

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

La capa mezclada en la zona de la entrada del Golfo de California y del Pacífico adyacente

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
OCEANÓLOGO

PRESENTA:
ALMA CAROLINA CASTILLO TRUJILLO

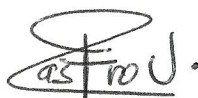
ENSENADA, B.C.
DICIEMBRE DEL 2010

**La capa mezclada en la zona de la entrada del
Golfo de California y del Pacífico adyacente**

**TESIS
QUE PRESENTA**

Alma Carolina Castillo Trujillo

Aprobada por:



Dr. Rubén Castro Valdez
Presidente del Jurado



Dr. Reginaldo Durazo Arvizu
Sinodal Propietario



Dr. Manuel Figueroa Rodríguez
Sinodal Propietario

RESUMEN

Con base en datos de alta resolución espacial (< 1 m, ~ 2.5 km) obtenidos en noviembre de 2004 se describen las características hidrográficas de la capa mezclada en la zona de la entrada al Golfo de California y frente la península de Baja California del lado del Pacífico. La circulación se describe con observaciones directas con perfilador acústico y por cálculos geostróficos. Las corrientes en la entrada del golfo presentaron un flujo hacia fuera cerca de la península con características termohalinas del golfo y un flujo hacia dentro por la parte central y este con características de aguas tropicales y de la Corriente de California modificada en temperatura. La hidrografía mostró zonas de frentes intensos en la punta de la península y a la mitad de la entrada al golfo. Se encontró que la profundidad de la capa mezclada (PCM) varió entre ~ 20 y ~ 65 m de profundidad. Por debajo de la PCM se encontró un mínimo de salinidad (~ 33.3) en el lado del Pacífico, y en la parte este de la entrada al golfo con valores de ~ 34.3 . El máximo sub-superficial de clorofila se encontró por debajo de la capa mezclada. Las variaciones horizontales de temperatura (T) y salinidad (S) en la base de la capa mezclada en la entrada del golfo, presentaron comportamientos inversos en la zona donde ocurrió un frente halino, mientras que para la zona del Pacífico se encontró un comportamiento análogo de T y S. Los procesos de doble difusión se calcularon con el ángulo de Turner. En base a esto, la base de la capa mezclada presentó los valores más estables por doble difusión

Palabras clave: Capa Mezclada, Golfo de California, Doble difusión

Dedicatoria

A mis padres: Manuel Castillo y Alma Trujillo, mi hermana: Ilse Castillo y mi abuela Nelva Concha[†]. Ellos forman parte de lo que soy ahora y siempre.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, maestro y amigo: Dr. Rubén Castro por toda su ayuda durante la mayor parte de mi carrera, especialmente por escuchar mis opiniones y dudas durante la realización de este trabajo. Además, por su gran apoyo en todas mis ideas y proyectos.

Al Dr. Reginaldo Durazo Arvizu por enseñarme a escribir y al Dr. Manuel Figueroa Rodríguez por su entusiasta colaboración en la revisión de mi tesis. A mis amigos maestros: Dr. Antonio Martínez, Dra. Elizabeth Orellana y Oc. Gabriel Rendón, ellos me han enseñado a aprender de mis errores y cualidades. Al M.C. Víctor Godínez por su apoyo técnico y al Dr. Silvio Guido Marinone por su financiamiento en la realización de este escrito.

A los proyectos CONACYT (2005-001-25343-9) y UABC (0352) que financiaron las campañas de mediciones oceanográficas y la realización de esta TESIS. Se agradece en especial al Dr. Curtis A. Collins y Dr. Affonso Mascarenahas, así como a la valiosa participación técnica del M.C. Thomas A. Rago.

A todos los amigos que han estado y estarán en las buenas y en las malas: A Ale y Nallely: porque me enseñaron a compartir lo tangible e intangible. A coco y últimamente a coquita. A Diego, porque me enseñó a querer Ensenada. Por la playa, el kayak, los buceos, las langostas, los viajes y más. A Servando, Inés y Marcela, porque me enseñaron a ver el mar con otros ojos. A Chuy, Marco, Johnny, Habacuc, Ezzelyn, Jorge, Peinado, Jey y Belinda porque me enseñaron a disfrutar la vida y vivirla al momento. A Edwin, porque me escucha, me entiende y por todo lo que me ha enseñado y me seguirá enseñando. A todas esas personitas que han sido parte importante de mi vida durante los años en Ensenada. Luis Padrino, Luis Candela, Aacini, Juan Flores, Pancho, Mau, Omar, Xochitl, Connie, Meño, Fabi, Güero, Cata, Vanessa y casi casi, todas mis dos generaciones de oceanólogos: porrophytos y umuumunupuupuupuupuahah. A esos que ya no están con nosotros Rubensito y Carlos A. A mis amigos lejanisisisimos, Melissa YKS, Lisa Hesse y Ty Watson.

A mis amigos Tijuanaenses: Osvaldo, Oscar, José Luis, Gigio, Sandra, Fina, Grecia y Alan porque se han transformado en mis hermanos en estos últimos años a pesar de la distancia. A Adrian D por escucharme a pesar del tiempo.

A, papá, mamá, hermana, nina, Becky y toda mi familia desde Tijuana hasta Chile, porque sé que han estado, están y estarán a mi lado en todo momento.

