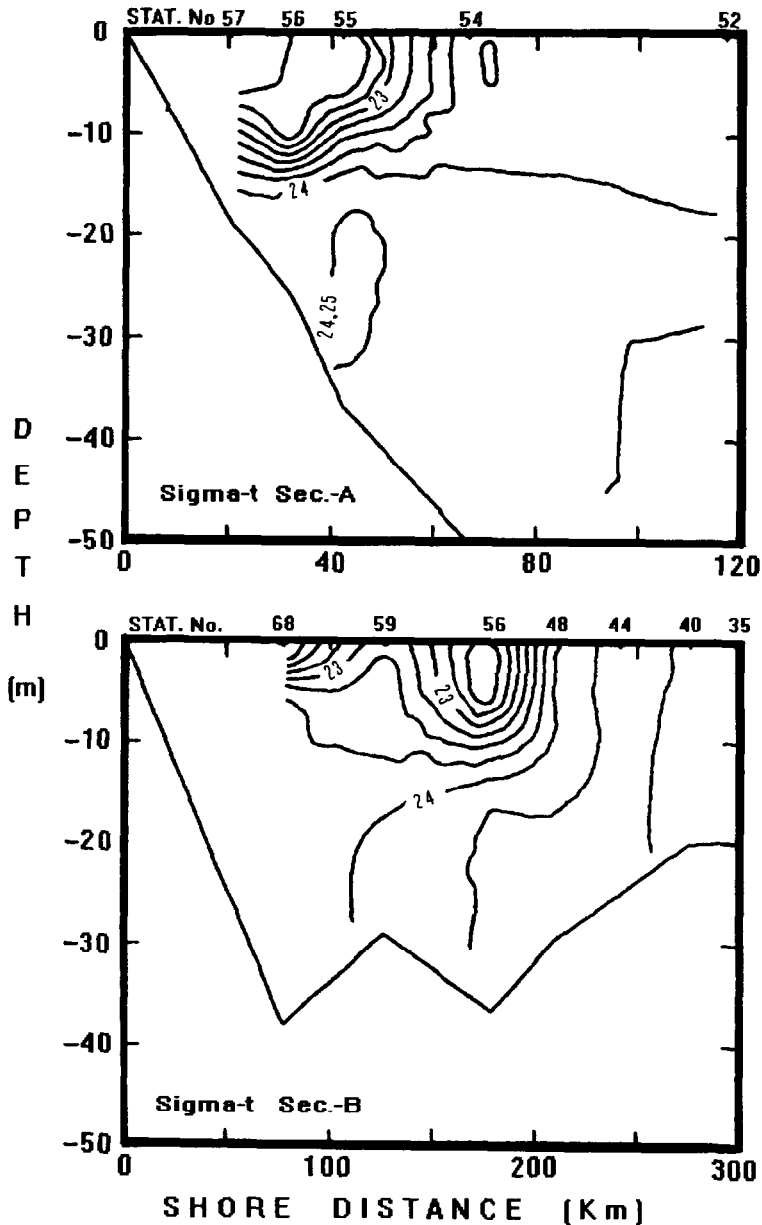


Figura 6. Distribución de densidad (kg m^{-3}) a lo largo de las secciones transversales A y B.
Figure 6. Density distribution (kg m^{-3}) in cross sections A and B.

ESTRATIFICACION

El grado de estratificación de la columna de agua fue estimado mediante el cálculo

STRATIFICATION

The degree of stratification in the water column at any given place was estimated

