



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE CIENCIAS
UNIDAD MULTIDISCIPLINARIA DE DOCENCIA E
INVESTIGACIÓN**

LA CORRIENTE COSTERA DE YUCATÁN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADO EN MANEJO
SUSTENTABLE DE ZONAS COSTERAS
P R E S E N T A:**

RUIZ CASTILLO EUGENIO



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. GILBERTO JERÓNIMO MORENO**

SISAL, YUCATÁN

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Este trabajo es el producto de las personas que influyeron notablemente en mí. Les agradezco a todos su participación en mi formación académica, personal y emocional desde mi tierna infancia hasta ahora.

Un agradecimiento especial a mi familia que no puede ser descrito con palabras.

Y, al Dr. Gilberto Jerónimo Moreno (2011 †) por su confianza, apoyo y amistad.

Espero que para todos este trabajo refleje dignamente su apoyo y ojalá sea de su agrado.

Muchas gracias.

Índice General

| | |
|--|----|
| Resumen..... | 7 |
| 1. Introducción..... | 8 |
| 2. Antecedentes..... | 9 |
| 3. Materiales y métodos..... | 14 |
| 4. Resultados..... | 16 |
| 4.1 Distribuciones horizontales..... | 16 |
| 4.1.1 Distribución horizontal de la temperatura..... | 16 |
| 4.1.2 Distribución horizontal de la salinidad..... | 17 |
| 4.1.3 Distribución horizontal de la densidad..... | 18 |
| 4.1.4 Distribución horizontal de la “spiciness”..... | 19 |
| 4.2 Secciones verticales..... | 20 |
| 4.2.1 Secciones verticales de la temperatura..... | 20 |
| 4.2.2 Secciones verticales de la salinidad..... | 21 |
| 4.2.3 Secciones verticales de la densidad..... | 22 |
| 4.2.4 Secciones verticales de la “spiciness”..... | 24 |
| 4.3 Diagramas T-S..... | 27 |
| 4.4 Viento y circulación..... | 27 |
| 4.5 Anomalías de temperatura..... | 28 |
| 5. Discusión y conclusiones..... | 28 |
| 6. Literatura citada..... | 32 |
| 7. Lista de figuras..... | 37 |

La Corriente Costera de Yucatán

Resumen

Con el objetivo de entender el patrón de corrientes y las masas de agua a lo largo de la plataforma Continental de Yucatán, en el presente trabajo se describe la hidrografía usando los datos de un crucero oceanográfico realizado por la Secretaria de la Marina en julio de 2009 en combinación con datos satelitales de la temperatura de la superficie del nivel del mar y de vientos. El análisis revela la presencia de una corriente costera a lo largo de la costa de la península de Yucatán la que se denomina la Corriente Costera de Yucatán que transporta agua fría y poco salada en dirección Oeste. Planteamos la hipótesis de que esta corriente es generada por un gradiente de presión entre el Canal de Yucatán y la plataforma Continental de Yucatán y es también impulsada en la misma dirección por el esfuerzo del viento. Se encontró que el origen de la baja salinidad de la corriente se encuentra entre la Ría Lagartos y Holbox producto probablemente de descargas de agua fresca de origen continental. También se encontró que frente a Sisal se desarrolla una corriente de densidad alimentada por las aguas densas provenientes de las lagunas costeras adyacentes que generalmente contienen aguas de alta salinidad.

1. Introducción

La plataforma Continental de Yucatán (PCY) se ubica entre el Golfo de México (GoM) y el Mar Caribe (MC), estos cuerpos de agua se comunican a través del canal de Yucatán. La PCY se encuentra entre los 21 °N y 23 °N y, los 90.5 °O y 87 °O (Fig. 1). Es una plataforma somera con casi 200 km de ancho desde la costa hasta los 23 °N donde alcanza una profundidad de 85 m. Su topografía es irregular e interactúa con corrientes y contracorrientes (Capurro, 2002; Herrera-Silveira, 2006). Desde la costa hasta la latitud 23 °N la pendiente de la PCY es suave, alrededor de -0.0003 , y más al Norte de esta latitud la pendiente aumenta abruptamente.

Se pueden distinguir tres estaciones climáticas en la región. La primera estación está determinada por la época de secas (marzo-mayo), la segunda corresponde a lluvias (junio-octubre), la tercera a nortes (noviembre-febrero) y se observan ocasionalmente huracanes entre agosto y septiembre (Herrera-Silveira, 1998; Herrera-Silveira, 2006). Los valores de temperatura atmosférica máximos ocurren entre los meses de julio y agosto (SARH, 1989; Jerónimo et al., 2011). y las masas de agua presentes en la PCY son aquellas que ingresan a través del Canal de Yucatán del noroeste del MC (e.g., Morrison y Nowlin, 1977, 1982; Mooers y Maul, 1998; Nowlin et al., 2001; Rivas et al., 2005; Herrera-Silveira, 2006).

La península de Yucatán se encuentra en la cuenca Sedimentaria de Chicxulub (Perry et al., 1995). Esta cuenca es de una estructura kárstica, tiene anillos con presencia de dolinas (cenotes) y es una zona de alta permeabilidad, tanto por la presencia de éstas, como por la

ruptura de la barra arenosa litoral y por la alta concentración de manantiales (Batllori-Sampedro et al., 2006). Se ha reportado que en dirección hacia el norte ocurre una caída en el nivel del agua subterránea (Perry y Velázquez, 1993). De esta manera, el anillo de cenotes afecta el tiempo de residencia de las masas de agua subterráneas, y tiende a aislar, en términos hidrogeológicos, a la Cuenca de Chicxulub del resto de la península de Yucatán (Batllori-Sampedro et al., 2006).

En el presente estudio se describe la hidrografía de la PCY durante el mes de julio del 2009. El objetivo principal es encontrar el patrón de corrientes costeras y las masas de agua a lo largo de la península de Yucatán. Se han llevado a cabo diversos estudios en el canal de Yucatán sobre el ingreso de la Corriente de Yucatán (YC) al GoM y de las contracorrientes del GoM, así como de la circulación costera en la plataforma continental de Campeche al Este de la plataforma de Yucatán. Sin embargo, existe poca información hidrográfica basada en hidrocala a bordo de buques oceanográficos sobre la PCY.

2. Antecedentes

La Península de Yucatán está formada por una plataforma caliza emergente de morfología kárstica, por lo que carece de ríos superficiales, sin embargo cuenta con una amplia red de corrientes subterráneas por donde el agua fluye a través de cavernas (Casares et al., 2006). El flujo de agua subterránea ocurre por medio de conductos de disolución o bien de manera difusa (Casares et al., 2006). El acuífero al noroeste de Yucatán contiene un lente de agua dulce que flota sobre agua más salina y densa que penetra hasta 40 km tierra adentro

(Steinich y Marín, 1996). El acuífero se encuentra libre, excepto por una banda estrecha a lo largo de la costa (Perry et al., 1989), y es la única fuente de agua dulce al noroeste de Yucatán.

El origen kárstico de la Península de Yucatán permite que, aunque no haya ríos superficiales (Lugo-Hubp et al., 1992; Aranda-Cirerol et al., 2006; Herrera-Silveira, 2006), exista aporte de aguas continentales a la zona costera debido a las escorrentías (Lugo-Hubp et al., 1992; Carruthers et al., 2005; Aranda-Cirerol et al., 2006; Herrera-Silveira, 2006; Enriquez et al., 2010). Estos aportes de agua subterránea, que son conocidos como ojos de agua (en inglés springholes), han sido estudiados con anterioridad y muestran que hay descarga de aguas continentales en lagunas costeras (Carruthers et al., 2005; Aranda-Cirerol et al., 2006; Herrera-Silveira, 2006). Se ha estimado que el volumen de descarga del acuífero a la costa es de aproximadamente $8.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{km}/\text{año}$ (Hanshaw y Back, 1980; Lugo-Hubp et al., 1992; Herrera-Silveira, 2006).

El Canal de Yucatán tiene un ancho promedio de 196 km y una profundidad de 2040 m (Badán et al., 2005). Este canal ha sido descrito como una región de variabilidad alta en la elevación del nivel del mar y de energía cinética alta (Stammer y Wunsch, 1999; Candela et al., 2002; Abascal, 2003). Los remolinos de mesoescala modulan el flujo y la composición de las masas de agua a través del Canal de Yucatán (Badán et al., 2005). De acuerdo con el modelo propuesto por Chang et al. (2010), el viento alarga el periodo de formación de remolinos e incrementa el intercambio de agua entre el GoM y el MC, así la Corriente de Lazo acumula más masa y forma remolinos por más tiempo. Candela et al. (2002) mencionan que parte de estos remolinos se desprenden de la retroflexión de la Corriente de

Brasil, ya que el flujo dentro del canal forma parte de la circulación del giro subtropical del Atlántico Norte (Sheinbaum et al., 2002).

La YC es una de las corrientes más dinámicas y fuertes de los océanos (Sheinbaum et al., 2002), su velocidad media es de 1.5 m/s (Badán et al., 2005; Candela et al., 2005; Cetina et al., 2006), sus magnitudes máximas pueden exceder los 3 m/s (Cetina et al., 2006). Esta corriente ingresa al GoM en los primeros 800 m de profundidad por la parte oeste del Canal de Yucatán (Sheinbaum et al., 2002; Abascal et al., 2003; Badán et al., 2005; Candela et al., 2005). La YC al girar sobre la PCY se convierte en la Corriente de Lazo y fluye dejando el GoM por el estrecho de Florida (Badán et al., 2005). Por medio de ésta corriente se lleva a cabo la mayor parte del transporte del MC al GoM (Cetina et al., 2006), el transporte promedio total es cercano a los 24 SV (Bunge et al., 2002; Sheinbaum et al., 2002; Johns et al., 2002; Chávez et al., 2003; Sheng et al., 2004), además la YC transporta calor del MC al GoM, que posteriormente es distribuido por remolinos que se desprenden de la Corriente de Lazo (Chang et al., 2010). De esta corriente, que resulta geostrofica, se desprenden remolinos anticiclónicos con diámetros de alrededor de 400 km y se desplazan lentamente al oeste (Maul, 1977; Sturges y Evans, 1983; Molinari y Morrison, 1988, Bunge et al., 2002; Candela et al., 2002). Los remolinos permanecen en el GoM y tienen intervalos de duración que varían entre 2.7 a 15 meses con un promedio de 9.9, y se observan a lo largo del año (Sturges y Leben, 2000; Candela et al., 2002; Zavala-Hidalgo et al., 2003) . Los remolinos anticiclónicos en la parte occidental del GoM no producen variación temporal en el flujo de entrada (Hulburt, 1980; Thompson, 1982; Martínez-Lopez et al., 1998). Se sabe que no toda la Corriente de Lazo abandona el GoM por el estrecho de Florida, ésta diverge en la costa cubana en donde algunos filamentos regresan hacia el Canal de Yucatán, a esta nueva

corriente se le conoce con el nombre de Contracorriente Cubana (Sheinbaum et al., 2002; Badán et al., 2005; Rivas et al., 2005). La mayoría de los remolinos que se encuentran en las aguas de la parte noroeste del MC se disipan en perturbaciones de menor escala pero aún así transportan vorticidad al ser advectados hacia el oeste y hacia el norte por el flujo principal de la YC (Badán et al., 2005).

En el Canal de Yucatán confluyen distintas masas de agua de las cuales la más somera es aquella denominada como Agua Subtropical Subsuperficial (SUW, por sus siglas en inglés) que proviene de la superficie subtropical, al norte y al sur del Ecuador, en donde la evaporación excede la precipitación. La salinidad (S) se encuentra alrededor de 36.7 y la temperatura (T) mínima es del orden de 23 °C con una profundidad entre los 150 y 200 m (Rivas et al., 2005). Esta masa de agua se mantiene en la Corriente de Lazo y en las estructuras de mesoescala que se desprenden de ésta. Por debajo de la SUW, se encuentra la denominada Agua del Sargaso (SSW) con $18\text{ °C} < T < 23\text{ °C}$, S alrededor de los 36.3 y en profundidades entre los 200 y 400 m (Kinard et al., 1974; Rivas et al., 2005). A mayor profundidad se encuentra la masa Agua Central del Atlántico Tropical (TACW) entre los 400 y 600 m con características de $8\text{ °C} < T < 16\text{ °C}$ y $35 < S < 36.1$ (Rivas et al., 2005).