CONTENIDO

Resumen.....	3
Dedicatoria.....	4
Agradecimientos.....	5
Contenido.....	7
Lista de Figuras.....	8
1. Introducción.....	10
2. Antecedentes.....	14
3. Objetivo.....	17
4. Datos y métodos.....	17
Procesamiento de los datos.....	19
5. Resultados.....	23
I. Distribución superficial de temperatura y salinidad a partir del instrumento UDAS.....	23
II. Masas de Agua.....	26
III. Distribución vertical de las variables hidrográficas a través de la sección A de la entrada del Golfo de California.....	28
IV. Distribución vertical de variables hidrográficas a través de las secciones B-C en la zona de transición Océano Pacífico-Golfo de California.....	32
V. Distribución horizontal de salinidad, temperatura y densidad a través de las secciones A y C.....	37
VI. Estabilidad termohalina de acuerdo a la doble difusión.....	42
VII. Patrón de corrientes obtenidas mediante ADCP y corrientes geostróficas.....	44
6. Discusión.....	47
7. Conclusión.....	55
8. Referencias.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio. Los transectos A y C fueron realizados con un CTD oscilante (Triaxus) y el transecto B por lances de CTD.....	18
Figura 2. Distribución superficial de: a) temperatura (°C) y b) salinidad de los datos del instrumento UDAS (ver sección de datos y métodos).	25
Figura 3. Diagrama T-S: (a) Transecto A (los colores indican longitud y (b) Transecto C (los colores indican latitud). ATS= Agua Tropical Superficial, AGC= Agua del Golfo de California, ACC= Agua de la Corriente de California y ASsSt= Agua Subsuperficial Subtropical.	27
Figura 4. Sección vertical de temperatura (°C) para el transecto A. La línea negra gruesa denota la profundidad de la capa mezclada.	29
Figura 5. Ídem que la figura 4 pero para salinidad.	30
Figura 6. Ídem que figura 4 pero para la anomalía de densidad (kg m^{-3}).....	31
Figura 7. Ídem que figura 4 pero para la clorofila (mg m^{-3}).....	32
Figura 8. Sección vertical de temperatura (°C) para los transectos B y C. La línea negra denota la profundidad de la capa mezclada. Los triángulos negros representan de izquierda a derecha, la zona donde los datos se acercan a la costa, la punta suroeste de la península y el comienzo de la entrada del Golfo de California.....	33
Figura 9. Ídem que figura 8 pero para la salinidad.	34
Figura 10. Ídem que la figura 4 pero para la anomalía de densidad potencial (kg m^{-3}).....	36
Figura 11. Ídem que la figura 4 pero para la clorofila (mg m^{-3}).	37
Figura 12. Distribución de propiedades termohalinas en la base de la capa mezclada a lo largo del transecto A: (a) Salinidad (Línea azul) y Temperatura (Línea verde), (b) Densidad (Línea roja) y Temperatura (Línea verde) y (c) Densidad (Línea roja) y Salinidad (Línea azul). Los ejes verticales están escalados por los coeficientes de expansión termal α) y contracción salina β) para que las fluctuaciones en temperatura y salinidad impliquen mismo efecto a la densidad.....	40
Figura 13. Ídem que la figura 12 pero para el transecto C. Los triángulos de izquierda a derecha: representan el punto donde los datos se acercan a la costa y la punta sudoeste de la península.....	41

Figura 14. Contornos del ángulo de Turner para el Transecto A. La figura se divide en 3 zonas, en morado se presentan los valores entre 90° y 45° (Inestabilidad por "salt fingering"), en amarillo entre 45° y -45° (Agua Estable) y en verde entre -45° y -90° (Inestabilidad por "difusive convection"). En los ejes horizontales se presentan la longitud ($^\circ W$) y distancia (km) en los ejes superior e inferior respectivamente. La línea color negro representa la profundidad de la capa mezclada.43

Figura 15. Ídem que la figura 14 pero para el transecto C. En el eje horizontal se presentan la distancia (km) en el eje inferior.43

Figura 16. Vectores de las corrientes promedio para los primeros 60 m de profundidad, en color negro intenso se muestran los datos tomados por el ADCP del buque. En color negro los datos obtenidos por la anomalía de la altura superficial del mar (contorno) a través del producto AVISO. a) Transectos A, B y C y b) Transectos B y C.....46

1. Introducción

La capa mezclada (CM) es una zona de interacción entre el océano y la atmósfera que se caracteriza por la presencia continua de procesos turbulentos, cuya acción nulifica –o al menos minimiza- los gradientes verticales de salinidad, temperatura y por consiguiente de densidad (Sprintall y Cronin, 2009). La CM tiene una profundidad que fluctúa aproximadamente entre 20 y 200 m, tales fluctuaciones son debidas a factores como latitud, estación del año, esfuerzo del viento, flujos de calor y condiciones energéticas de la marea y del oleaje. De igual forma la dinámica de variables no conservativas como la clorofila y el oxígeno es afectada por la variabilidad de la capa mezclada, ya que el flujo de nutrientes hacia la capa superficial está limitado por la mezcla vertical, este proceso determina la profundidad a la cual se encontrarán el máximo sub-superficial de clorofila. (Cepeda-Morales, 2010).

La interacción océano-atmósfera ocurre a través de la CM, ésta contribuye a las variaciones del clima, tanto locales como de largo período. La temperatura superficial del mar, que es aproximadamente igual que la de la CM, determina el intercambio de energía con la atmósfera. La estructura de la temperatura superficial del mar es determinada por medio de los flujos radiativos (onda corta y onda larga), transferencias de calor latente y sensible, mezcla turbulenta, advección por corrientes y difusión. Por ejemplo, en el día la superficie del mar se calienta por radiación de onda corta causando estratificación, y en la noche se enfría por radiación de onda larga, que puede dar lugar convección de aguas de la superficie incrementando la profundidad de la capa mezclada.

En latitudes medias, la CM se caracteriza por que la densidad es homogénea tanto en la horizontal como en la vertical. Al conocer el gradiente vertical de densidad se puede encontrar la profundidad de la capa mezclada (PCM) (Kara y Rochford, 2000). Existen varios criterios para determinar la PCM; Kara *et al.* (1990) determinaron gradientes verticales de temperatura y densidad desde la superficie y los compararon en diferentes zonas del océano. En este trabajo se utiliza el criterio que consideramos más apropiado para la zona y que consiste –siguiendo a Kara *et al.*, 2000- en definir, la PCM como aquella en la cual la densidad cambia 0.125 kg m^{-3} a partir de su valor en la superficie. Con base en este criterio, Tomita y Nonaka (2006), mostraron que en la parte este del Pacífico Norte ($>25^{\circ}\text{N}$), la PCM tiene valores de $\sim 100 \text{ m}$, disminuyendo a 50 m cerca de la costa.