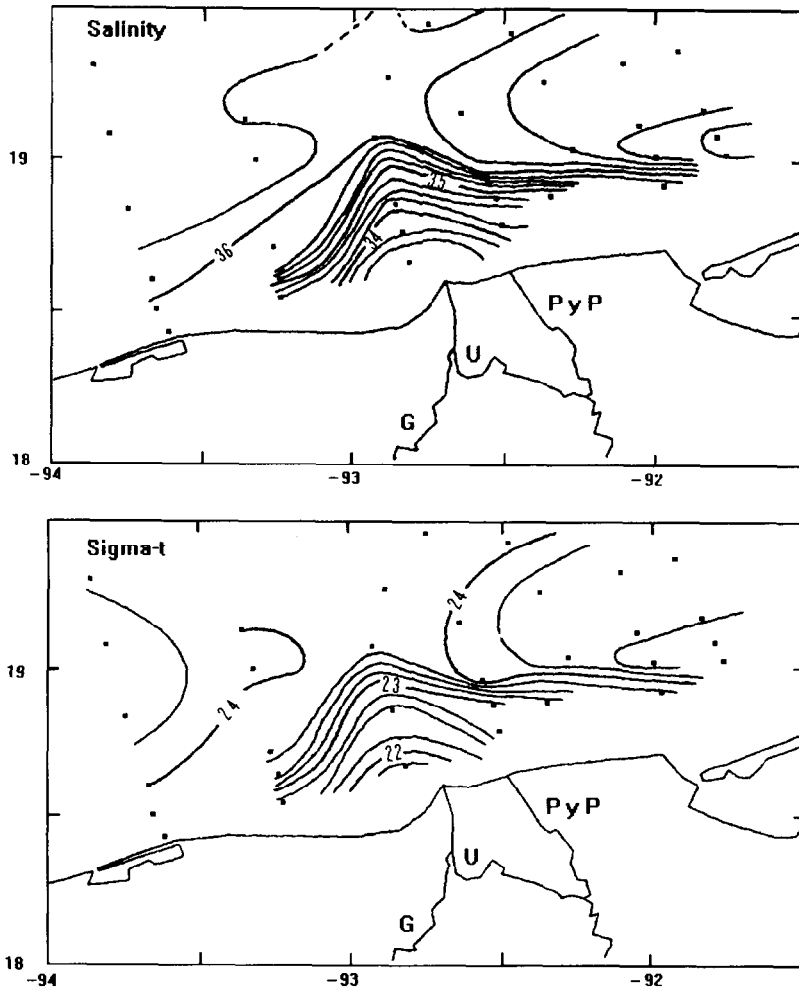


Figura 7. Distribución de salinidad (ppm) y sigma-t (kg m^{-3}) cerca de los ríos Grijalva-Usumacinta, San Pedro y San Pablo.

Figure 7. Distribution of salinity (ppt) and sigma-t (kg m^{-3}) near the Grijalva-Usumacinta, San Pedro and San Pablo rivers.

de anomalía de energía potencial, o parámetro ϕ (Simpson y James, 1986), en la capa superficial de 30 m de espesor. Su valor numérico indica la cantidad de trabajo necesario para mezclar dicha columna de agua, por lo que a valores mayores de ϕ se tendrá mayor estratificación vertical. La Figura 8 muestra la distribución de ϕ , con valores que van de 0 a 70 J m^{-3} , los máximos en las proximidades a la desembocadura del sistema Grijalva-

taking into account the potential energy anomaly, or parameter ϕ (Simpson and James, 1986), in the upper 30 m layer. Its numerical value indicates the amount of work per cubic meter needed to vertically mix the water column, larger values of ϕ denoting greater stratification. Figure 8 shows the ϕ distribution, with values from 0 to 70 J m^{-3} . The highest values were found near the mouth of the Grijalva-Usumacinta system and San

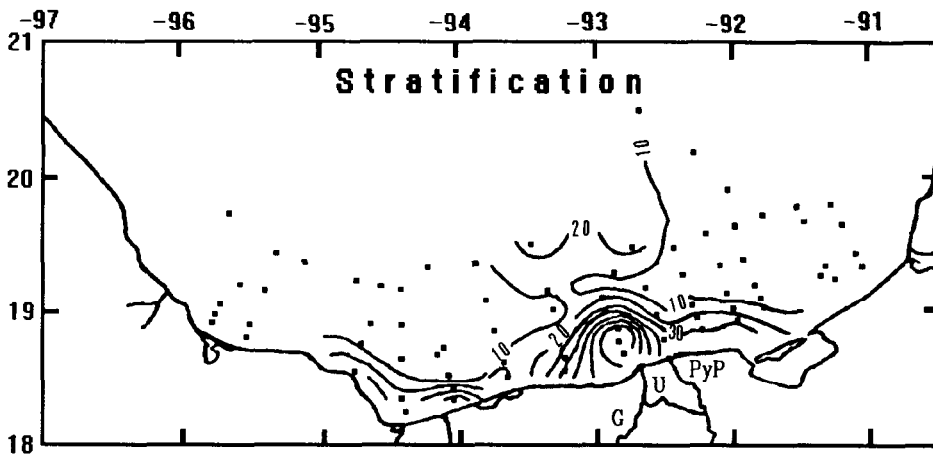


Figura 8. Anomalía de energía potencial ($J m^{-3}$) en la capa superficial de 30 m de espesor.
Figure 8. The potential energy anomaly ($J m^{-3}$) in the surface layer of 30 m thickness.