La circulación sobre la PCY es hacia el oeste de igual forma que el patrón de vientos a lo largo del año (Zavala-Hidalgo et al., 2003; Enriquez et al., 2010). Sin embargo, el viento no es el único agente forzante en la circulación de la PCY, ya que ésta es influenciada por la YC al introducir agua del MC y al transmitir momento (Enriquez et al., 2010). Cuando el Canal de Yucatán es bloqueado por remolinos en el norte de Cuba, la YC se mueve hacia el oeste provocando la circulación arriba mencionada sobre la PCY, y cuando el canal está libre se

observa una menor influencia de la YC sobre la PCY (Badán et al., 2005; Enriquez et al., 2010). La YC fluye perpendicular a la pendiente de la PCY y continúa sobre la topografía en su camino hacia el norte (Badán et al. 2005; Enriquez et al. 2010). La influencia mayor de la YC en la hidrodinámica de la PCY se detecta por un gradiente intenso de presión en la frontera Este de ésta (Enriquez et al., 2010). Merino (1997) ha descrito una surgencia en la región sureste de la PCY, de la cuál Cochrane (1968,1969) propone que es causada por fricción en el fondo de la frontera este de la PCY con la Corriente de Yucatán. Ruiz y Merino (1997) confirmaron que el aporte de esta masa de agua proviene de la subsuperficie de las aguas correspondientes al MC, generando dos capas en la columna de agua de la PCY, desde primavera hasta otoño.

Estudios sobre la Bahía de Campeche han demostrado que en esta zona se establece una circulación ciclónica superficial (Monreal et al., 1992; Zavala-Hidalgo et al., 2003). A lo largo del año la circulación sobre la plataforma continental es hacia el norte y tiene su máximo en julio, es casi nulo en septiembre y así se mantiene hasta marzo (Zavala-Hidalgo et al., 2003). Durante la transición de primavera, la corriente inicia en el sur de la bahía y se mueve hacia el norte (Zavala-Hidalgo et al. 2003). De igual forma la circulación es afectada por remolinos que provienen de la parte este del GoM (Elliot, 1982; Smith, 1986; Vidal et al., 1992; Zavala-Hidalgo et al., 2003).

La circulación en otoño-invierno es influenciada por frentes atmosféricos del noroeste, mientras que en el verano, la circulación es influenciada por vientos del sureste. En la PCY la surgencia, que es producida por levantamiento dinámico, se asocia con la YC (Merino, 1997; Zavala-Hidalgo et al., 2006). La mayor parte de esta agua fría que surge en la PCY no

alcanza la superficie y se mantiene a lo largo del fondo de la plataforma, mientras que a lo largo de la costa de Yucatán se encuentra en la superficie (Zavala-Hidalgo et al., 2006), a pesar de que se observan vientos persistentes que favorecen surgencias durante todo el año, sólo se observan aguas costeras frías en el Norte de la península de Yucatán en julio (Zavala-Hidalgo et al., 2006). La mayor parte de las aguas con alto contenido de nutrientes vienen del Este, fluyen a lo largo del talud continental, donde aguas con relativa baja temperatura y alto contenido de nutrientes se levantan debido a la YC (Merino, 1997).

3. Materiales y métodos

La estación oceanográfica de la Secretaría de Marina con sede en Puerto Progreso, conduce periódicamente cruceros oceanográficos. Aunque la periodicidad de éstos es variable, generalmente son trimestrales. En julio de 2009 llevó a cabo la expedición oceanográfica “Crucero Yucatán 2009-A”, la que tuvo lugar del 6 al 13 del mismo mes. En esta campaña se tomaron datos de conductividad, temperatura y presión usando un CTD Sea Byrd; el derrotero del crucero y la batimetría de la zona que cubre el derrotero se muestran en la Figura 1. En general el derrotero estuvo compuesto por 56 estaciones y la distancia entre estaciones fue de 25 km en la dirección zonal y 55 km en la dirección meridional.

A partir de las hidrocalas que se realizaron durante el crucero oceanográfico fueron graficados los perfiles verticales de temperatura, salinidad y, mediante la ecuación de estado para el agua de mar, también se calculó y analizó la densidad. Adicionalmente se calculó la variable denominada “spiciness”. Esta última propiedad, que cumple la condición de que en el espacio vectorial que se genera entre la salinidad y la temperatura (diagrama T-S) sus

isolíneas son localmente perpendiculares a las isopícnas, permite distinguir entre masas de agua con variaciones simultáneas de temperatura y salinidad.

Se generaron mapas de la distribución horizontal de las variables antes mencionadas a las profundidades 5, 10, 25 y 60 m. Por la morfología de la región de estudio, ésta se consideró plana y la frontera continental una curva suave. Para una región de este tipo, la malla se generó por diferencias finitas usando el método de Tinoco-Ruiz (1997). La malla fue generada de tal forma que mantuvo el número de nodos, que en general fue 100 x 100 puntos. Sobre la malla de la región de estudio se llevó a cabo un proceso de interpolación óptima o análisis objetivo (Jerónimo y Gómez-Valdés, 2005; a Jerónimo y Gómez-Valdés, 2006). Ya que con la técnica de análisis objetivo se tiene información del error relativo del estimador, para este trabajo se eligió el estimador de tal forma que el error relativo fuera menor al 20 por ciento ($E < 0.2$).

Para la visualización de los campos en las secciones paralelas al campo de gravedad (verticales), se generaron las mallas a partir de la base de datos ETOPO5, con datos de profundidad cada .25 °. Se trazaron rectas longitudinales y latitudinales paralelas a las líneas hidrográficas del derrotero, se implementó la interpolación objetiva descrita en Jerónimo et al., (2005). La resolución de las mallas que se generaron en la vertical fue la misma que las mallas de interpolación en la horizontal (resolución de 100 x 100) sin importar la profundidad siempre hubo 100 puntos.

Con la finalidad de conocer el tipo de las aguas que están presentes en la plataforma continental se graficaron los diagramas T-S.

Para complementar la base de datos hidrográficos, se descargaron datos de temperatura superficial de sensores remotos AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR por sus siglas en inglés) del satélite Pathfinder con una resolución de 4 km, un promedio mensual y un promedio de cinco días para el año del 2009. Los datos se recopilaron de la dirección <ftp://podaac.jpl.nasa.gov>. Posteriormente, para cada punto de medición de la temperatura superficial se obtuvo la anomalía de temperatura de tal forma que al campo mensual y al de cinco días se le restó el promedio anual. Posteriormente, de la misma fuente se obtuvieron datos de viento CCMP (Cross-Calibrated Multi-Platform, por sus siglas en inglés). Estos datos a 10 m sobre la superficie del mar tienen una resolución de 25 km y un factor de escalamiento $fc=0.003051944$. Estos datos son recopilados del satélite Quikscat y posteriormente son interpolados para cubrir la ausencia de mediciones o la presencia de nubes que eviten la visualización. Se obtuvieron datos con un promedio mensual y un promedio de cinco días.

4. Resultados

4.1 Distribuciones horizontales

4.1.1. Distribución horizontal de la temperatura

La distribución horizontal de la temperatura a 5 m (fig. 2a) muestra que la temperatura promedio es del orden de 25 °C, cerca de la costa entre Ría Lagartos y Holbox se establece una zona en donde la temperatura es mínima y alcanza los 20 °C. Así mismo se puede observar la formación una franja de temperatura intermedia (26 °C) que se extiende a lo

largo de la plataforma hasta llegar a la zona costera frente a Sisal; la zona al norte de los 22 °N tiene una distribución más homogénea, en ella la temperatura alcanza los 29 °C.

La distribución horizontal de la temperatura a 10 m (fig. 2b) muestra que cerca de la costa entre Ría Lagartos y Holbox la temperatura promedio es de 18 °C. Se forma una franja con agua fría que llega hasta la zona costera frente a Sisal. La zona norte exhibe temperaturas más elevadas y homogéneas por encima de 28 °C.

La distribución horizontal de la temperatura a 25 m (fig. 2c) muestra que cerca a la costa entre Ría Lagartos y Holbox la temperatura promedio es de 21 °C. Este patrón se mantiene igual más al norte hasta 22.5 °N. También se observan dos zonas con alta temperatura en el noroeste y en el noreste por arriba de 28 °C.

La distribución horizontal de la temperatura a 60 m (fig. 2d) muestra que la temperatura promedio es más homogénea con valores entre 20 °C y 24 °C. Se observa un máximo de temperatura (28 °C) en el noreste.

4.1.2 Distribución horizontal de la salinidad

En la figura 3a, se presenta la distribución horizontal de la salinidad a 5 m. Los valores promedio son del orden de 36. Cerca de la costa se observan dos máximos locales con valores cercanos a 37, que ocurren frente a Ría Lagartos y frente a Sisal, entre estos dos máximos, la salinidad es 36.5; también se establecen un núcleo de baja salinidad (33) centrado entre 22° N y 87.5 °O, y se establece un segundo máximo centrado entre los 23.5

°N y 86.5 °O.

La distribución horizontal de la salinidad a 10 m (fig. 3b) muestra que la salinidad promedio es del orden de 36, un máximo de salinidad (37.5) se establece en los 21.5 °N y 90.5 °O. A lo largo de la zona costera, frente a Holbox ocurre un segundo máximo local (37); centrado en 22 °N y 88 °O, se establece un núcleo de salinidad mínima (36); un segundo núcleo de salinidad mínima (35.5) se encuentra centrado en los 23 °N 86.5 °O.

La distribución horizontal de la salinidad a 25 m (fig. 3c) exhibe que la salinidad promedio es del orden de 37.5. Un núcleo de máxima salinidad (38.5) se establece centrado en los 21.5 °N y 89.5 °O. Un núcleo de salinidad mínima (35.5) ocurre centrado en los 22.5 °N y 87.5 °O.

La distribución horizontal de la salinidad en la figura 3d, a 60 m, muestra que la salinidad promedio es del orden de 37, un máximo de salinidad (37.5) se establece centrado en los 89.5 °O y 22.5 °N. La zona de mínima salinidad ocurre en los 87 °O y 23.5 °N.

4.1.3 Distribución horizontal de la densidad (Sigma t)

La densidad promedio a 5 m (fig. 4a) en el norte de la PCY se encuentra alrededor de 23 kg/m³. Hay un mínimo de densidad cercano a la costa entre Ria Lagartos e Isla Holbox por debajo de 21 kg/m³. Hay un máximo de densidad que se observa cerca a la costa en núcleos localizados alrededor de 21.75 °N y 89 °O y un máximo local en 22°N y 86.3 °O.

La distribución de densidad en la figura 4b, a 10 m de profundidad, muestra un máximo por

encima de 26 kg/m^3 en 21.75°N y 88°O . La zona norte de la PCY tiene el mínimo de densidad con valores alrededor de 23 kg/m^3 .

El mapa de densidad a 25 m (fig. 4c) muestra en la zona costera dos núcleos de alta densidad, uno ubicado en 21.5°N y 89.5°O y el otro en 21.75°N y 87.5°O con valores de 27 kg/m^3 y 26 kg/m^3 , respectivamente. Esta influencia de densidad alta se observa hasta 22.25°N . La zona norte de la PCY tiene valores mínimos de densidad alrededor de 23 kg/m^3 .

A 60 m de profundidad, en la figura 4d, la densidad tiene un máximo con valor alrededor de 26 kg/m^3 centrado en 22.5°N y 88°O . La zona norte tiene un valor mínimo de 24 kg/m^3 .

4.1.4 Distribución horizontal de la “spiciness”

El mapa de “spiciness” a 5 m de profundidad (fig. 5a) tiene un mínimo (0) en la costa entre isla Holbox y Ría Lagartos. El resto del mapa tiene en promedio $7 \text{ m}^3/\text{kg}$.

La distribución de “spiciness” a 10 m (fig. 5b) muestra un mínimo en la costa con un núcleo alrededor de $3.5 \text{ m}^3/\text{kg}$ entre Ría Lagartos y la Isla Holbox, el que se extiende desde 87°O hasta 90°O . El norte de la PCY tiene valores máximos por encima de $6 \text{ m}^3/\text{kg}$.