Pocos estudios han sido realizados usando datos de alta resolución en los océanos. Rudnick y Ferrari (1999) encontraron comportamientos análogos de temperatura y salinidad en la CM a escalas de hasta 10 km . Asimismo, aún no se sabe porque en el océano existen frentes de densidad en algunas zonas, mientras que en otras ocurren frentes de densidad compensados por el efecto de la salinidad y temperatura, los cuales eliminan al gradiente de densidad. Ya que la razón de difusión molecular de calor es ~ 100 veces más que la de sal, se producen inestabilidades en una escala de tiempo y espacio muy pequeñas que generan movimientos denominados de doble difusión como “salt fingering” y “convección difusiva”. Estos procesos son importantes debido a que indican que tanto transporte sal y/o calor existe, (Collins y Chu, 1995; Schmitt, 2001) además

de que generan un incremento en densidad. Para visualizar los procesos que generan estas inestabilidades existe un parámetro denominado ángulo de Turner el cual determina si los frentes de densidad son eliminados o bien si la temperatura o salinidad están generando un efecto a la densidad que genere un frente (Bianchi, 2001). Arriba de 45° indica que la salinidad esta inestable (temperatura y salinidad disminuyen hacia abajo) y se pueden generar dedos de sal, debajo de -45° , indica que la temperatura esta inestable (temperatura y salinidad decrecen hacia abajo) y se generan oscilaciones. Finalmente entre 45° y -45° indica que la salinidad aumenta y la temperatura disminuyen hacia abajo.

A pesar de su relevancia la CM ha sido poco estudiada en el Golfo de California. Estos trabajos incluyen el uso de un banco de datos hidrográficos históricos (1939-1990), el cual se utilizó para estimar la profundidad de la capa mezclada a partir de un análisis visual de perfiles de temperatura (Martínez-Sepúlveda, 1994). Este estudio mostró que la profundidad de la capa mezclada tiene una variabilidad estacional a lo largo del golfo, donde en la porción sur del Golfo de California alcanza ~ 25 m de profundidad en noviembre, mientras que en la parte central llega hasta ~ 50 m.

Castro *et al.* (2000), a partir del análisis de datos de CTD con una resolución vertical de 1 m y espaciamiento de 10 km en la horizontal en una sección de la entrada al golfo (Fig. 1, transecto B), observaron que la capa mezclada varía desde ~ 10 m en verano hasta ~ 40 m en invierno.

Los estudios de la capa superficial en el Golfo de California y su zona adyacente son escasos; dada la importancia que el estudio de tal parámetro tiene,

en este trabajo se aborda la descripción de la relación entre la capa mezclada y las variables termohalinas en la zona de la entrada al golfo utilizando una base de datos de alta resolución.

2. Antecedentes

La entrada al Golfo de California, es una zona transicional caracterizada por la presencia de fuertes frentes generados por la confluencia del Agua del Golfo California (AGC), el Agua de la Corriente de California (ACC) y el Agua Superficial Tropical (AST) (Griffiths, 1968; Stevenson, 1970; Roden, 1971; Lavín *et al.*, 2003; Castro *et al.*, 2000). Roden (1971) sugiere que la frontera entre las masas subárticas (ACC) y el AGC ocurre frente a Cabo San Lucas y que se caracteriza por fuertes gradientes horizontales de salinidad, un adelgazamiento de la termoclina y un cambio en la profundidad de la capa mezclada. Griffiths (1965) observó que frente a Cabo San Lucas, los frentes de agua se caracterizan por presentar salinidades entre 34.0 y 35.0. En la parte central de la entrada al golfo, cerca de la plataforma de Sinaloa, Castro *et al.* (2000, 2006) y Lavín *et al.* (2009) observaron la presencia del ACC. En la boca del golfo, el AGC se localiza en la superficie como capas o núcleos de alta salinidad adyacentes a la península, aunque algunos se han detectado cerca de la plataforma continental (Roden y Groves, 1959; Roden, 1971; Castro *et al.*, 2000).

En cuanto a la circulación en la entrada al GC, Mascarenhas *et al.* (2004) reportan existela existencia de una gran variabilidad espacial, no obstante es posible definir un l flujo medio que entra al golfo principalmente por el lado de la plataforma continental y un flujo de salida por el lado de la península. Así mismo, se ha observado un domo isopícnal en la misma zona asociado a corrientes profundas que podría indicar la presencia de un remolino ciclónico (Collins *et al.*, 1997; Castro *et al.*, 2000; Mascarenhas *et al.*, 2004). Debajo de la isopícna de

1026.5 kgm⁻³ (~300-350 m de profundidad) se presentan condiciones termohalinas muy uniformes y la variabilidad estacional es muy baja o nula. Por arriba de esta isopícnica, el patrón de las propiedades termohalinas muestra cierta estacionalidad, donde el flujo hacia dentro del golfo cerca de la plataforma de Sinaloa acarrea aguas más cálidas y de salinidad relativamente baja; en cambio un flujo con aguas de mayor salinidad y relativamente menos cálidas hacia afuera del golfo ocurre cerca de la península. (Castro *et al.*, 2000 y Mascarenhas *et al.*, 2004).

Entre mayo y junio de 2004, Lavín *et al.* (2009), a través de imágenes de satélite AVHRR, observaron la presencia de filamentos que se extendieron desde el dominio de la Corriente de California hasta la entrada del Golfo, así como intrusiones de agua cálida cerca de la plataforma continental de Sinaloa acarreado ATS. La distribución de frentes térmicos y salinos se encontró bien definida entre las tres masas de agua (ACC, AGC, ATS).

En la zona adyacente a Baja California Sur, del lado del Océano Pacífico, se tiene poca información respecto a la variabilidad hidrográfica. En un crucero realizado en julio de 1995, Alvarado-Graef (1998), estudió la estructura termohalina y las corrientes geostróficas, donde encontró una zona delimitada por gradientes fuertes de salinidad entre Cabo San Lucas y parte de la entrada al golfo, indicando la presencia de distintas masas de agua. Con datos hidrográficos entre 1998-2002, Cerezo-Mota (2002) estudió la estructura termohalina frente a la punta de la península de Baja California para Junio de 1998, y encontró un remolino anticiclónico que acarrea aguas tibias ecuatoriales, responsable del hundimiento de la CC. En el sur de la CC se ha encontrado ATS con $T > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y

S<34. (Badán-Dangón, 1998). Brunius (2006), encontró una intrusión anómala de aguas subárticas a ~100 km de Punta Eugenia desde Julio del 2002 hasta Abril del 2003, la presencia de esta intrusión al parecer todavía se encontró hasta Mayo del 2004. Recientemente, Cepeda-Morales (2010) estudió la región del Pacífico al sur de la Península de Baja California y determinó que las corrientes en la zona modifican la picnoclina y dan lugar a una entrada de nutrientes en la capa mezclada puesto que hay movimientos verticales de aguas sub-superficiales.

3. Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo general describir y analizar la relación entre las variables termohalinas y la profundidad de la capa mezclada, utilizando para ello datos de alta resolución espacial colectados en la zona de la entrada al Golfo de California y frente a la costa pacífica de la Península de Baja. Usando el mismo conjunto de datos se plantea como objetivo también hacer la descripción del patrón de circulación en la entrada al Golfo de California.

4. Datos y Método

Los datos utilizados en este estudio provienen de un crucero oceanográfico realizado en el R/V Point Sur entre el 15 y el 19 de noviembre de 2004. El área de estudio comprende la porción sur del Golfo de California y el Pacífico ayacente, en la cual se tomaron datos en 3 transectos hidrográficos (Fig. 1): la sección A, localizada aproximadamente a los 23° 50' N, la sección B ubicada entre Cabo Pulmo y El Dorado Sinaloa, y la sección C que cubrió parte de la zona frente a la punta de la Península y hasta ~24.5° N por el oeste de la península de Baja California.

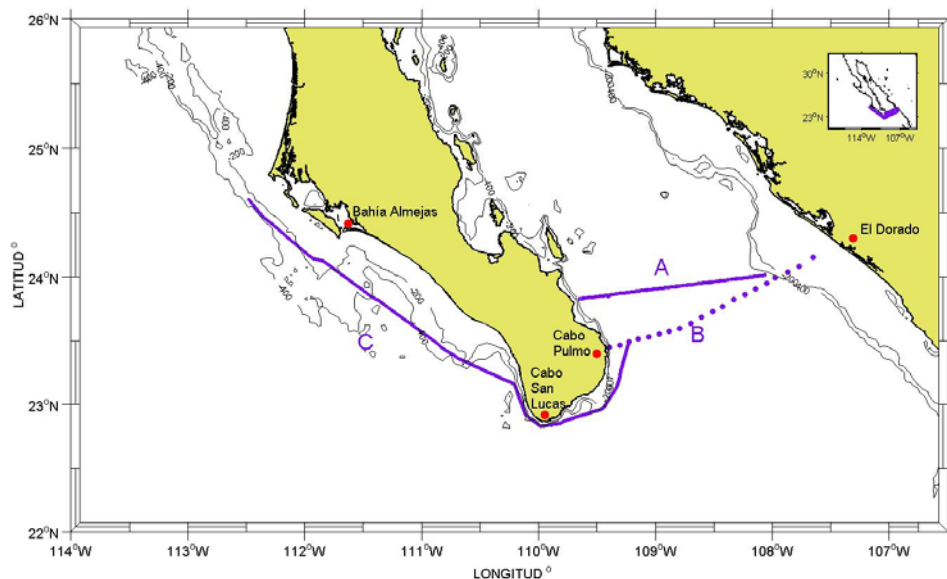


Figura 1. Área de estudio. Los transectos A y C fueron realizados con un CTD oscilante (Triaxus) y el transecto B por lances de CTD.

Los datos fueron obtenidos mediante cuatro instrumentos oceanográficos:

- 1) Un instrumento llamado UDAS (*Underway Data Acquisition System*) para la medición de variables superficiales siguiendo el derrotero del barco. Este instrumento está constituido de tres módulos: GPS (*Global Position Satellite*), una base meteorológica y un termo-salinógrafo. Sistema que se encuentra colocado en la base del barco para tomar muestras de agua cada minuto a ~3 m de profundidad.
- 2) Un CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*) convencional equipado sensores de presión, temperatura, conductividad, oxígeno y fluorescencia. Con este instrumento se realizaron 20 lances hidrográficos aproximadamente cada 10 km y hasta profundidades de 1000 m.

- 3) Un instrumento denominado Triaxus, equipado con sensores de presión, temperatura, conductividad, oxígeno y fluorescencia. Este instrumento está diseñado para realizar observaciones de alta resolución (~2.5 km en la horizontal y < 1 m en la vertical), y es arrastrado por el buque al tiempo que realiza un movimiento ondulante lo que le permite perfilar la columna de agua. La profundidad máxima de medición fluctuó alrededor de los 120 m.
- 4) Un ADCP (*Acoustic Doppler Current Profile*) instalado en el casco del buque, el cual permite realizar perfiles verticales de velocidad.

Los instrumentos UDAS y ADCP se utilizaron en todas las secciones (A, B, C), el CTD sólo en la sección B, y el Triaxus en las secciones A y C. La sección A fue muestreada del 14 al 15 de noviembre, la sección B los días 15 y 16 de noviembre, y la sección C del 16 al 19 de noviembre, en el año 2004.

Procesamiento de los datos

Una vez recopilados, todos los datos de todos los instrumentos fueron posteriormente pasados por un proceso de control de calidad en la *Naval Postgraduate School* de Monterey, California, y finalmente almacenados para su análisis, para mayor referencia ver (Alguna referencia a un reporte de datos?).

Para investigar la variabilidad espacial y detectar contrastes en los parámetros hidrográficos se realizaron gráficas de contornos de densidad,

temperatura, salinidad y clorofila. Las diferentes masas de agua presentes en la zona de estudio fueron identificadas mediante el uso de diagramas T-S y siguiendo los rangos termohalinos propuestos en Castro *et al.* (2006) y Lavín *et al.* (2009).

Para estimar la profundidad de la capa mezclada (PCM) en la columna de agua, se utilizó el método de Kara *et al.* (2000). Este procedimiento se basa en encontrar la profundidad a la cual el valor de la densidad en la superficie cambia un determinado valor $\Delta\gamma_t$ ($\gamma_t = \rho(s, t) - 1000$ es la anomalía de densidad en kgm^{-3}), ya que se supone que en la capa mezclada los gradientes verticales de densidad son nulos o muy pequeños (Sprintall y Cronin, 2009). La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$\Delta\gamma_t = \Delta\gamma_t(T + \Delta T, S, P) - \gamma_t(T, S, P)$$

Donde $\Delta\gamma_t = 0.125 \text{ kgm}^{-3}$, T es la temperatura, S es la salinidad y P es la presión (Kara *et al.*, 2000).