Usumacinta y los ríos San Pedro-San Pablo; los mínimos en la porción oeste de la zona en estudio.

Pedro and San Pablo rivers, and the lowest in the western part of the study area.

ESTIMACION DE LA CORRIENTE INDUCIDA POR GRADIENTES DE DENSIDAD

La estimación de la corriente de densidad en el sur de la Bahía de Campeche se realizó haciendo uso de las observaciones y aplicando el modelo de Heaps (1972), para dos casos, donde la diferencia radica en que se considere o no la fricción interna.

Las corrientes inducidas por gradientes de densidad en una costa abierta han sido estudiadas, entre otros, por Heaps (1972) y Bowden (1983), quienes consideran que como resultado de una descarga de río en la costa, la densidad se incrementa hacia mar adentro con isopícnas paralelas a la costa. Estos autores suponen además que en alguna región la columna de agua se encuentra bien mezclada. Bowden (1983) analiza el efecto de Coriolis en una costa abierta con desembocadura de río, el cual no forma un estuario bien definido, y sus conclusiones son que en una región como ésta dicho efecto no puede ser ignorado y que la corriente es esencialmente bidimensional. Heaps (1972), con el fin de estudiar las corrientes de densidad, toma en cuenta las fuerzas de gradiente de presión, de Coriolis y

ESTIMATIONS OF GRADIENT DENSITY DRIVEN CURRENTS

The estimation of gradient density currents in the southern part of the Bay of Campeche was obtained using observational data according to the Heaps model (1972) and taking into account two variants, that is whether internal friction is considered or not.

The density driven currents off an open coast have been studied by several authors, including Heaps (1972) and Bowden (1983) who consider that as a result of a river discharge in coastal areas of the ocean, the water density increases in an offshore direction, with isopycnals running parallel to the coast. These authors also assume that the water column is vertically well-mixed at any position. Bowden (1983) analyzed the Coriolis effect in an open coast with an inlet of a river not forming a well-defined estuary, and concluded that in this kind of region, the Coriolis effect cannot be ignored and the horizontal current is essentially two-dimensional. In order to study density driven currents in coastal areas, Heaps (1972) takes into account pressure gradient force, Coriolis force and frictional stress, as

los esfuerzos friccionales, así como la aproximación hidrostática y la ecuación de continuidad. Los ejes coordenados están orientados de la siguiente manera: x y y perpendicular y a lo largo de la costa respectivamente, y el eje vertical z positivo hacia abajo.

En el sur de la Bahía de Campeche la salinidad y densidad aumentan progresivamente de la costa hacia mar adentro (Fig. 7) y existe una región entre las estaciones 54 y 55 donde se presenta cierta homogeneidad vertical y máximo gradiente horizontal de densidad (Fig. 6). Por otra parte, como ya fue señalado, las isopícnas son simétricas respecto al eje x , lo que permite suponer como primera aproximación que, a lo largo de dicho eje, las variaciones respecto a y pueden ser ignoradas

well as the hydrostatic approximation and continuity equation. In a Cartesian coordinate system, the x and y axes are perpendicular to the coast and along the coast respectively, and the z -axis is vertically downward.

In the southern part of the Bay of Campeche, salinity and density increase progressively offshore (Fig. 7) and there is a region between the 54 and 55 hydrographic sampling stations where certain vertical homogeneity and a maximum horizontal density gradient are reached (Fig. 6). On the other hand, as pointed out earlier, the isopycnals have a symmetrical form with respect to the x -axis, which allows the assumption, as a first approach, that along this symmetry axis there are no significant variations, then

$$\left(\frac{\partial}{\partial y} = 0 \right)$$

Lo anterior hace posible obtener una estimación de la corriente en el eje de simetría aplicando el siguiente modelo (e.g. Heaps, 1972):