El mapa a 25 m de profundidad (fig. 5c) tiene un mínimo de “spiciness” ($3.5 \text{ m}^3/\text{kg}$) con un núcleo centrado entre la Isla Holbox y Ría Lagartos en 21.7°N y 87.5°O . En la región costera al oeste desde 89°O se observan valores típicos del norte de la PCY por encima de $6 \text{ m}^3/\text{kg}$.

En la figura 5d, el mapa de “spiciness” a 60 m, se observa un mínimo local ($4 \text{ m}^3/\text{kg}$) en el sureste en 22°N y 86.7°O . El resto de la PCY es más homogénea con valores de 5.5 y con máximos en el noroeste y noreste con valores de $6 \text{ m}^3/\text{kg}$.

4.2 Secciones verticales

4.2.1 Secciones verticales de la temperatura

Las secciones muestran una mayor temperatura en la parte noroeste de la PCY y se observa una estructura de domo o un frente cálido proveniente del GoM (fig. 6a). Los mapas de temperatura muestran en la zona costera aguas con temperaturas mínimas de 20°C . Éstas tienen su núcleo frío alrededor de 87.5°O (fig. 6d). La baja temperatura corresponde a dos fenómenos. El primero, consiste en aporte de agua continental con temperaturas bajas que crea una lengüeta de agua fría hasta 22°N que aumenta su temperatura en su camino al norte entre la superficie y los 20 m justo en el canal de la Laguna de Yalahau, entre Ría Lagartos y la isla Holbox. El segundo, corresponde a la surgencia descrita por Merino (1997) de agua fría de la subsuperficie del Canal de Yucatán que circula hacia el oeste de la PCY por la zona costera.

En la región noreste, se observa, al norte de la latitud 23°N (fig. 6b), que la temperatura comienza a profundizarse hasta los 100 m y en 23.3°N (fig. 6c) ésta se profundiza hasta más de 150 m en la parte profunda de la PCY y por lo tanto hasta profundidades mayores. Este incremento en la temperatura de la capa de mezcla podría ser la causa de la contracorriente en dirección sur y generar así un gradiente de presión en el este de la PCY. La evidencia de

temperaturas mínimas en el norte de la PCY, tanto en la región este y oeste, es una evidencia que la YC gira alrededor de la PCY al igual que la inclinación de las isotermas en la longitud 90°O (fig. 6e).

4.2.2 Secciones verticales de la salinidad

La baja salinidad en superficie confirma el aporte de agua continental al tener la misma ubicación de la temperatura fría en los mapas de temperatura. Alcanza su mayor influencia al norte alrededor de 22.25°N (fig. 3a). En su núcleo, centrado en 87.5°O , en el canal de la Laguna de Yalahau, entre Ría Lagartos y Holbox, tiene salinidades mínimas entre 28 y 29 y en los extremos de éste salinidades entre 32 y 33. Cerca de 22.5°N alcanza salinidades máximas de 35. El resto de la superficie mantiene salinidades alrededor de 36.0-36.7, típicas del Canal de Yucatán. Conforme aumenta la profundidad, la salinidad se incrementa, y la lengüeta de baja salinidad disminuye paulatinamente hasta desaparecer a los 20 m en la latitud 22.25°N (fig. 7a).

La salinidad promedio de la PCY se encuentra entre 36.3 y 36.7. Sin embargo, en el fondo de la PCY hay núcleos salinos que corresponden a corrientes de gravedad (fig. 7b y 7c). Éstos son mejor vistos en las secciones de salinidad. Los núcleos se forman en la costa, probablemente en las lagunas costeras debido a una alta radiación y por consiguiente a una alta evaporación. Al incrementar su densidad se deslizan como pulsos sobre la pendiente de la PCY. Siguen este camino hasta caer al talud en las partes este, oeste y norte de la plataforma, su mayor concentración y transporte se lleva por el centro de la PCY desde el suroeste y cae en forma de cascada al llegar al talud continental ubicado al norte de la plataforma.

4.2.3. Secciones verticales de la densidad

La densidad en los sitios que corresponden al aporte de agua continental tiene valores bajos, incluso menores que 20 kg/m^3 , en el centro del canal a pesar de contener agua fría (fig. 4a). Esto es una consecuencia de su baja salinidad y lo que la identifica como agua de aporte continental. En los extremos del canal la densidad aumenta a 22 kg/m^3 . Este aporte continental tiene una influencia mucho menor en los mapas de densidad al llegar tan sólo hasta la latitud 22°N . Esto puede indicar que las aguas de la surgencia sean las que producen la lengüeta más al norte con temperaturas y salinidades bajas y hace que la mezcla contenga características del MC y sea la razón por la que se observa en la superficie al tener mayor densidad y poder desplazar aguas de aporte continental con baja densidad (fig. 8a).

En superficie, nuevamente se observan dos frentes correspondientes a las aguas cálidas del GoM y a las aguas frías de la subsuperficie del Canal de Yucatán (fig. 4a). Las primeras tienen una densidad alrededor de 23.5 kg/m^3 mientras que el agua fría tiene una densidad mínima de 25 kg/m^3 . Pese a la claridad en la variable de densidad la mejor variable para describir las masas de agua en la PCY resulta ser la “spiciness” que posteriormente será descrita.

Al llegar a la superficie el agua de la surgencia descrita por Merino (1997) choca con el frente cálido proveniente del GoM en la superficie y por arriba de los 20 m de profundidad y es forzada a divergir en la zona costera (fig. 4a) y a hundirse y mezclarse hacia el noroeste

después de la latitud 22.3 °N (fig. 8b). La sección de densidad en la latitud 21.75 °N (fig. 8c) y 22 °N (fig. 8d) da evidencia de otro hundimiento en dirección oeste. Esto se debe a que la surgencia al chocar con el aporte continental gira alrededor de éste y aparece en la parte occidental en dirección suroeste justo antes de hundirse hacia el oeste de la PCY. Aun así, el agua subsuperficial es detenida por la corriente de gravedad que ahí se origina. Pero ya que esta última es por pulsos, indica que cuando no se presenta la corriente fría sigue en dirección oeste.

En las secciones paralelas a la costa se puede distinguir que el agua del Canal de Yucatán surge en el sur hasta la latitud 22.25 °N (fig. 8c, 8d, 8e). La capa superficial y la subsuperficial están bien delimitadas aparentemente por la isopicna de 24.5 kg/m³. Conforme la profundidad aumenta en la PCY se percibe el avance que tiene el agua subsuperficial y cómo es detenida por el frente cálido y por la corriente de densidad. De tal forma la corriente de densidad modula a la surgencia (fig. 8d). Por medio de los mapas de densidad se puede observar el trayecto y las fronteras claras del frente cálido y del agua subsuperficial, y es por medio de éstas que se observa que por debajo de los 30 m el frente cálido ya no parece tener influencia (fig. 4c y 4d). Además, la región sureste de la PCY siempre muestra densidades altas como consecuencia de la zona del abordamiento (fig. 4d). Esta región parece que no está mezclada, mantiene características del agua fría de la subsuperficie del Canal de Yucatán.

El agua en el noroeste se observa mezclada, lo que indicaría la capa de mezcla, y finalmente por debajo de ésta, a 70 m de profundidad, el agua sobre la PCY es agua completamente del Canal de Yucatán. El aumento de la profundidad sobre la plataforma también permite

que las aguas del GoM puedan aumentar su influencia hacia el fondo, y ésta se reduce en la costa.

En las corrientes de gravedad, en los núcleos salinos se aprecia que la salinidad determina primordialmente la densidad. Los núcleos salinos generan corrientes de densidad por el fondo, como lo muestran las secciones (fig. 8a, 8b, 8c, 8d y 8e), y las cuales se deslizan sobre la batimetría de la PCY. Éstas se dirigen al Este, Oeste o Norte de acuerdo a la pendiente local de su origen. En la latitud 22.25 °N (fig. 8e) se puede observar que la corriente de gravedad cae por el Este. Lo que permite afirmar que hay varios orígenes de las corrientes. Sin embargo, también en los mapas y en las secciones de densidad se observa el flujo principal con origen suroeste y con un recorrido en dirección norte hasta el centro norte de la PCY. Mientras que en las regiones que no se encuentran sobre el fondo, la densidad es determinada principalmente por la temperatura, las estructuras observadas en el noreste del área de estudio muestran el mismo hundimiento de la picnoclina (fig. 8f) que se observó en la temperatura lo cual podría dar origen a la contracorriente en dirección sur que choca con un flujo en dirección norte en 22.25 °N (fig. 8e).

4.2.4 Secciones verticales de la “spiciness”

Los valores más bajos de “spiciness” ubicados en la PCY (fig. 5a) corresponden al aporte continental, con valores mínimos de 0 m³/kg en su núcleo y máximos de 3 m³/kg en sus límites. La surgencia y posteriormente la corriente costera de Yucatán tienen valores entre 4.5 y 5 m³/kg. La región noroeste de la PCY tiene valores alrededor de 6 m³/kg. Mientras que las corrientes de gravedad tienen valores por encima de 7.5 m³/kg. Esta distinción tan clara en los valores hace que la “spiciness” sea la variable indicada para distinguir las

diferentes estructuras en la PCY y las diversas masas de agua. Por lo cual al analizar a la PCY y distinguir alguna estructura representada por algún valor característico de esta propiedad es posible saber cual es su origen.

La “spiciness” en la superficie identifica el aporte de agua continental con valores máximos de hasta $3 \text{ m}^3/\text{kg}$ cercanos a la latitud 22°N (fig. 9a y 9e) y comprueba que posteriormente se observa la surgencia con valores alrededor de $4.5 - 5 \text{ m}^3/\text{kg}$, la cual rodea el aporte continental y posteriormente se dirige hacia la costa dónde en 90°O alcanza profundidades máximas entre $15-20 \text{ m}$ y puede ser que posteriormente se hunda en su camino al Oeste. Por debajo de los 20 m ya no se observa el aporte de agua continental sino se observa una “spiciness” con valores típicos de la corriente costera que se dirige al Oeste y que choca con aguas cálidas del GoM y por lo tanto converge en la costa. Sobre esta profundidad el flujo no puede avanzar más en dirección oeste ya que choca con un núcleo salino como lo muestra la distribución de “spiciness”.

Por debajo de los 20 m de profundidad (fig. 5c) probablemente se genera un choque entre dos masas de agua (del noroeste de la PCY y de aguas subsuperficiales del Canal de Yucatán) lo que provoca que la masa de agua subsuperficial inicie su mayor intrusión hacia el noroeste de la PCY y esté delimitado por valores de “spiciness” de $5.5 \text{ m}^3/\text{kg}$, dónde se observa que se lleva a cabo la mezcla. Este valor de $5.5 \text{ m}^3/\text{kg}$ corresponde a la mezcla entre las dos masas de agua predominantes en la PCY.

El agua de origen subsuperficial, como lo muestra la “spiciness”, sugiere que su origen sea en la parte sureste (fig. 5d). El agua se desplaza en dirección noroeste dónde choca con el

frente cálido, con un valor alrededor de $6 \text{ m}^3/\text{kg}$. Parte se desvía a la costa y otra parte del agua subsuperficial se hunde por debajo de la capa cálida proveniente del GoM. Conforme incrementa la profundidad se observa el desplazamiento de las masas de agua hacia el noroeste. El frente cálido tiene influencia hasta más de 30 m de profundidad (fig. 9f). Más abajo se observa una capa mezclada claramente definida por los valores de $5.5 \text{ m}^3/\text{kg}$ y en la región noroeste después de los 35 m. Esta capa mezclada se reduce con el aumento de la profundidad mientras que los valores de $5 \text{ m}^3/\text{kg}$, típicos del agua fría, están en el sureste. Se observa que en el fondo el agua fría inunda la PCY y en profundidades mayores, por debajo de los 70 m, lo que predomina es el agua fría. Se observa, que el recorrido del agua subsuperficial es detenido por la corriente de gravedad, entre 89°O y 89.5°O (fig. 9g y 9c), la corriente de gravedad desplaza el hundimiento del agua subsuperficial, a 25, 30 y 35 m (fig. 9c). Esto indica que la corriente de gravedad es un factor muy importante en la hidrodinámica de la PCY con fuerza suficiente para frenar la surgencia.