La densidad de la columna de agua depende de la temperatura, la salinidad y la presión. Para obtener el efecto de la temperatura y la salinidad con la densidad, se utilizó el ángulo de Turner (estaría bien poner la referencia original), el cual muestra la influencia relativa de la temperatura y salinidad sobre la estabilidad termohalina, es decir nos habla sobre la importancia de la temperatura y salinidad a la densidad, además es un indicador de los procesos internos y de la formación de masas de agua (Tippins y Tomczak, 2003). Ya que las variaciones en los coeficientes de difusión generan inestabilidades, el coeficiente de difusión

de la salinidad (K_s) en el agua es solo el 1% del coeficiente de difusión de la temperatura (k_t). Esta diferencia da lugar a movimientos en la parcela de agua. Es decir, aunque el sistema esté estrictamente estable en cuanto a densidad, el efecto de la difusión puede desestabilizarlo. Para definir la estabilidad de una parcela de agua de acuerdo a su doble-difusión (T, S), se utiliza el ángulo de Turner, el cual es definido como:

$$Tu = \tan^{-1}\left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z} - \beta \frac{\partial S}{\partial z}, \alpha \frac{\partial T}{\partial z} + \beta \frac{\partial S}{\partial z}\right)$$

Donde α es el coeficiente de expansión térmica y β es el coeficiente de contracción salina, T es la temperatura y S es la salinidad. Para el rango entre $-45^\circ < TU < 45^\circ$ la columna es considerada estáticamente estable; mientras que para $-90^\circ < TU < -45^\circ$, la columna es inestable debido a convección difusiva ("*diffusive convection*"). Si $45^\circ < TU < 90^\circ$, la columna es inestable debido a procesos de doble difusividad, conocidos como "dedos de sal" ("*salt fingering*"). A medida que TU se acerca a 90° y -90° la parcela de agua se compensa por densidad, esto significa que la salinidad genera un efecto exactamente igual que la temperatura pero contrario y la densidad no cambia (Tippins y Tomczak, 2003).

El patrón de circulación en la zona de estudio fue obtenido a partir del análisis de los datos obtenidos con el ADCP en cada uno de los transectos (Fig. 1); en el transecto A se utilizó un ADCP de 300 kHz, mientras que en los transectos B-C la frecuencia del instrumento utilizado fue de 75 kHz. Además, para obtener una cobertura espacial mayor del patrón de circulación, fueron calculadas las corrientes geostróficas. Esto fue realizado mediante datos

satelitales de la altura del nivel del mar distribuidos por el producto AVISO (<http://www.aviso.oceanobs.com>), los cuales proporcionan promedios semanales con una resolución espacial de $1/3^\circ$ cada semana.

Para el cálculo de las corrientes geostróficas se utilizaron las ecuaciones:

$$0 = -\alpha \frac{\partial p}{\partial x} + f v,$$

$$0 = -\alpha \frac{\partial p}{\partial y} - f u.$$

Donde α es el volumen específico ($1/\rho$), p la presión hidrostática, $f = 2\Omega \sin(\varphi)$ es el parámetro de Coriolis, Ω la velocidad angular de la tierra ($7.27 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), φ la latitud, u la componente de velocidad E-W y v la componente N-S. De la aproximación hidrostática, $\frac{dp}{dz} = -\rho g$ entonces, $p = \rho gh$, substituyendo en las ecuaciones de balance geostrófico tenemos que

$$u = -\frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$v = \frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial x}$$

$\frac{\partial h}{\partial x}$, es el cambio de la altura del nivel del mar en la dirección E-W y $\frac{\partial h}{\partial y}$ es el cambio de la altura del nivel del mar en la dirección N-S.

5. RESULTADOS

I. Distribución superficial de temperatura y salinidad a partir del instrumento UDAS

En esta sección se describe el comportamiento de la salinidad y la temperatura superficial para los 3 transectos (A, B y C) obtenidos con el instrumento UDAS a lo largo del derrotero del buque (Fig. 2). A primera instancia se observa el contraste entre las aguas de temperaturas y salinidades bajas ($T \sim 24^{\circ}\text{C}$; $S \sim 34.2\text{-}34.5$, frente a la península del lado del Pacífico; Sección C) con las aguas más calientes y salinas hacia el interior del golfo ($T \sim 26\text{-}27^{\circ}\text{C}$; $S \sim 34.6\text{-}35.0$). La diferencia más notable de temperatura y salinidad conjuntas fue en la sección C a $\sim 23.25^{\circ}\text{N}$, donde presentárselos datos sugieren la presencia de un frente (Figs. 2a-b). A lo largo de la sección C, del noroeste a sureste, la temperatura y la salinidad aumentaron hacia la punta de la península entre 24.0°C a 26°C y de $34.2\text{-}34.8$. Sin embargo, al rodear la punta de la península, en el área frente a Cabo San Lucas, se observan tramos con cambios laterales de temperatura y salinidad, los cuales presentan valores relativamente altos, indicando una zona de fuertes gradientes y frentes.

En las dos secciones de la entrada (A, B) la temperatura es más homogénea que en la sección C, aunque se observó un incremento de temperatura hacia la plataforma de Sinaloa; de 26.0°C a 27°C . El cambio de salinidad en la misma zona fue más evidente (35.0 a 34.6), y se comporta de manera inversa a la

distribución de temperatura, indicando que las aguas menos saladas y más calientes se ubicaron hacia el este de la sección.

Resumiendo: los datos indican que en la superficies es más evidente el gradiente de salinidad que el de temperatura en la entrada del golfo, sin embargo, en la zona del Pacífico, el gradiente en ambas variables está bien definido. Se puede decir que desde los 24 °N hasta Cabo San Lucas, tanto la temperatura como la salinidad aumentan de la misma forma (Fig. 2).