may be neglected. In fact, it is possible to obtain an estimation of the current along the symmetry axis applying the following model (e.g. Heaps, 1972):

$$fv = g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{gz}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} - N \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$fu = N \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$p = p_a + g\rho(z + \xi) \quad (3)$$

donde u y v son las componentes de la velocidad en dirección x y y respectivamente, g es la aceleración debida a la gravedad, ρ es la densidad, f el parámetro de Coriolis, N es el coeficiente de viscosidad turbulenta vertical, p es la presión, p_a es la presión atmosférica (considerada uniforme dado que la zona de estudio es pequeña), ξ es la elevación de la superficie libre con respecto al nivel sin perturbaciones (considerada muy pequeña comparada con la profundidad total).

La corriente puede ser representada mediante variable compleja ($w = u + iv$), lo

where u and v are velocity components along the x and y axes respectively, g is acceleration due to gravity, ρ the water density, f the Coriolis parameter, N the coefficient of vertical eddy viscosity, p the pressure, p_a the atmospheric pressure (considered uniform due to the small size of the study area), ξ the free surface elevation above its undisturbed level (considered very small in comparison to total depth).

The current can be represented by means of complex variable ($w = u + iv$), al-

que permite reducir las ecuaciones (1) y (2) a una sola ecuación lineal (Bowden, 1983):

$$fw = i \left(g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{gz}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} - N \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

cuya solución puede ser escrita mediante la superposición de tres contribuciones, la corriente de gradiente, la corriente de densidad que varía linealmente con z y una corriente del tipo de Ekman, representadas respectivamente por cada uno de los términos de la ecuación anterior. De esto, es notable que aun cuando no se considere la fricción interna la corriente puede variar con la profundidad y llegar a ser nula en el fondo.

Flujo sin fricción interna

Para el caso más sencillo, donde se ignora la fricción interna y no existe deslizamiento en el fondo, la corriente queda totalmente en términos del gradiente de densidad (Ec. 4). La corriente de densidad a lo largo de la costa está dada por:

$$v = - \frac{g}{\rho f} \frac{\partial \rho}{\partial x} (h - z) \quad (5)$$

En el caso del sur de la Bahía de Campeche, sobre el eje de simetría de las isopícnas, donde la densidad tiene un aumento hacia mar adentro de 2.0 kg m^{-3} en 42 km, con $f = 4.73 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, en un punto donde la profundidad h es de 40 m, la estimación de la velocidad en la superficie resulta de 38 cm s^{-1} en dirección este.

El cálculo de velocidades que se ha presentado en esta sección es una primera aproximación que muestra la existencia de una circulación a lo largo de la costa, la cual disminuye con la profundidad.

Flujo con fricción interna

Una mejor aproximación en la estimación de la velocidad inducida por gradiente de densidad se obtiene al tomar en cuenta la fricción interna, con condiciones de frontera tales que en la superficie libre el esfuerzo

allowing equations (1) and (2) to be reduced to a single linear equation (Bowden, 1983):

The solution of equation (4) can be written by means of a linear combination of three contributions, the gradient current, density current which varies linearly from z and a typical Ekman current, which are represented by each of the terms of the above equation. Even when internal friction is not considered, currents may vary with depth and become null at the bottom.

Frictionless flow

For the simplest case, where internal friction is negligible and there is no slip at the bottom, the current is totally expressed in terms of density gradient (Eq. 4). The density current along the coast is given by:

In the southern part of the Bay of Campeche, on the symmetry axis of the isopycnals, where density increases 2.0 kg m^{-3} over a distance of 42 km in the offshore direction, with $f = 4.73 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ in a given position with 40 m depth, the estimation of surface velocity is 38 cm s^{-1} eastward.

The computed velocities presented in this section are a first approximation and describe the existence of a flow along the coast decreasing linearly with depth.