El origen del agua fría como lo muestran los valores alrededor de $5 \text{ m}^3/\text{kg}$, es en el sureste (fig. 5d). En las secciones paralelas a la costa se observa también que el agua subsuperficial del Canal de Yucatán aborda a la PCY al sur de 22.25°N (fig. 9b) principalmente y en menor medida en 22.5°N (fig. 9c) se observan ligeras evidencias de abordamiento por la diferencia de profundidades para los mismos valores. En la región Este de la PCY se observa el mismo comportamiento que en la temperatura y la densidad, es decir, la profundización de la capa cálida o superficial por lo que se observan las isoclinas de "spiciness" a mayor profundidad. En el noreste, en 23.3°N (fig. 9d), se puede observar el desplazamiento vertical de la capa cálida que proviene del GoM hasta los 100 m. De igual manera, las líneas de igual "spiciness", con valores bajos, se encuentran en capas más profundas.

4.3. Diagramas T-S

(fig. 10) Por medio de los T-S se pueden distinguir las masas de agua descritas en el Canal de Yucatán y coinciden en las mismas regiones. El T-S de los transectos 87°O y 86.7°O son similares para las masas de agua SUW, SSW y TACW. A pesar de que las profundidades a las que se presentan en el canal son mucho mayores. Esto es una evidencia de la surgencia reportada por Merino (1997) y al ver las secciones paralelas a la costa no se observa diferencia entre la salinidad en la región del Canal de Yucatán y en la PCY, a excepción de los núcleos salinos en el fondo y del aporte de agua continental. Esto podría indicar que la circulación en la PCY se debe principalmente a un gradiente de presión del Canal de Yucatán. De igual forma se observa que la Corriente de Yucatán gira alrededor de la PCY al observarse las masas de agua TACW en la parte occidental en profundidades por debajo de los 100 m. Esta masa de agua no se observa sobre la plataforma ya que su alta densidad no permite estar en regiones tan someras. Sin embargo, su presencia en la parte oriental demuestra que la corriente gira alrededor de la península y que parte de la surgencia no aborda la plataforma sino que continúa en su camino hacia el norte y alrededor de la plataforma. Sin embargo, al hacer los T-S por lance, se puede observar que en el Este se observan los puntos de inflexión en 36.3 y 36.7 y en los lances correspondientes al frente cálido del GoM no se observa ese punto de inflexión.

4.4 Viento y circulación

Las imágenes de viento muestran una circulación sobre la PCY en dirección oeste (fig. 11a,

11b, 11c y 11d). Las magnitudes máximas de los vientos son de 15 m/s. El patrón de vientos a lo largo del año tiene poca variación. Enfrente de la península de Yucatán los vientos tienen de manera general una dirección oeste.

4.5. Anomalías de temperatura

Las imágenes de anomalía de temperatura (fig. 11a, 11b, 11c y 11d) muestran que durante los meses en que se presenta la Corriente Costera de Yucatán (fig. 40) la YC es anómalamente fría en comparación con el resto de la plataforma y el GoM, es decir, que las variaciones de temperatura por debajo de la temperatura media son más altas que las variaciones de temperatura sobre la PCY. En coincidencia con lo reportado por Chang et al., (2010), en estos meses, el GoM no pierde calor con la atmósfera y es ésta quien mantiene las altas temperaturas sobre la PCY. De tal forma que la YC (corriente de Yucatán) tiene una mayor densidad y desplaza aguas cálidas con menor densidad. Esto podría indicar que durante estos meses el mayor aporte de calor al GoM no proviene de la YC sino de la radiación.

5. Discusión y conclusiones

En este trabajo se presentan los resultados de un crucero oceanográfico realizado por la Secretaria de la Marina en julio de 2009 en la PCY. Nuestros resultados revelan la presencia de una corriente costera a lo largo de la costa de la península de Yucatán la que denominaremos la Corriente Costera de Yucatán la que transporta agua fría y poco salada en dirección Oeste. Planteamos la hipótesis de que es generada por un gradiente de presión

entre el Canal de Yucatán y la PCY y es también impulsada por el viento. Encontramos que el origen de la baja salinidad de la corriente se encuentra entre la Ría Lagartos y la isla Holbox.

El origen kárstico de la PCY permite que exista agua de aporte continental por medio de ojos de agua con salinidad y temperatura bajas en el canal de la Laguna de Yalahau en 87.5°O y tiene una influencia mar adentro entre 22°N y 22.25°N con profundidades máximas de 20 m, aproximadamente. Esto coincide con la fecha del crucero, durante el mes de julio, descrita como temporada de lluvias (Herrera-Silveira, 1998; Herrera-Silveira, 2006). Es probable que en este canal haya un gran aporte de agua subterránea por medio de los ojos de agua y que se dirija al mar en forma de río. Tal vez esta descarga de agua subterránea sea similar a aquellas de los ríos superficiales. De tal forma, las masas de agua presentes en la PCY están determinadas en cierta medida por la estación y el aporte pluvial de origen continental.

Por otro lado, en julio se han reportado los valores máximos de temperatura del aire para la región (SARH, 1989; Jerónimo et al. 2011), lo que genera mayor salinidad en las costas. Por lo que la salinidad de el agua superficial se incrementa y así aumenta su densidad y se precipita al fondo. Este proceso genera corrientes de densidad o gravedad que se deslizan como pulsos sobre la pendiente suave de la PCY hacia profundidades mayores, y es probable que al alcanzar el talud caigan en forma de cascada. El flujo principal de las corrientes de densidad es de suroeste hacia el norte de la PCY, sin embargo los núcleos salinos se observan a lo largo de la costa y su flujo no siempre es en la misma dirección y dirigiéndose al talud ya sea en dirección Este u Oeste de acuerdo a la pendiente local de su

origen. Esta circulación profunda debe tener consideraciones futuras para la dinámica de sedimentos de la PCY.

A lo largo de la península se observa un flujo frío en dirección Oeste. Esta corriente costera que tiene sus orígenes en la parte sureste de la PCY transporta aguas de origen subsuperficial del Canal de Yucatán. Estas aguas inundan la plataforma en el fondo y en la zona costera alcanzan la superficie debido a la batimetría, ya que en la costa hay poca profundidad el flujo puede alcanzar la superficie al deslizarse sobre el fondo. Conforme se alejan mar adentro la profundidad aumenta hacia el norte y el flujo se desliza hacia profundidades mayores. La corriente costera en superficie al emerger choca con un frente cálido proveniente del GoM, lo que la obliga a circular sobre la zona costera y sobre el fondo en dirección noroeste. Su intrusión mayor en esa dirección se da por debajo de los 70 m donde el agua fría subsuperficial no está mezclada con la masa de agua cálida ya que ésta no alcanza esas profundidades. La corriente circula sobre la zona costera y detiene su recorrido al chocar con una corriente de gravedad aproximadamente frente a Sisal. Dado que la corriente de gravedad se presenta por pulsos es posible que, en condiciones normales, se hunda en su camino con dirección hacia el occidente de la PCY cuando la corriente de gravedad no la detiene. Esta corriente de agua subsuperficial es estacional y sólo se observa entre mayo y agosto de 2009.

La distribución de calor en el GoM es principalmente mediante la Corriente de Yucatán y el viento va en dirección oeste a lo largo del año y una velocidad máxima cercana a los 15 m/s por lo que es favorable para la aparición de la Corriente Costera de Yucatán. Sin embargo, cómo se ha mencionado anteriormente ésta no es permanente. La estacionalidad indica que

no depende únicamente del agente forzante del viento, sino también de las anomalías de temperatura, las cuales, demuestran que durante mayo-agosto de 2009 la Corriente de Yucatán es más fría que la PCY y que el GoM por lo que el gradiente intenso de presión puede deberse a la baja temperatura de la Corriente de Yucatán y a su alta densidad que le permite desplazar aguas cálidas con más facilidad.

La solución del modelo propuesto por Chang et al., (2010) indica que los vientos pueden alargar las isotermas superficiales en dirección oeste y generar transporte en dirección norte en la región oriental del Canal de Yucatán lo que podría provocar un levantamiento de aguas subsuperficiales sobre la PCY en la parte sureste de ésta. Esto coincide con la sección 22.25 °N donde se observa una circulación al Este de la PCY en dirección norte en las isotermas y en la misma profundidad, pero no concuerda con las isotermas para secciones más al norte en donde aparentemente hay una contracorriente en dirección sur. Aun así, el viento no parece ser el único agente forzante que genere el abordamiento de aguas subsuperficiales ya que el viento mantiene esa dirección a lo largo del año y la corriente costera aparece estacionalmente.

6. Literatura Citada

Abascal, A. J., J. Sheinbaum, J. Candela, J. Ochoa, and A. Badan. (2003), Analysis of flow variability in the Yucatan Channel, *J. Geophys. Res.*, 108(C12), 3381, doi:10.1029/2003JC001922

ArandaCirerol, N., J. A. Herrera-Silveira, F. A. Comín. (2006), Nutrient water quality in a tropical coastal zone with groundwater discharge, northwest Yucatán, Mexico, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 68, 445 – 454.

Badan, A., J. Candela, J. Sheinbaum, J. Ochoa. (2005), Upper-layer Circulation in the Approaches to Yucatan Channel. Geophysical Monograph Series.

Batllore-Sampedro, E., J. I. González Piedra, J. Díaz Sosa, J. L. Febles Patrón. (2006), Caracterización Hidrológica de la Región Costera Noroccidental del Estado de Yucatán, México. *Investigaciones Geográficas*, abril, no. 059.

Bunge, L., J. Ochoa, A. Badan, J. Candela, J. Sheinbaum. (2002), Deep flows in the yucatan channel and their relation to changes in the loop current extension. *J. Geophys. Res.*, 107(C12), 3233, doi:10.1029/2001JC001256,

Candela, J., J. Sheinbaum, J. Ochoa, A. Badan. (2002), The potential vorticity flux through the Yucatan Channel and the Loop Current in the Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 22, 2059, doi:10.1029/2002GL015587, 2002

Carruthers, T.J.B., B.I. Van tussenbroek, W.C. Dennison. (2005), influence of submarine springs and wastewater on nutrient dynamics of Caribbean seagrass meadows. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64 191-199.

Cetina, P., J. Candela, J. Sheinbaum, J. Ochoa, A. Badan (2006), Circulation along the Mexican Caribbean coast. *J. Geophys. Res.*, 111(C08021), doi:10.1029/2005JC003056,

Chávez, G., J. Candela, J. Ochoa. (2003), Subinertial flows and transports in Cozumel Channel. *J. Geophys. Res.*, 108 (0, XXXX), doi:10.1029/2002JC001456,

Enriquez, C., I. J. Mariño-Tapia, J. A. Herrera-Silverira. (2010), Dispersion in the Yucatan coastal zone. *Continental Shelf Research*. 30. 127-137.

Herrera-Silveira, J. (2006), Coastal Lagoon of Yucatan (SE, Mexico): Research, Diagnostic and Management. *Ecotrópicos* 19 (2): 94-108.

Jerónimo G., J. Gómez-Valdés. (2006), Promedios de temperatura y salinidad sobre una superficie isopícnica en la capa superior del océano frente a Baja California. *Ciencias Marinas*. Vol. 32, 4

Jerónimo, G., J. Gómez-Valdés. (2006), Promedios de temperatura y salinidad sobre una superficie isopícnica en la capa superior del océano frente a Baja California. *Ciencias Marinas*, 32 (4), p. 663- 671.

Jerónimo, G., J. Gómez-Valdés, M. Badillo, K. López-Aguiar, C. Galindo, A Gallardo, J. Loera, L. Arroyo-Pedraza, X. Chiappa-Carrara. (2011), Seasonal temperature and salinity changes in the coastal lagoon La Carbonera, Yucatán, 2009-2010.

Lugo-Hubp, J., J. F. Aceves-Quesada, R. Espinasa-Pereña. (1992), Rasgos Geomorfológicos Mayores de la Península de Yucatán. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista 10 (2): 143-150

Martínez-Lopez, B. A. Parés-Sierra. (1998), Circulation in the Gulf of Mexico induced by tides, wind and the Yucatan Current. Ciencias Marinas. 24(1): 65-93.

Merino, M. (1997), Upwelling on the Yucatan Shelf: hydrographic evidence. Journal of Marine Systems. 13 (1997) 101-121.