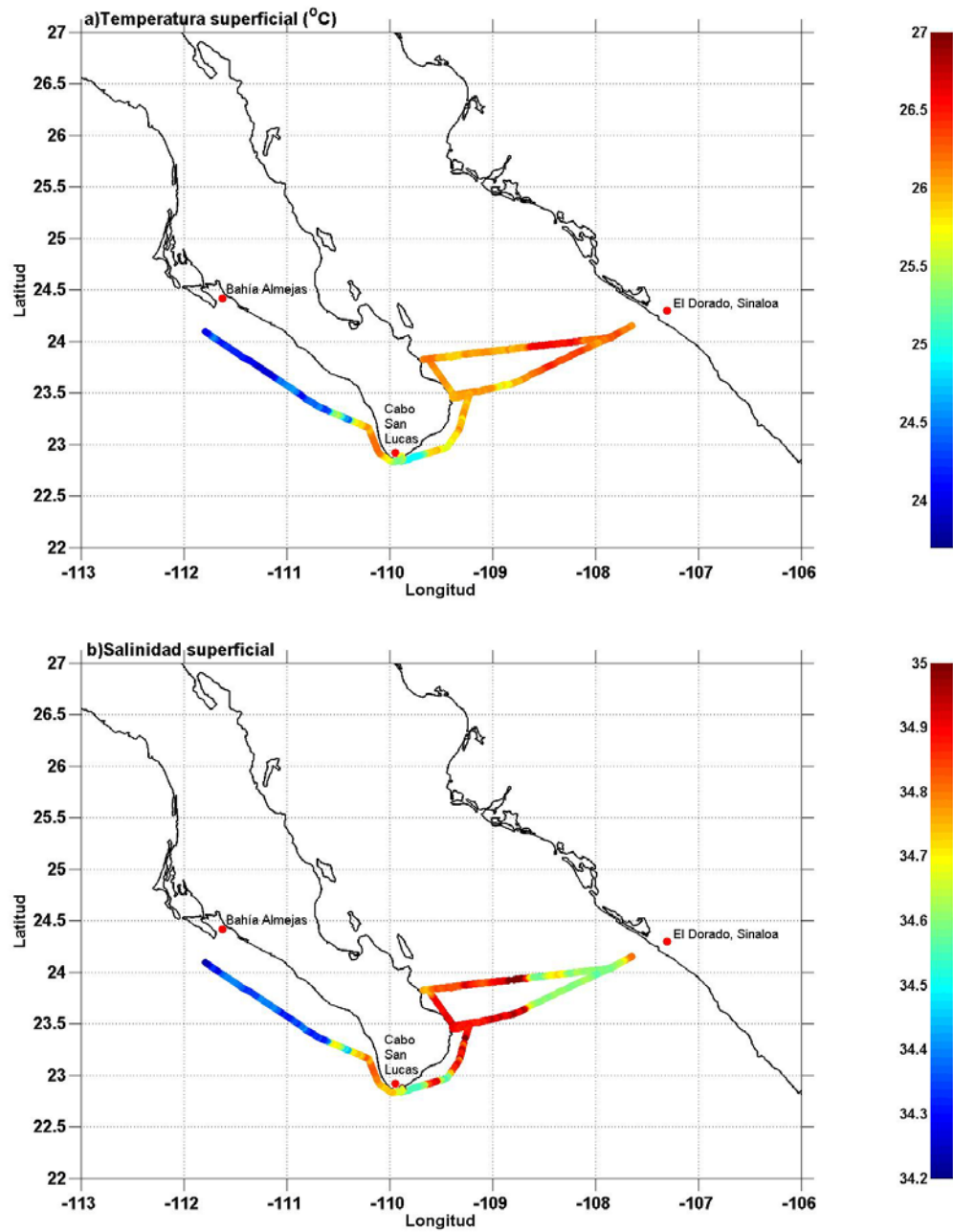


Figura 2. Distribución superficial de: a) temperatura (°C) y b) salinidad de los datos del instrumento UDAS (ver sección de datos y método).

II. Masas de Agua

El diagrama T-S para los dos transectos de alta resolución (A y C) son presentados en la figura 3. El transecto B no se incluyó debido a la similitud con el transecto A. En la figura 3a (transecto A), se detecta una separación termohalina del ATS hacia la parte este con salinidad baja (34.5-34.3), y hacia la parte oeste con salinidad mayor (34.75-34.9), donde también se detecta el AGC pero con salinidades mayores (>34.9). El Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) se encuentra bien definida y limita con valores altos de salinidad con el AGC.

En el transecto C (Fig. 3b), hay una notable presencia del ACC a medida que se incrementa la latitud, con los mínimos de salinidad alrededor de ~33.3 y de temperatura de ~16.5 °C. En las latitudes bajas, frente a la punta de la península (Fig. 1), el incremento en temperatura (máximo de ~26.3 °C) y salinidad (máximo de ~35.1) es evidente mostrando la presencia tanto del ATS como del AGC. Note que las características termohalinas del ACC se esparcen en los límites del ATS y el ASsSt, que para densidades similares, si estas aguas se encuentran juntas podrían ocasionar mezcla isopícnal (ver Castro *et al.*, 2000).