Flow with internal friction

A better approach for the estimation of currents induced by density gradient is obtained by taking into account the internal friction, with boundary conditions such as that the shear stress is null at free surface, at

cortante es nulo; en $z = h$ el esfuerzo tangencial

$z = h$ there is a linear relation between the tangential stress

$$\left(\vec{\tau} = N \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \right)$$

tiene una relación lineal con la velocidad en el fondo

and the bottom velocity

$$\left(\vec{\tau}_h = -k \rho \vec{v}_h \right)$$

lo que permite escribir

allowing to write

$$N \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_h + k u_h = 0,$$

$$N \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_h + k v_h = 0$$

De la ecuación de continuidad para el caso estacionario donde las variaciones en y son despreciables, se obtiene que el transporte total hacia mar adentro es igual a la razón de descarga de agua dulce por unidad de longitud de línea de costa

From the continuity equation for a steady state case where the derivatives respect to y are negligible, the total transport offshore is obtained as the rate of fresh water discharge per unit length of coastline

$$\left(\int_{-t}^h u \, dz = -q \right)$$

Las ecuaciones de movimiento se resuelven para u y v utilizando estas condiciones de frontera; la solución analítica para este caso más general, donde se considera la fricción interna, está dada por (e.g. Heaps, 1972):

The equations of motion are solved for u and v using these boundary conditions. The analytical solution for this relatively more realistic case, where the internal friction has been taken into account, is given by (e.g. Heaps, 1972):

$$u = \left(\frac{gH}{f} \right) (XQ - YP) \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right) \frac{1}{\rho} + \left(\frac{fq}{kS} \right) (MP - LQ) \quad (6)$$

$$v = \left(\frac{gH}{f} \right) (XP + YQ + A + \eta) \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right) \frac{1}{\rho} + \left(\frac{fq}{kS} \right) (1 - LP - MQ) \quad (7)$$

donde:

$$H = h + \zeta$$

$$\eta = \frac{z + \zeta}{H}$$

$$C = \alpha(\operatorname{sen} h \alpha \cos \alpha - \operatorname{cosh} h \operatorname{sen} \alpha) + b \cos h \alpha \cos \alpha$$

$$E = \alpha(\operatorname{sen} h \alpha \cos \alpha + \operatorname{cosh} h \operatorname{sen} \alpha) + b \operatorname{sen} h \operatorname{sen} \alpha$$

$$L = b \operatorname{cosh} \alpha_2 \cos \alpha_2$$

$$M = b \operatorname{sen} h \alpha_2 \operatorname{sen} \alpha_2$$

$$P = \frac{C}{(C^2 + E^2)}$$

$$Q = \frac{E}{(C^2 + E^2)}$$

$$R = P \operatorname{cosh} \alpha \cos \alpha + Q \operatorname{sen} h \operatorname{sen} \alpha$$

$$S = 1 - Rb$$

$$A = \frac{(R - P - S)}{S}$$

$$\lambda = \frac{1 - bP}{1 - bR}$$

$$X = \operatorname{cosh} \alpha_1 \cos \alpha_1 + \left(\frac{b}{2\alpha}\right) [\operatorname{sen} h \alpha_1 \cos \alpha_1 + \operatorname{cosh} \alpha_1 \operatorname{sen} \alpha_1] - \lambda \operatorname{cosh} \alpha_2 \cos \alpha_2$$

$$Y = \operatorname{sen} h \alpha_1 \operatorname{sen} \alpha_1 + \left(\frac{b}{2\alpha}\right) [\operatorname{cosh} \alpha_1 \operatorname{sen} \alpha_1 - \operatorname{sen} h \alpha_1 \cos \alpha_1] - \lambda \operatorname{sen} h \alpha_2 \operatorname{sen} \alpha_2$$

$$\alpha = \frac{\pi H}{D}$$

$$D = \pi \left(\frac{2N}{f} \right)^{1/2}$$

$$\pi = 3.14159$$

$$\alpha_1 = \alpha(1 - \eta)$$

$$\alpha_2 = \alpha\eta$$

$$b = \frac{kH}{N}$$

En estas ecuaciones, el campo de densidad, la descarga de río por unidad de longitud de línea de costa (q), el coeficiente de fricción en el fondo (k) y el coeficiente de viscosidad turbulenta vertical (N) son cantidades prescritas.

La descarga de los ríos en la zona de estudio, durante la época de muestreo fue en promedio de $3.08 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (CFE, 1987), en una distancia de 27.5 km de línea de costa, lo cual produce un valor de $q = 0.112 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. El coeficiente de fricción en el fondo (k) en la relación lineal ha sido considerado como constante con un valor de $1.4 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$. N se estimó de la relación

In these equations, the density field, the river discharge per unit length of coastline (q), the coefficient of bottom friction (k) and the coefficient of vertical eddy viscosity (N) are quantities prescribed.