Morey, S. L., W. W. Schroeder, J. J. O'Brien, J. Zavala-Hidalgo. (2003), The annual cycle of riverine influence in the eastern Gulf of Mexico basin. Geophysical Research Letters. VOL. 30, NO. 16, 1867, doi:10.1029/2003GL017348,

Oey, L.Y., Y. L. Chang. (2010), Eddy and Wind-Forced Heat Transports in the Gulf of Mexico. Journal of Physical Oceanography. Vol 40 DOI: 10.1175/2010JPO4474.1

Perry, E., E. Smith, J. Gamboa, A. Reeve, R. Sanborn, L. Marin y M. Villasuso. (1989),

Geologic and Environmental aspects of surface cementation, North Coast, Yucatan, México, *Geology*, no. 17.

Perry, E., G. Velázquez. (1993), Determination of flow directions in the ring of cenotes in the Yucatán State, México. *Unión Geofísica Mexicana*, v. 13, no. 5.

Perry, E., G. Velazquez-Oliman, R. A. Sock. (1995), Hydrogeology of the Yucatán Peninsula, en "The lowland Maya Area Three Millennia At The Human-Wildland Interface". Editores Gómez-Pompa, A. M.F. Allen, S. L. Fedick, J.J. Gímenez-Osornio. Food Products Press. 2003.

Rivas, D., A. Badan, J. Ochoa. (2005), The ventilation of the deep gulf of Mexico. *Journal of Physical oceanography*,

Sheinbaum, J., J. Candela, A. Badan, J. Ochoa. (2002), Flow Structure and transport in the Yucatan Channel. *Geophysical Research Letters*. Vol. 29, NO. 0, 10.1029/2001GL013990,

Sheng, J., L. Tang. (2004), a two nested-grid ocean-circulation model for the Meso-American Barrier Reef System *Ocean dynamics*, 54:232-242 springer Verlag

Tinoco-Ruiz, J. G. (1997). Funcionales discretos para la generación de mallas suaves y convexas sobre regiones planas irregulares. PhD thesis, CIMAT, Guanajuato, Gto.

Vázquez-Figueroa, V., C. Canet, R. M. Prol-Ledesma, A. Sánchez, P. Dando, Antoni

Camprubí, C. J. Robinson, G. Hiriart Le Bert. (2007), Batimetría y características hidrográficas (MAYO, 2007) en las Cuencas de Consag y Wagner, Norte del Golfo de California, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.

Zavala-Hidalgo, J., S. L. Morey, J. O Brien. (2003), Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *J. Geophys. Res.*, 108 (C12, 3389) doi:10.1029/2003JC001879,

Zavala-Hidalgo, J., A. Gallegos-Garcia, B. Martínez-López, S.L. Morey. (2006), Seasonal upwelling on the Western and Southern Shelves of the Gulf of Mexico. *Ocean Dynamics* DOI 10.1007/s10236-006-0072-3.

7. Lista de Figuras

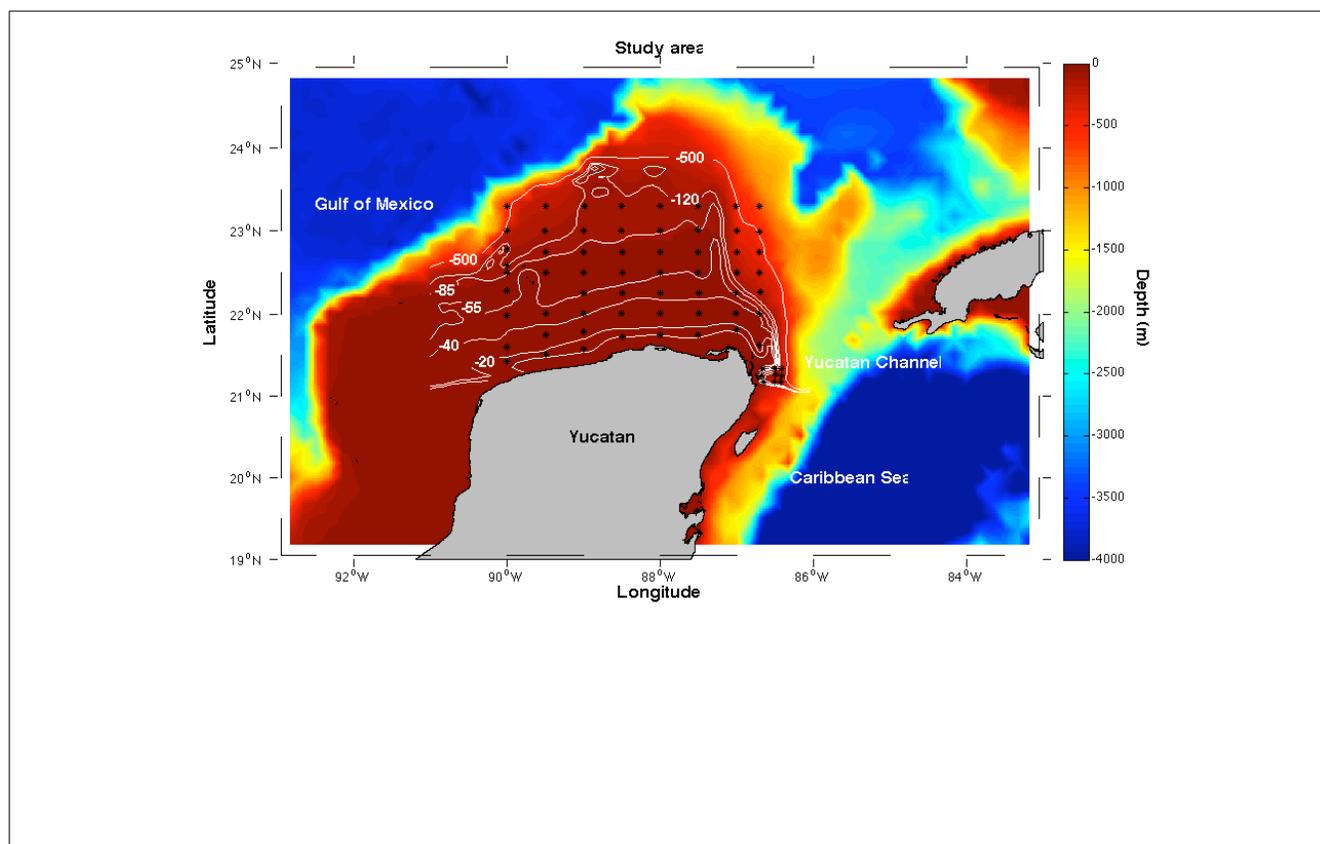


Fig. 1. Batimetría de la plataforma Continental de Yucatán. Los puntos en negro son las estaciones de muestreo y las isolneas blancas describen con mayor claridad la batimetría del área de estudio.

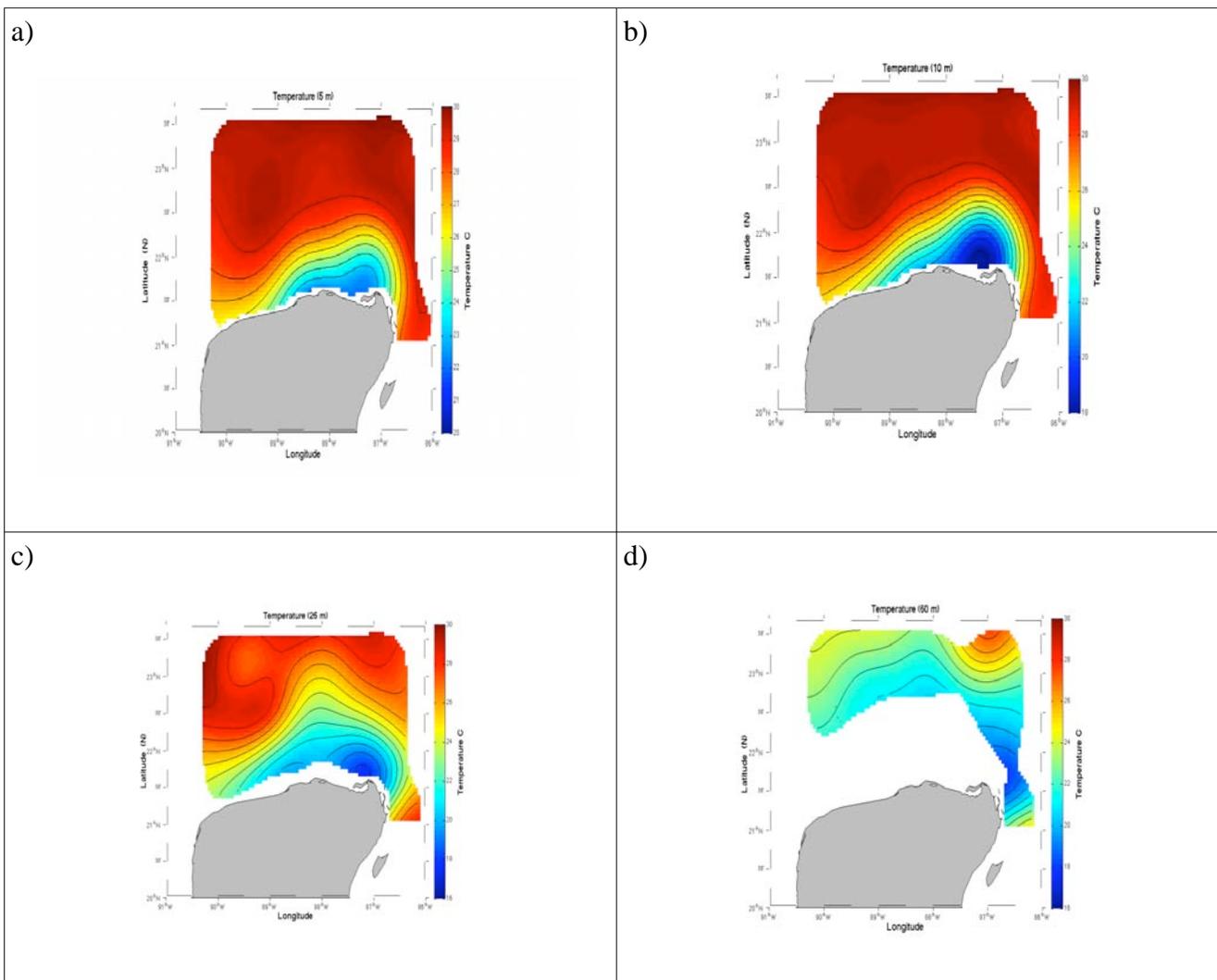


Fig. 2. a) Distribución de temperatura a 5 m. b) Distribución de temperatura a 10 m. c) Distribución de temperatura a 25 m. d) Distribución de temperatura a 60 m.