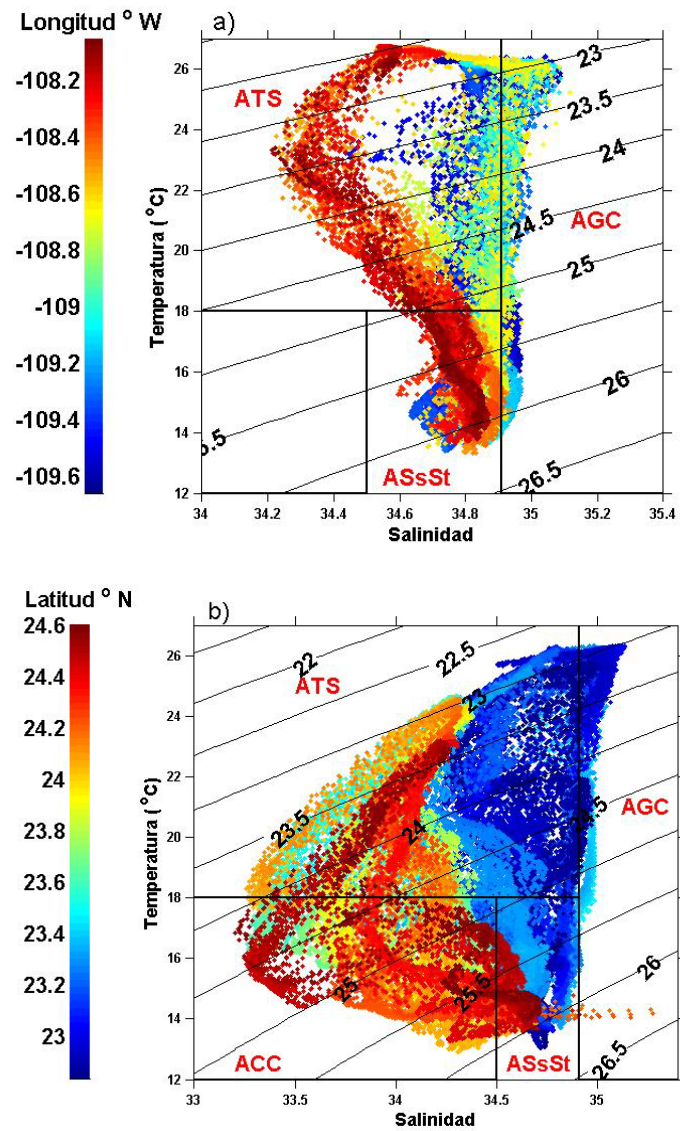


Figura 3. Diagrama T-S: (a) Transecto A (los colores indican longitud y (b) Transecto C (los colores indican latitud). ATS= Agua Tropical Superficial, AGC= Agua del Golfo de California, ACC= Agua de la Corriente de California y ASsSt= Agua Subsuperficial Subtropical.

III. Distribución vertical de las variables hidrográficas a través de la sección A de la entrada del Golfo de California.

A continuación se presentan las características termohalinas de las secciones verticales de la entrada del Golfo de California obtenidos mediante el CTD oscilante (Triaxus).

En las figuras 4-7 se presentan las secciones de temperatura, salinidad, densidad y fluorescencia del transecto A. En cada figura se incluyó -en línea negra- la Profundidad de la Capa Mezclada calculada utilizando el criterio de Kara *et al.* (2000). Es importante mencionar que este transecto fue realizado en horas de obscuridad, entre las 6:10 p. m. y las 6:46 a. m, por consiguiente no se pudieron detectar variaciones diurnas.

En la figura 4 se observa una CM bien definida en los primeros 45 m de profundidad, cuya temperatura es alrededor de los 26 °C, sin embargo, se aprecia la presencia de zonas de mayor temperatura (~26.5 °C) en ambos extremos del transecto. Por debajo de la capa mezclada se detecta una termoclina bien definida, bajo la cual la temperatura decae con la profundidad. Es interesante notar que la PCM y la termoclina es mayor cerca de la península (parte oeste de la sección).

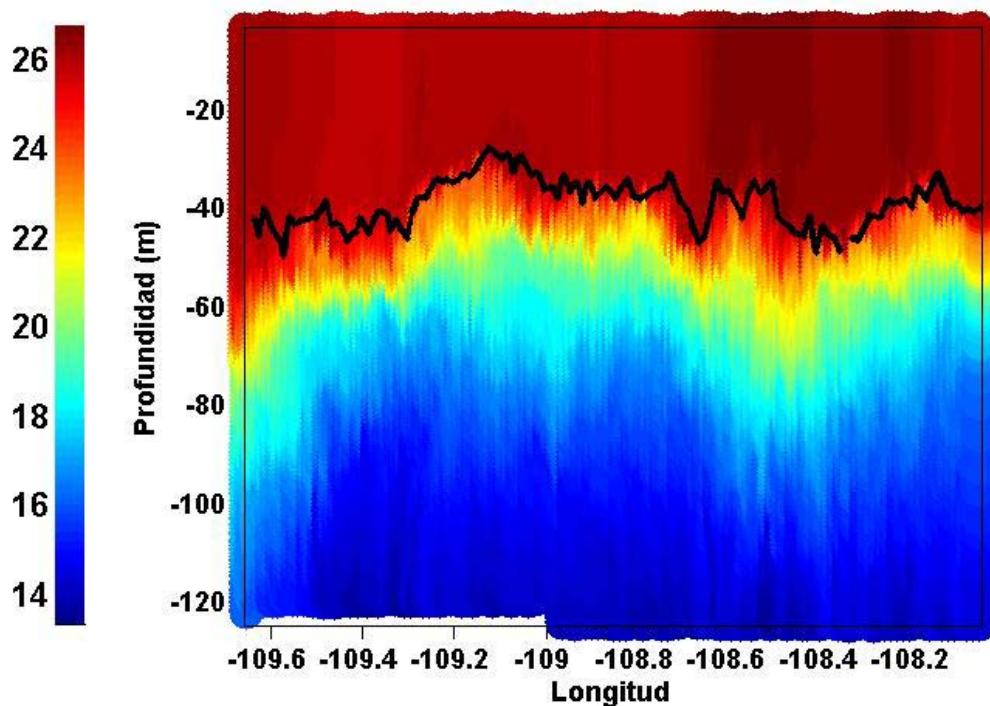


Figura 4. Sección vertical de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para el transecto A. La línea negra gruesa denota la profundidad de la capa mezclada. Este transecto fue realizado entre las 6:00 pm y las 6:46 am.

La salinidad presentó alta variabilidad a lo largo de toda la sección (Fig. 5). En la CM se observan valores relativamente bajos (~ 34.7) en el lado oeste ($\sim 109.6^{\circ}$ W) del transecto, los cuales incrementaron a 34.9 hacia el este (109.1° W), con el máximo (35-35.1) alrededor de 108.8° W. En el último tramo del transecto (108.65 - 108.1° W) se detectó un cambio brusco en salinidad, donde ésta disminuyó notablemente (34.55-34.68). En esta misma zona se observó también un incremento de temperatura (ver Fig. 3). La disminución de salinidad fue mayor debajo de la capa mezclada donde alcanzó valores hasta de 34.3 entre 40 y 70 m de profundidad. En la zona del cambio brusco en salinidad, las características termohalinas sugieren un frente entre el AGC y el AST. Por debajo de la capa mezclada se detectan núcleos de salinidad relativamente baja (34.6-34.7) sobre

todo en la parte este de la sección (109.6-109.4° W), éste mínimo y hasta los 120 m de profundidad la salinidad varía alrededor de 34.8 (Fig. 5).