In the study region, during the oceanographic survey the average river discharge was $3.08 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (CFE, 1987) over a distance of 27.5 km of coastline, which produces a value of $q = 0.112 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. The coefficient of bottom friction (k) in the linear relation has been considered as constant with a value of $1.4 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$. N was estimated from the relation

$$N = \chi H \vec{U}$$

(Heaps, 1972), donde χ es el coeficiente de fricción en la relación cuadrática con un valor típico de 2×10^{-3} (Ramming y Kowalik, 1980), $H = 40 \text{ m}$ es la profundidad de la columna de agua en el punto donde se evalúa la velocidad inducida por gradiente de densidad y \vec{U} es un valor medio representativo de la amplitud de la corriente de marea en la zona de estudio, el cual es de 10 cm s^{-1} (Salas-de-León, 1986). Con estos valores $N = 0.008 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

La Figura 9 muestra la distribución de isopícnas y las velocidades debidas al gradiente de densidad, a una distancia de 42 km de la costa en once niveles de la columna de agua, para una profundidad total de 40 m. Debido a la fricción interna, la velocidad superficial en la zona de estudio ha disminuido

(Heaps, 1972), where χ is the coefficient of friction in the quadratic relation with a typical value of 2×10^{-3} (Ramming and Kowalik, 1980), $H = 40 \text{ m}$ is the depth of the water column in the position where the velocity induced by density gradient is computed and \vec{U} is a representative mean value of the amplitude of the tidal current in the region, which is 10 cm s^{-1} (Salas-de-León, 1986). From these values, $N = 0.008 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Figure 9 shows the isopycnal distribution and the velocities induced by the density gradient, at a distance of 42 km off the coast in 11 different depth levels in the water column, for a total depth of 40 m. Because of the internal friction, the surface velocity in the study area was reduced by a factor of 3.3

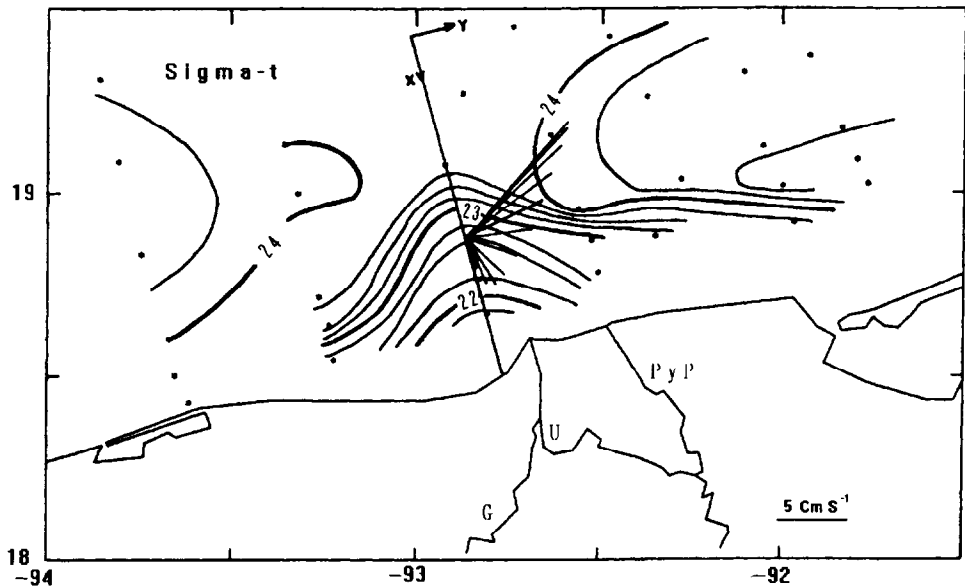


Figura 9. Estimación de la velocidad (cm s^{-1}) inducida por gradiente de densidad en el sur de la Bahía de Campeche.