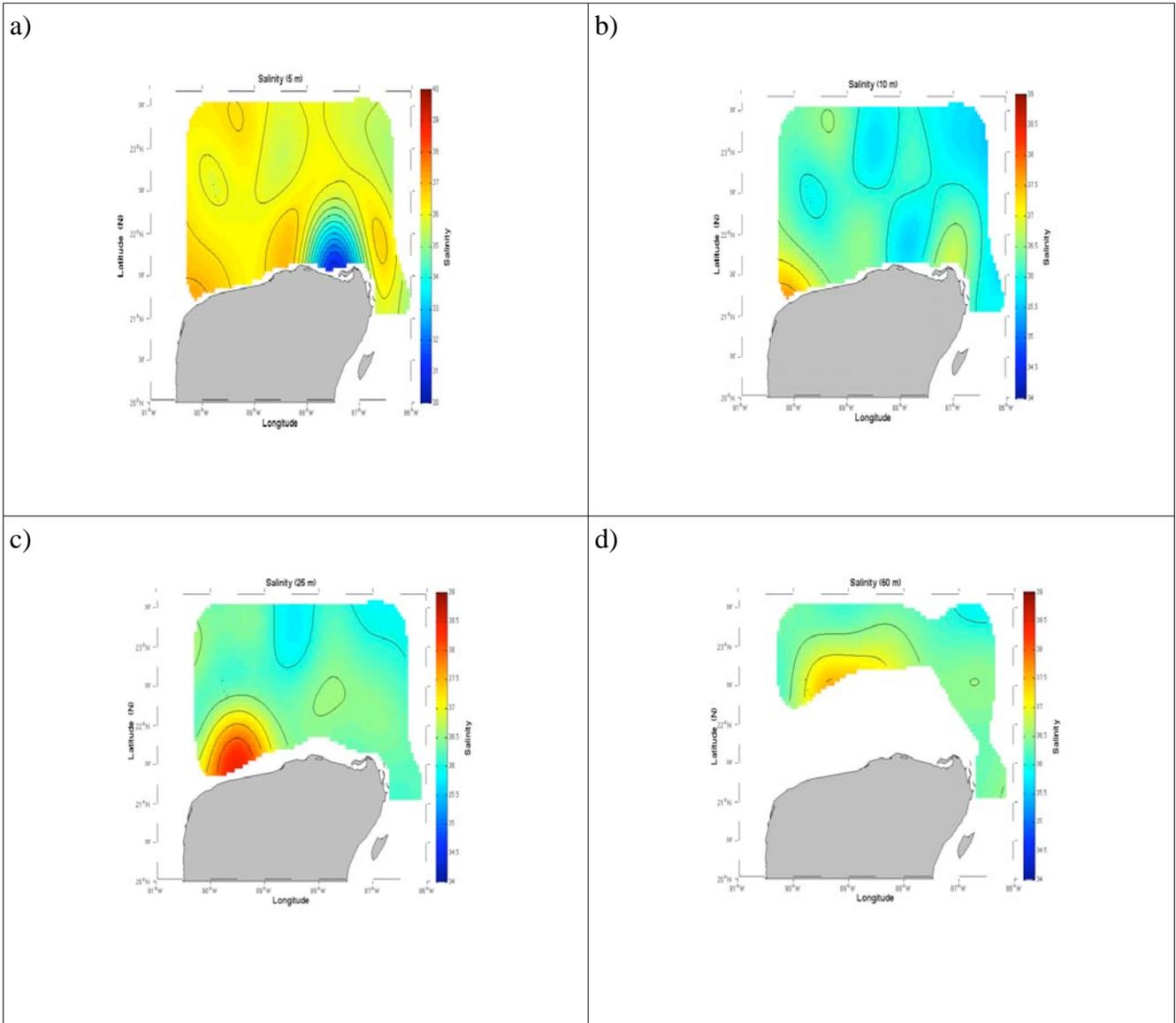


Fig. 3. a) Distribución de salinidad a 5 m. b) Distribución de salinidad a 10 m. c) Distribución de salinidad a 25 m. d) Distribución de salinidad a 60 m.

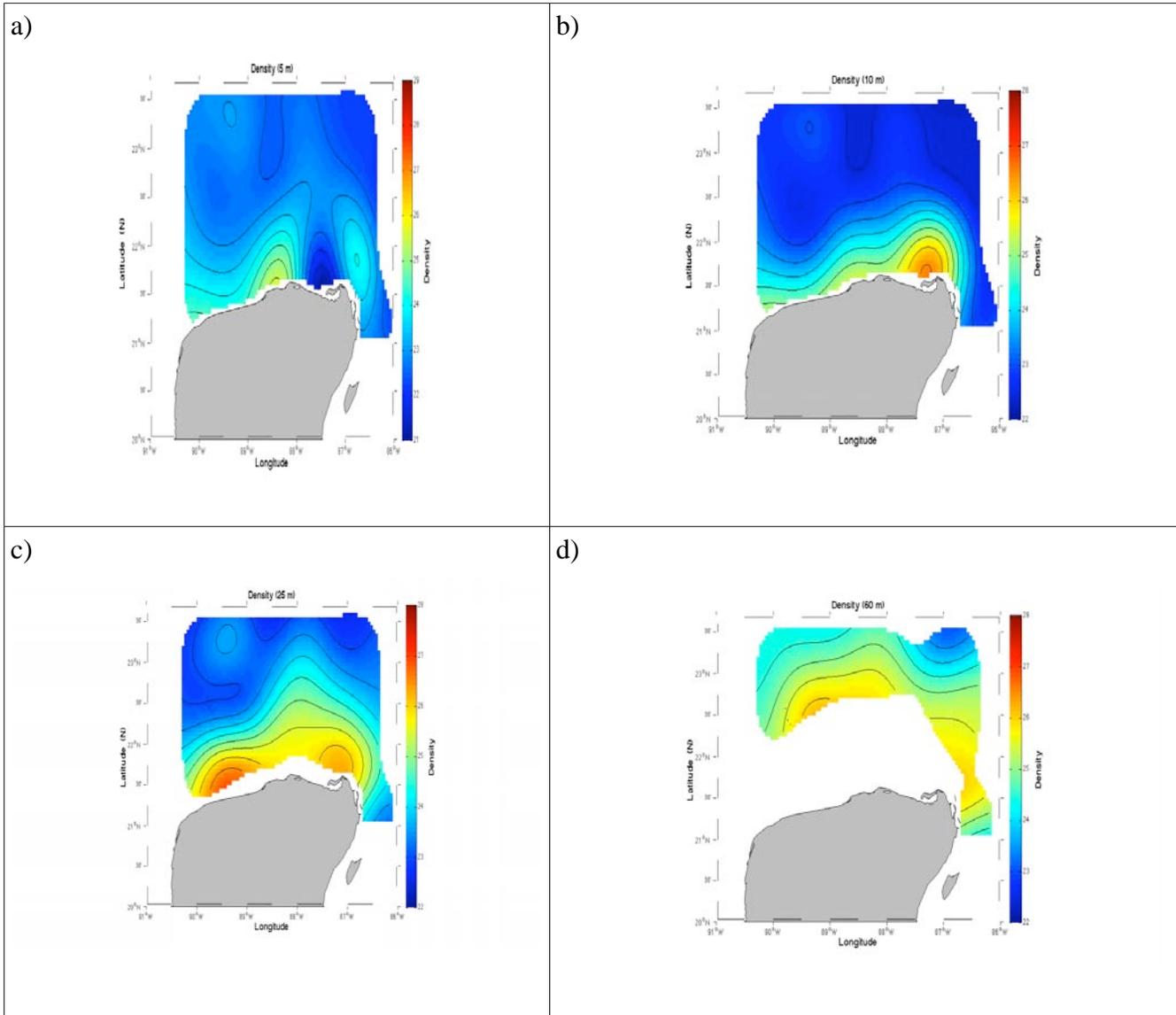


Fig. 4. a) Distribución de densidad a 5 m. b) Distribución de densidad a 10 m. c) Distribución de densidad a 25 m. d) Distribución de densidad a 60 m.

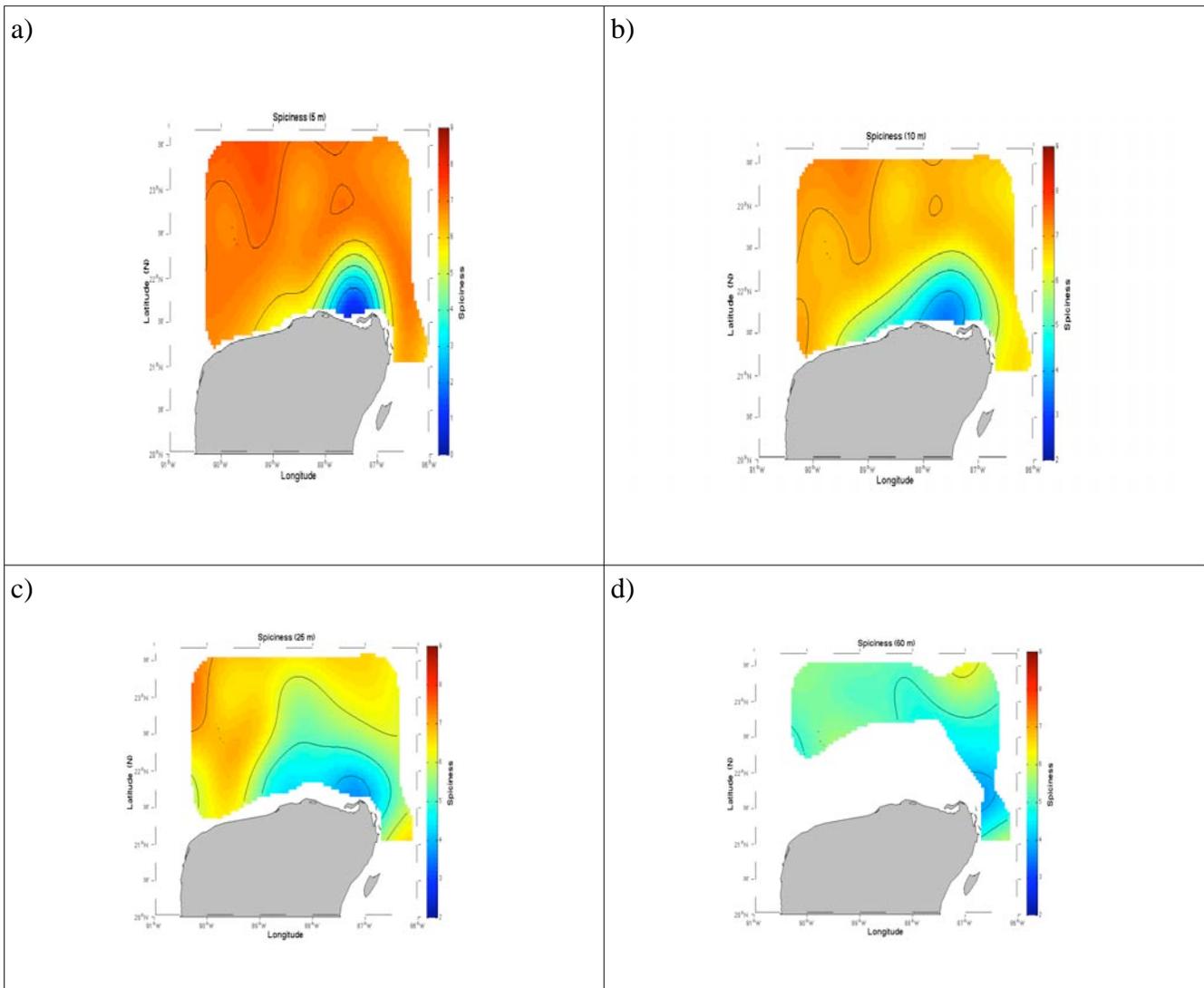


Fig. 5. a) Distribución de “spiciness” a 5 m. b) Distribución de “spiciness” a 10 m. c) Distribución de “spiciness” a 25 m. d) Distribución de “spiciness” a 60 m.

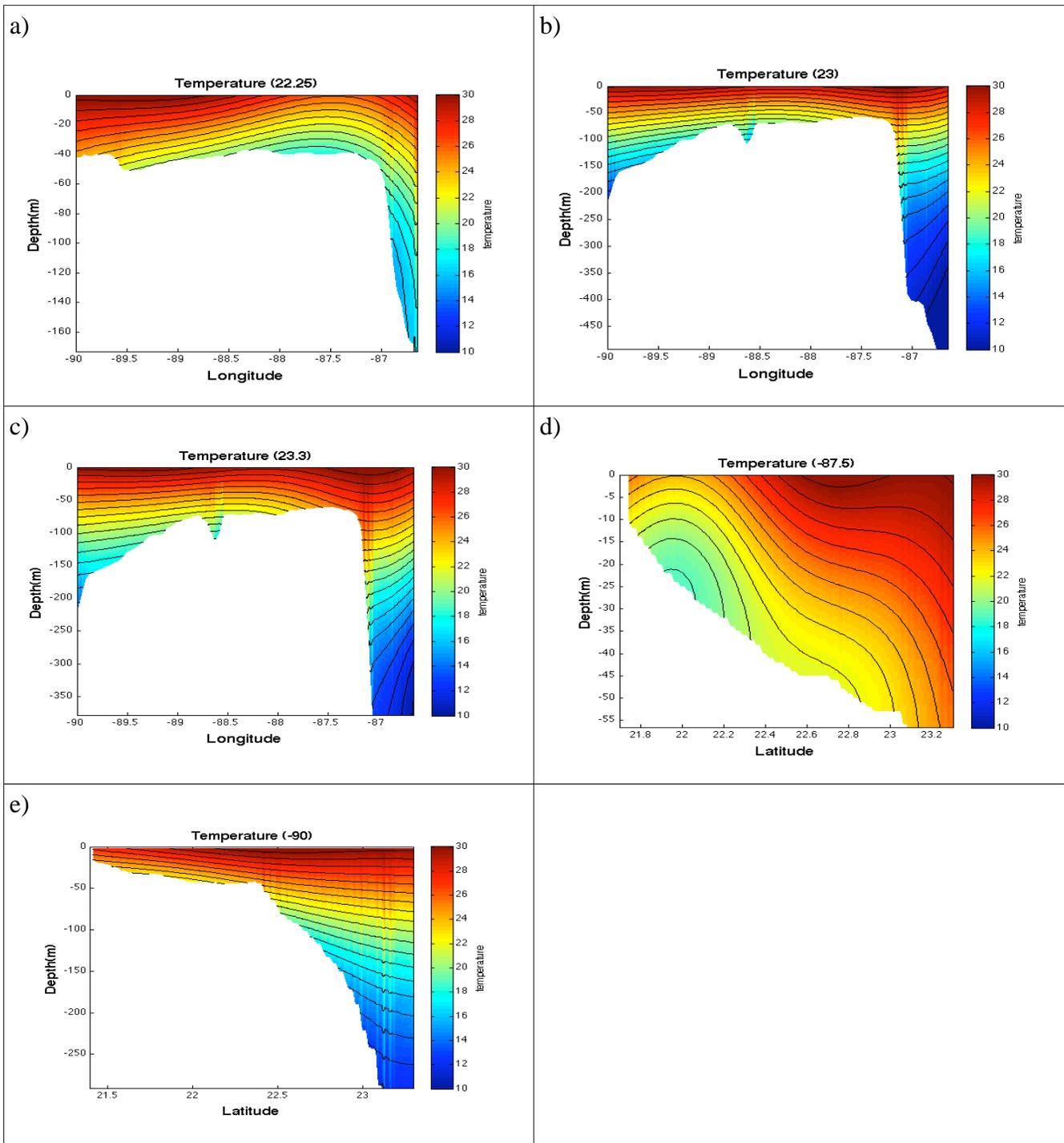


Fig. 6. a) Sección de temperatura a lo largo de la latitud 22.25 °N. b) Sección de temperatura a lo largo de la latitud 23 °N. c) Sección de temperatura a lo largo de la latitud 23.3 °N. d) Sección de temperatura a lo largo de la longitud 87.5 °O. e) Sección de temperatura a lo largo de la longitud 90 °O.

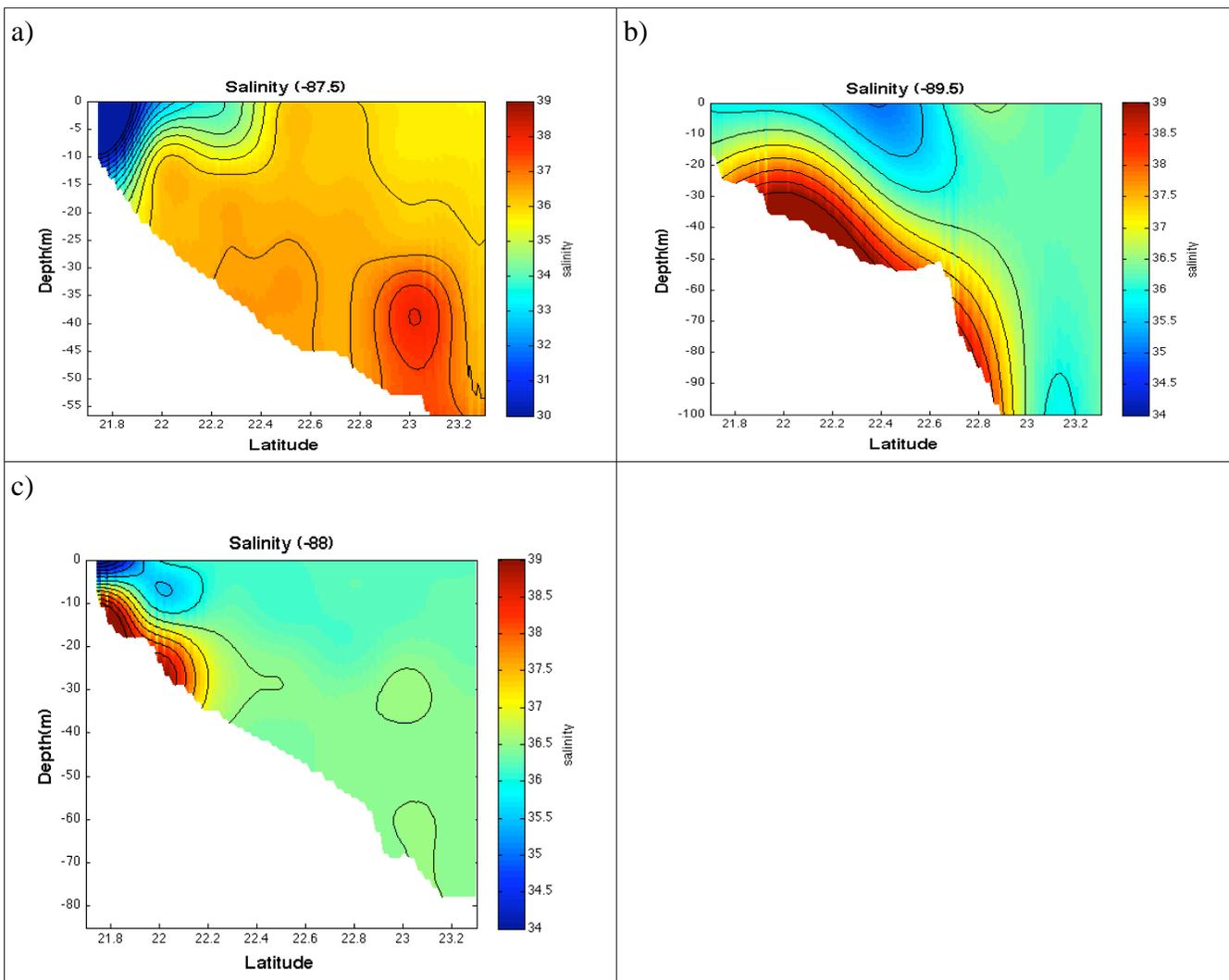


Fig. 7. a) Sección de salinidad a lo largo de la longitud 87.5 °O. b) Sección de salinidad a lo largo de la longitud 89.5 °O. c) Sección de longitud a lo largo de la longitud 88 °O.

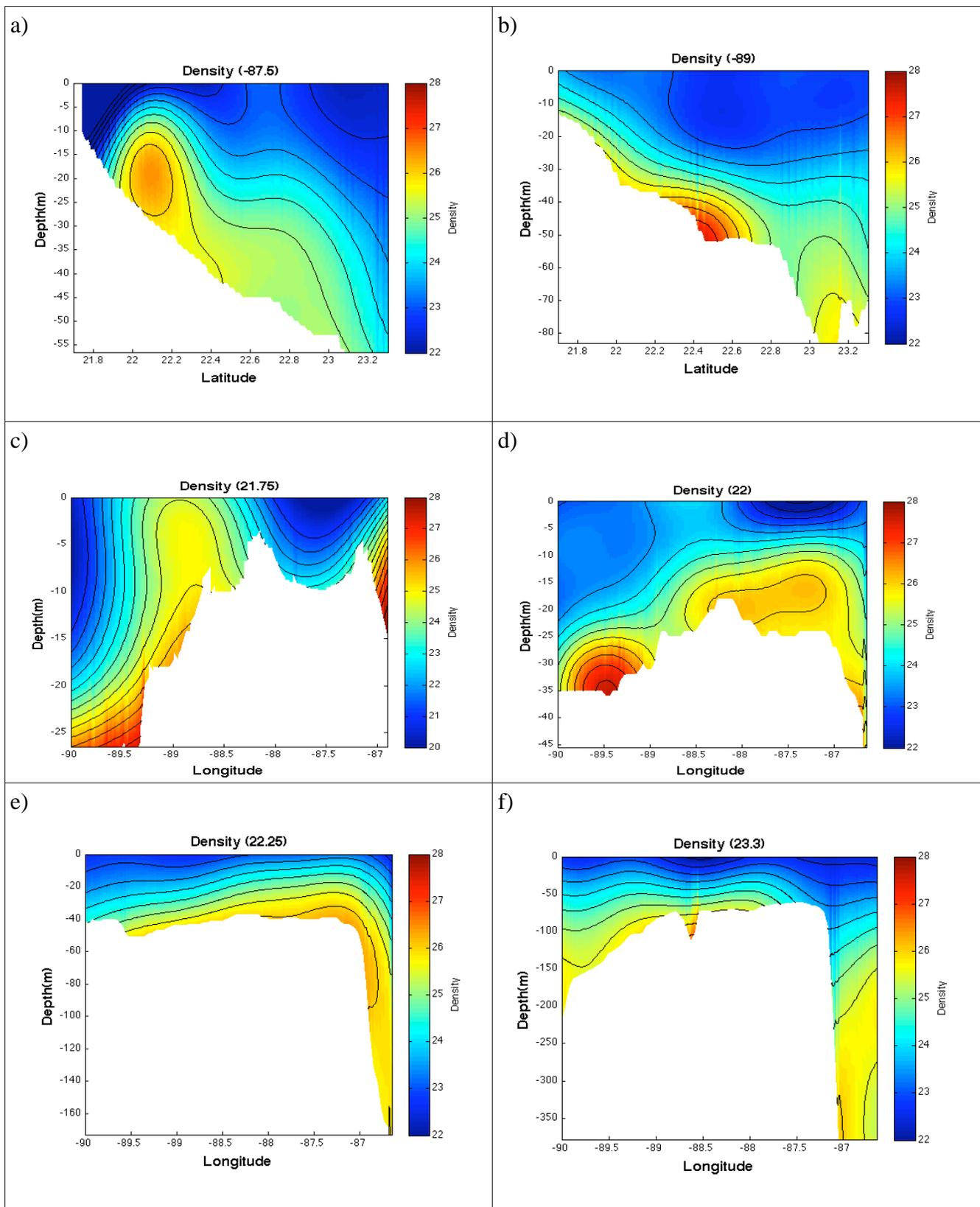
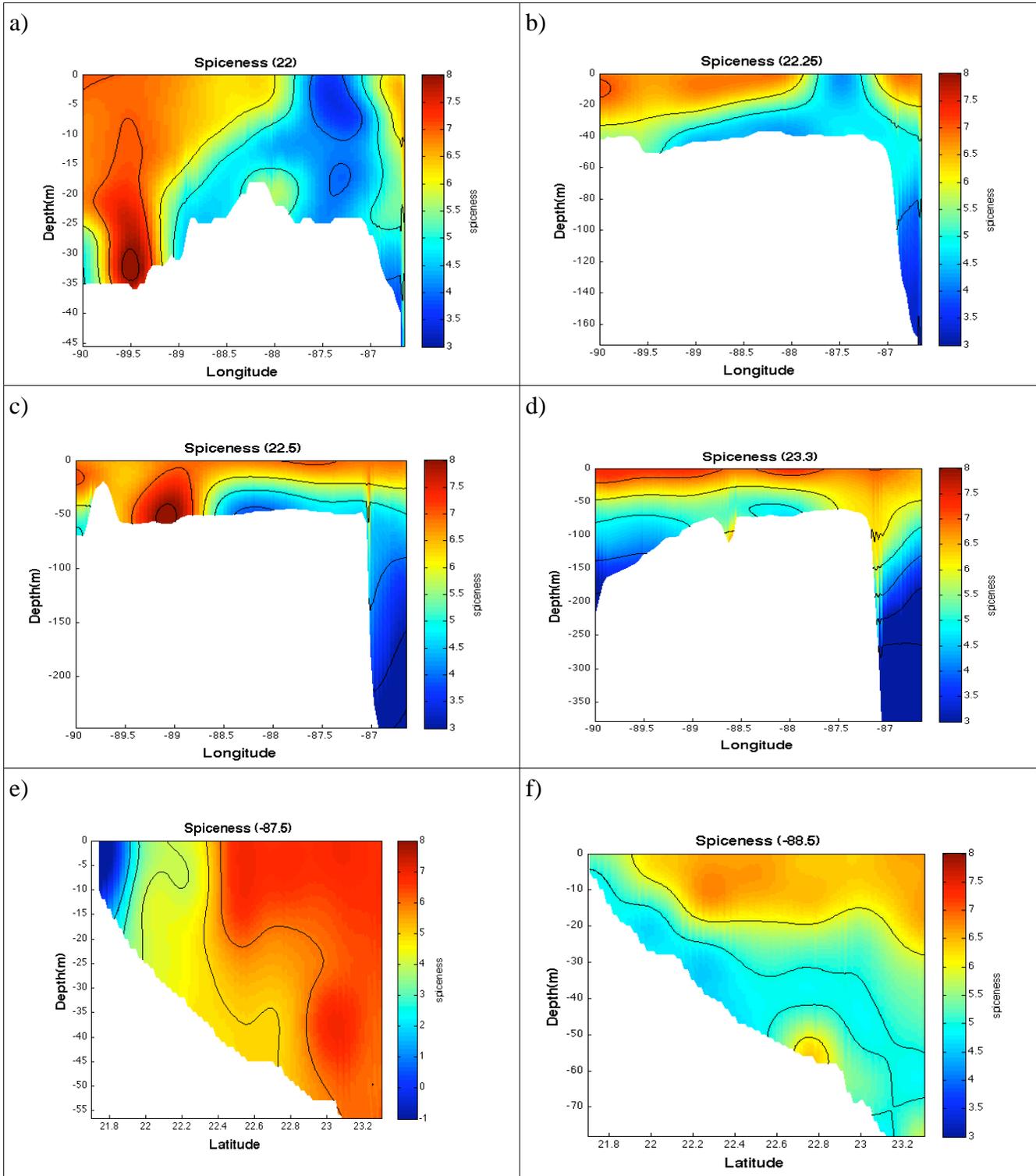


Fig. 8. a) Sección de densidad a lo largo de la longitud 87.5 °O. b) Sección de densidad a lo largo de la longitud 89 °O. c) Sección de densidad a lo largo de la latitud 21.75 ° O. d)

Sección de densidad a lo largo de la latitud 22 °N. e) Sección de densidad a lo largo de la latitud 22.25 °N. f) Distribución de densidad a lo largo de la latitud 23.3 °N.