Figure 9. Estimation of density currents (cm s^{-1}) in the southern part of the Bay of Campeche.

en un factor de 3.3 con respecto a la primera estimación y la velocidad en el fondo ha cambiado su dirección hacia la costa.

with respect to the first estimation and the direction of bottom current was reversed onshore.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que la distribución de densidad en el área de estudio está dominada por la salinidad. Los valores máximos observados de salinidad y densidad se encontraron sobre el banco de Campeche con fuerte homogeneidad vertical, debido probablemente a que es una zona muy somera, donde la evaporación juega un papel importante y el efecto de los ríos no se deja sentir. La porción oeste de la zona en estudio se mostró muy uniforme tanto horizontal como verticalmente, lo cual indica que en la época del muestreo se presentó una gran mezcla, y que si bien el efecto de los ríos Papaloapan y Coatzacoalcos no es del todo nulo, el proceso es de menor escala y no fue posible detectarlo claramente, debido tal vez a la red de muestreo.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Our results show that the density distribution is dominated by salinity in the study area. Maximum values of both salinity and density were found in the Campeche Bank, which was vertically uniform, probably as a result of being a shallow region where evaporation plays an important role and the influence of the rivers is slight. The western part of the study area was not only vertically but also horizontally uniform, which indicates that during the survey a strong mixing occurred and that, while the influence of the Papaloapan and Coatzacoalcos rivers is not entirely null, its effect is of a smaller scale, and it was not possible to detect it probably due to the distribution of the sampling stations.

Even though the data were collected in autumn during the dry season, a front was

No obstante que el muestreo fue realizado en otoño, en época de secas, se observó un frente debido a la presencia de un fuerte gradiente horizontal de salinidad y densidad, ocasionado por la descarga del sistema fluvial Grijalva-Usumacinta y los ríos San Pedro y San Pablo, con valores del parámetro de estratificación del mismo orden de magnitud que los obtenidos por Czitrom *et al.* (1986) para abril de 1984. Por esto, se puede suponer una cierta persistencia del frente, ya que éste puede observarse aun con descargas de río pequeñas. Este hecho concuerda con los estudios anteriores realizados por Alatorre *et al.* (1989), quienes afirman que al norte de las desembocaduras de los ríos Grijalva y Usumacinta persiste el estado del frente pese al efecto del paso de nortes.

Por otro lado, el corrimiento del eje de simetría respecto a la desembocadura del sistema Grijalva-Usumacinta refleja la posible existencia de una corriente litoral en sentido este-oeste.

La porción oeste de la zona de estudio muestra un valor cero de la anomalía de energía potencial, lo que ratifica que es una zona muy homogénea verticalmente, al igual que el banco de Campeche. Los valores máximos del parámetro ϕ que se presentan próximos al sistema Grijalva-Usumacinta y a los ríos San Pedro y San Pablo, indican que en la zona cercana a la desembocadura de dicho sistema se tiene el mayor gradiente vertical, hecho que es notorio en la distribución de densidad a lo largo de la sección A. A 30 m de profundidad en la zona del frente no se observó el efecto de los ríos, lo que muestra que éste está confinado a una capa superficial de 15 m de espesor.

En lo que respecta a la estimación de la velocidad producida por los gradientes de densidad, en el caso de un flujo sin fricción interna, ésta muestra una dirección de oeste a este y magnitud de 38 cm s^{-1} en la superficie. En el caso donde se considera la fricción interna, la dirección de la corriente cambia con la profundidad y tiene, en la superficie, dirección noreste y magnitud de 11.2 cm s^{-1} ; conforme la profundidad se hace mayor la corriente de densidad disminuye y se orienta hacia la costa.

De lo anterior se concluye que el frente es dominado por la salinidad, la cual es alterada por la descarga de los ríos de la zona;

observed due to the presence of strong horizontal salinity and density gradients induced by the inflow of the Grijalva-Usumacinta system and the San Pedro and San Pablo rivers, with values of the stratification parameter of the same order as those obtained by Czitrom *et al.* (1986) during April 1984. In fact, it is possible to assume a certain persistence of the haline front since it can be detected even in low river discharges. This agrees with earlier studies carried out by Alatorre *et al.* (1989) who pointed out that in the northern part of the mouth of the Grijalva-Usumacinta rivers, the haline front persists even during the passage of atmospheric cold fronts.

On the other hand, the displacement of the symmetry axis with respect to the mouth of the Grijalva-Usumacinta system suggests the likely existence of a westward littoral current.