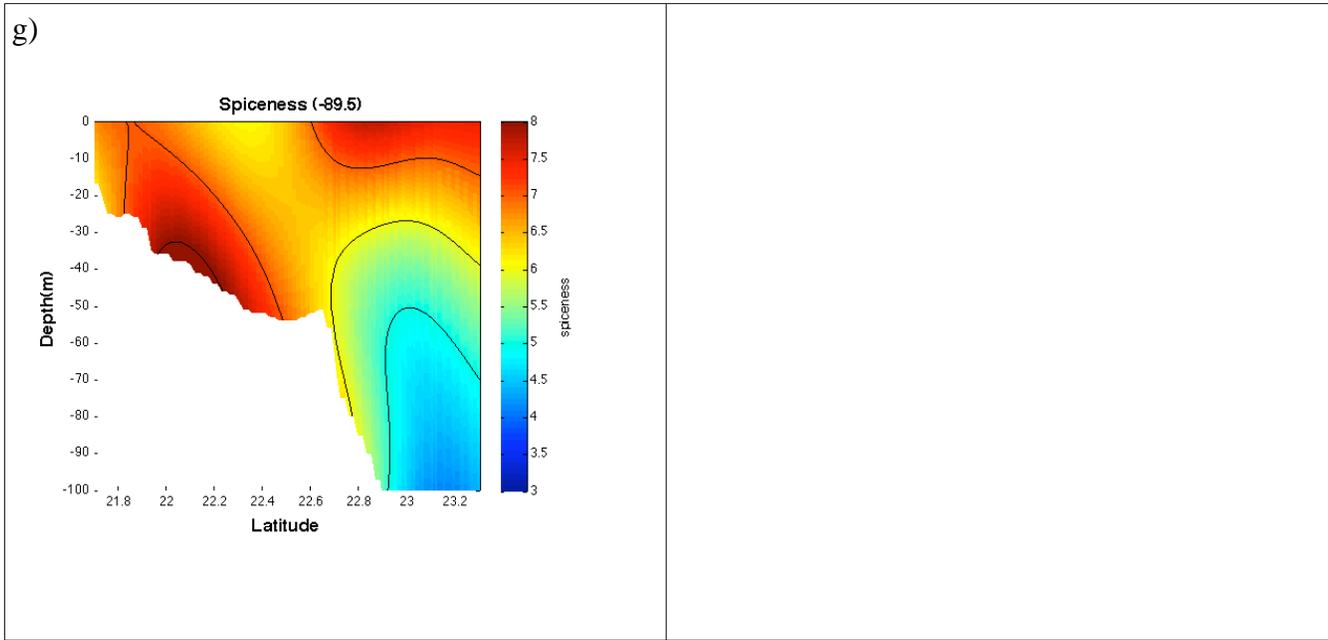


Fig. 9. a) Sección de “spiciness” a lo largo de la latitud 22 °N. b) Sección de “spiciness” a lo largo de la latitud 22.25 °N. c) Sección de “spiciness” a lo largo de la latitud 22.5 °N. d) Sección de “spiciness” a lo largo de la latitud 23.3 °N. e) Sección de “spiciness” a lo largo de la longitud 87.5 °O. f) Sección de “spiciness” a lo largo de la longitud 88.5 °O. g) Sección de “spiciness” a lo largo de la longitud 89.5 °O.

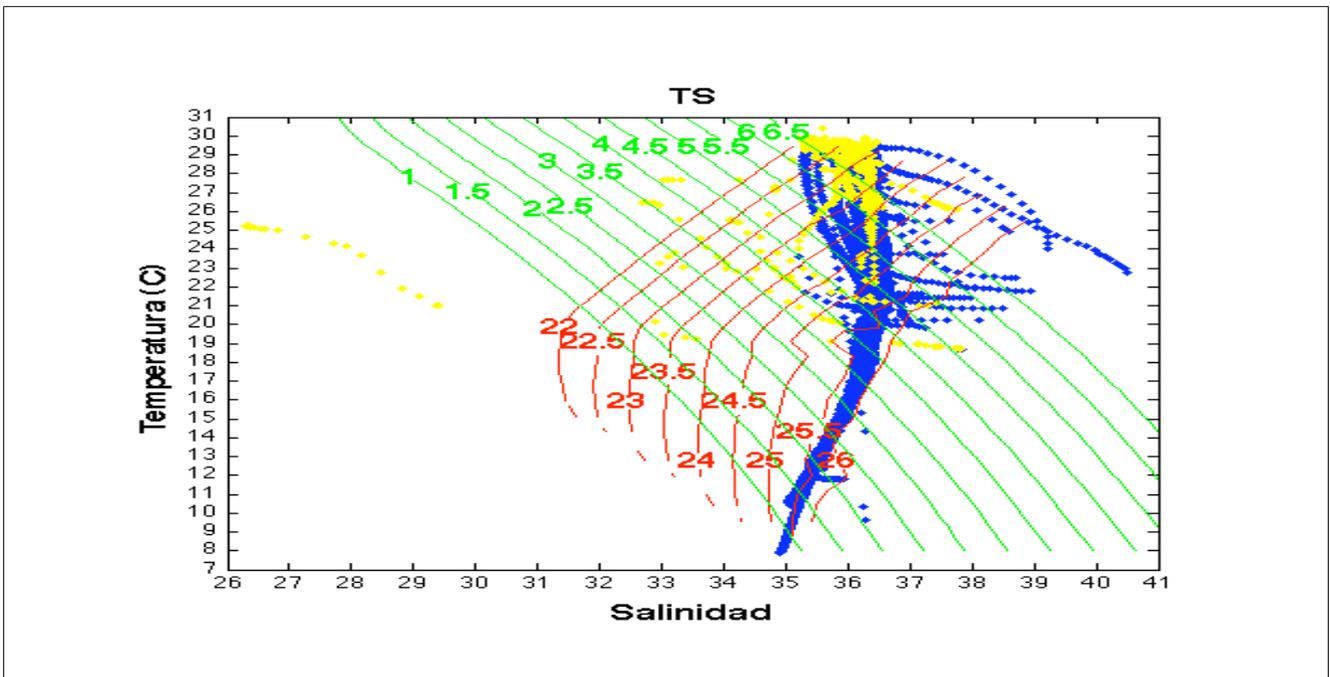


Fig. 10. Diagrama TS de la PCY. Los puntos amarillos corresponden a los primeros diez m de profundidad mientras que los azules a las mediciones en la columna de agua. Las isolíneas verdes corresponden a las mediciones de “spiciness” y las isolíneas rojas corresponden a las mediciones de la densidad.

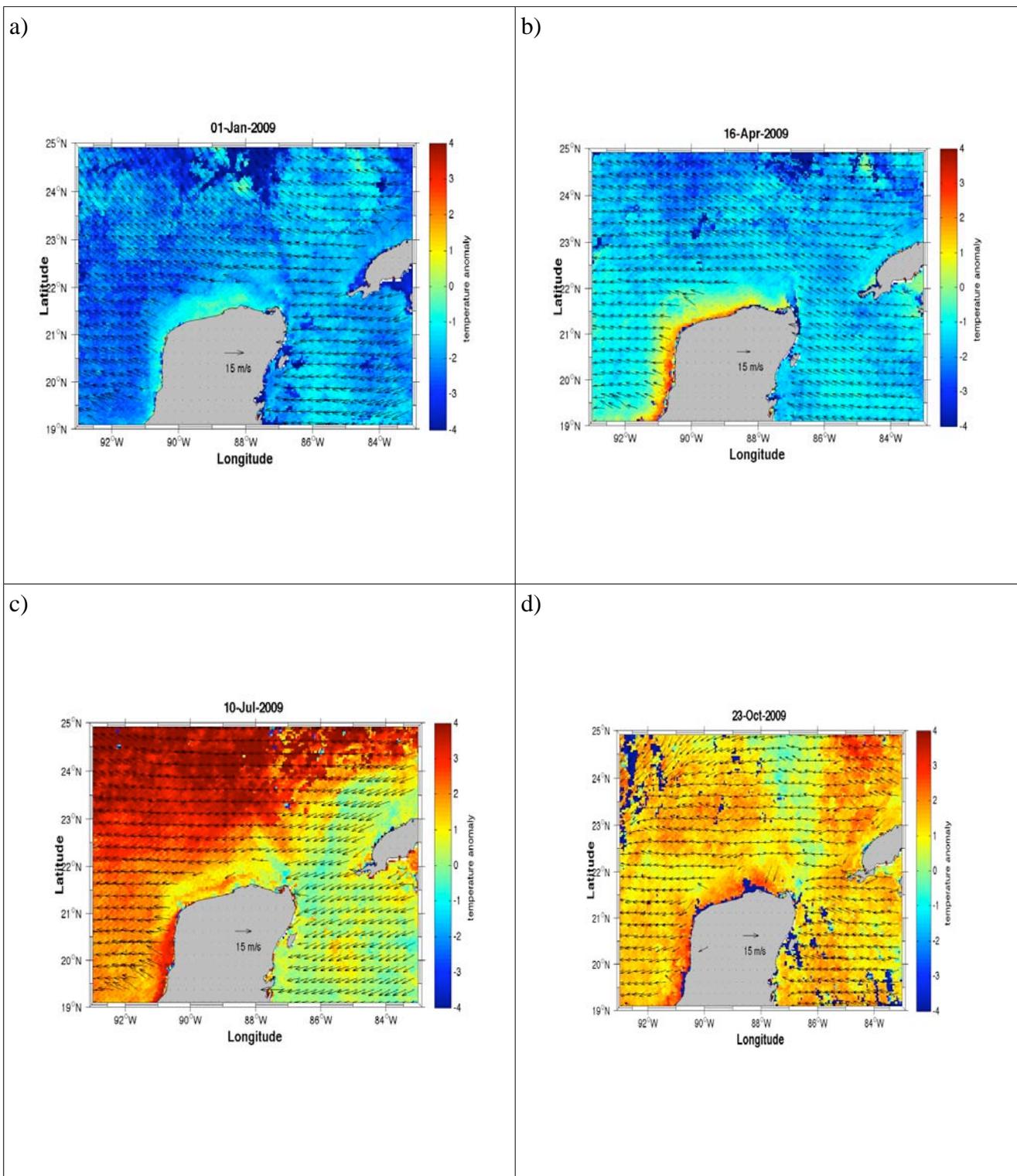


Fig. 11. a,b,c,d) Mapa de la anomalía de temperatura para el mes de enero, abril, julio y octubre respectivamente. Los vectores representan el esfuerzo del viento a 10 m de altura sobre el nivel del mar.