In the western part of the study area the potential energy anomaly is equal to zero, which validates the existence of a vertical homogeneity in this region like the one found in the Campeche Bank. The high values of the parameter ϕ near the Grijalva-Usumacinta system and the San Pedro and San Pablo rivers, indicate that in the vicinity of the mouth of this system there is a maximum vertical gradient; the density distribution along cross section A exhibits this feature. The absence of the effect of the rivers at 30 m depth in the frontal zone implies that the front is confined to an upper layer of approximate thickness of 15 m.

The estimation of the velocity induced by density gradients, in the case of a frictionless flow, shows, at the surface, a west-east direction and speed of 38 cm s^{-1} . In the case where the internal friction is considered, the current direction varies with respect to depth and, at the surface, is of 11.2 cm s^{-1} north-eastward; as depth increases the density current decreases and it is oriented onshore.

From the above discussion we can conclude that the front is dominated by the salinity, which may be altered by the river discharge in the zone; that the general circulation in the bay influences the location of the front producing a displacement of its symmetry axis and, finally, that the density field induces a gradient density current of the order of 10 cm s^{-1} .

que la circulación general de la bahía afecta la posición del frente produciendo un corrimiento en su eje de simetría y, finalmente, que el campo de densidad induce una corriente por gradientes de densidad del orden de 10 cm s^{-1} .

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Yolanda Hornelas su colaboración en la elaboración de este trabajo. Este estudio fue parcialmente financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), mediante el proyecto PCCNCNA-031676, Estudio Multidisciplinario en la Zona Económica Exclusiva del Golfo de México: Características Geológicas, Físicas, Químicas y Biológicas (OGMEX).

LITERATURA CITADA

- Alatorre, M.A., Ruiz, F. y Salas, D. (1989). Efectos del paso de frentes fríos atmosféricos sobre la Bahía de Campeche. Memoria Reunión Anual, 1987. Unión Geofísica Mexicana. J. González, F. Medina, M. Romoy M. Martínez (eds.), pp. 186-193.
- Bowden, K.F. (1983). Physical Oceanography of Coastal Waters. J. Wiley and Sons, 302 pp.
- Bowman, M.J. and Esaias, W.E. (1978). Oceanic Fronts in Coastal Processes. Springer-Verlag, 114 pp.
- Comisión Federal de Electricidad (1987). Boletín hidrométrico.
- Cruz-Abrego, F.M. (1991). Análisis de la distribución de los moluscos bentónicos en los abanicos costeros de los principales ríos del Golfo de México (Tuxpan, Papaloapan, Coatzacoalcos, Grijalva, San Pedro y San Pablo) y su relación con condiciones ambientales y sedimentos. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias, UNAM, 103 pp.

ACKNOWLEDGEMENTS

The help of Yolanda Hornelas in the development of this work is gratefully acknowledged. This research was supported by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Grant No. PCCNCNA-031676, "Estudio multidisciplinario en la Zona Económica Exclusiva del Golfo de México: características geológicas, físicas, químicas y biológicas".

English translation by the authors.

-
- Czitrom, S.P.R., Ruiz, F., Alatorre, M.A. and Padilla, A.R. (1986). Preliminary study of a front in the Bay of Campeche, Mexico. In: J.C.J. Nihoul (ed.), Marine Interfaces Ecohydrodynamics. Elsevier Oceanography Series, pp. 301-311.
- Fedorov, K.N. (1986). Lecture notes on coastal and estuarine studies 19; the physical nature and structure of oceanic fronts. Springer-Verlag, 333 pp.
- Heaps, N.S. (1972). Estimation of density currents in the Liverpool Bay area of the Irish Sea. Geophys. J. R. Astr. Soc., 30: 415-432.
- Ramming, H.G. and Kowalik, Z. (1980). Numerical modelling of marine hydrodynamics. Applications to dynamic physical processes. Elsevier Oceanography Series, 26, 368 pp.
- Salas de León, D.A. (1986). Modelisation de la marée M_2 et de la circulation residuelle dans le Golfe du Mexique. Tesis de Doctorado, Universidad de Lieja, Bélgica, 239 pp.
- Simpson, J.H. and James, I.D. (1986). Coastal and estuarine fronts. Baroclinic Processes on Continental Shelves. Coastal and Estuarine Sciences 3, AGU, pp. 63-93.