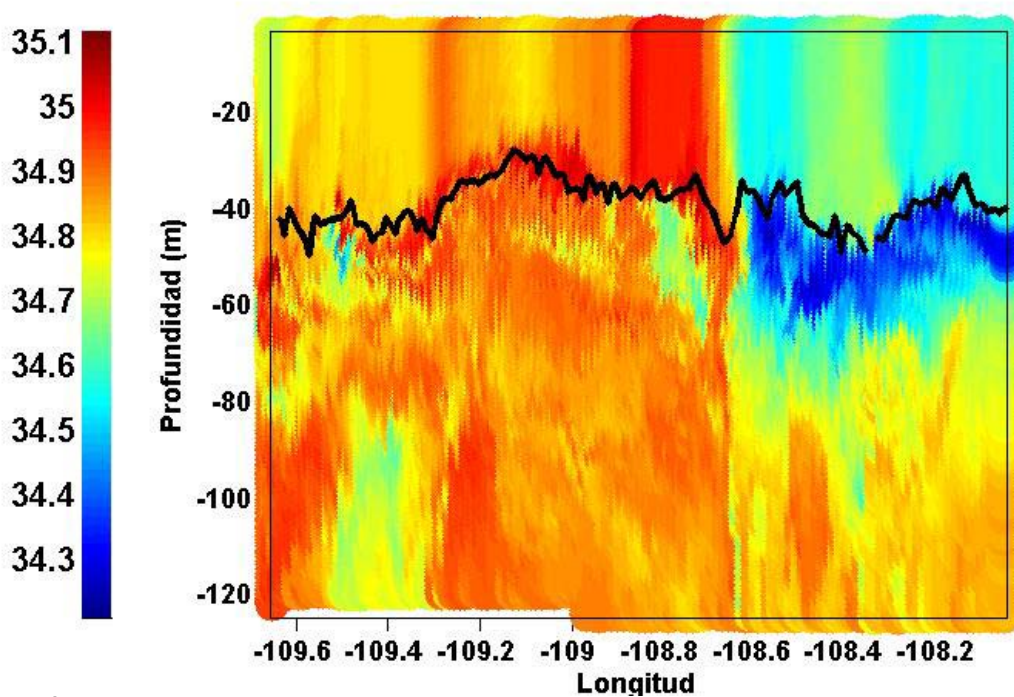


Figura 5. Ídem que la figura 4 pero para salinidad.

La densidad por arriba de la PCM es bastante homogénea (Fig. 6), a excepción de la zona ubicada al este de 108.7°W, donde esta decrece $\sim 0.5 \text{ kg m}^{-3}$ hacia el este. Este cambio concuerda con la zona del frente de salinidad que se observó en la figura 5. Por debajo de la capa mezclada se observa una pincoclina bien definida y el incremento de densidad se acentúa con la profundidad.

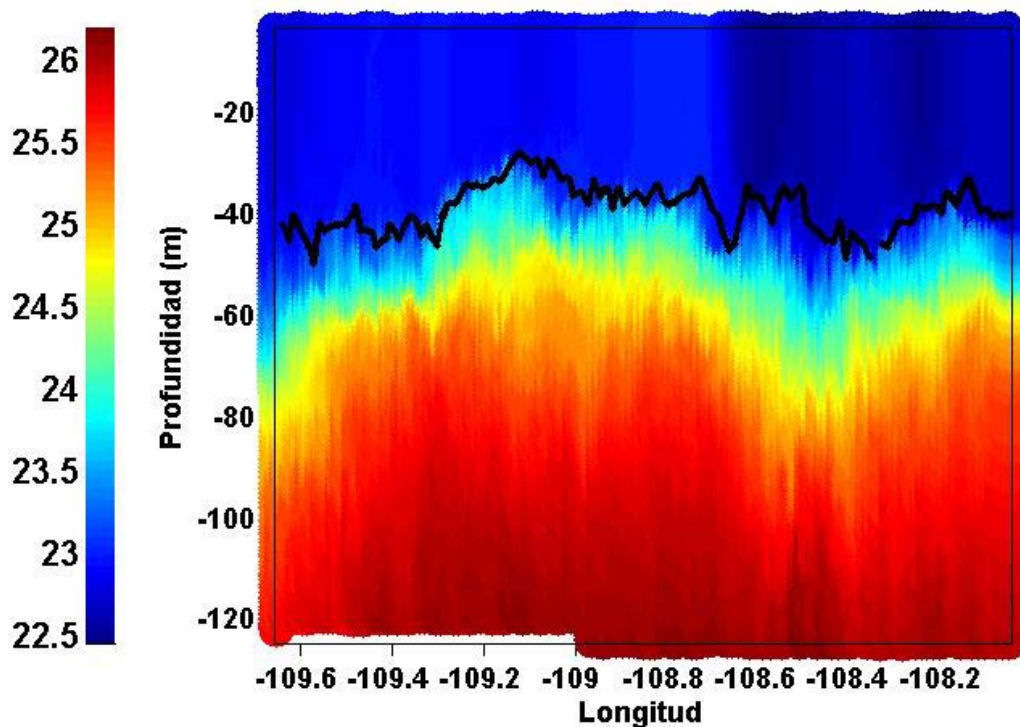


Figura 6. Ídem que figura 4 pero para la anomalía de densidad (kg m^{-3}).

La clorofila presentó una relación directa con la capa mezclada, ya que se observó un máximo sub-superficial por debajo de ésta, hay una asociación de un máximo de $\sim 3.5 \text{ mg m}^{-3}$ con la CM más angosta cerca de los -109.2°W . En la zona del frente desde -108.7°W y hasta la plataforma de Sinaloa no se observan valores mayores de 2 mg m^{-3} (Fig. 7).

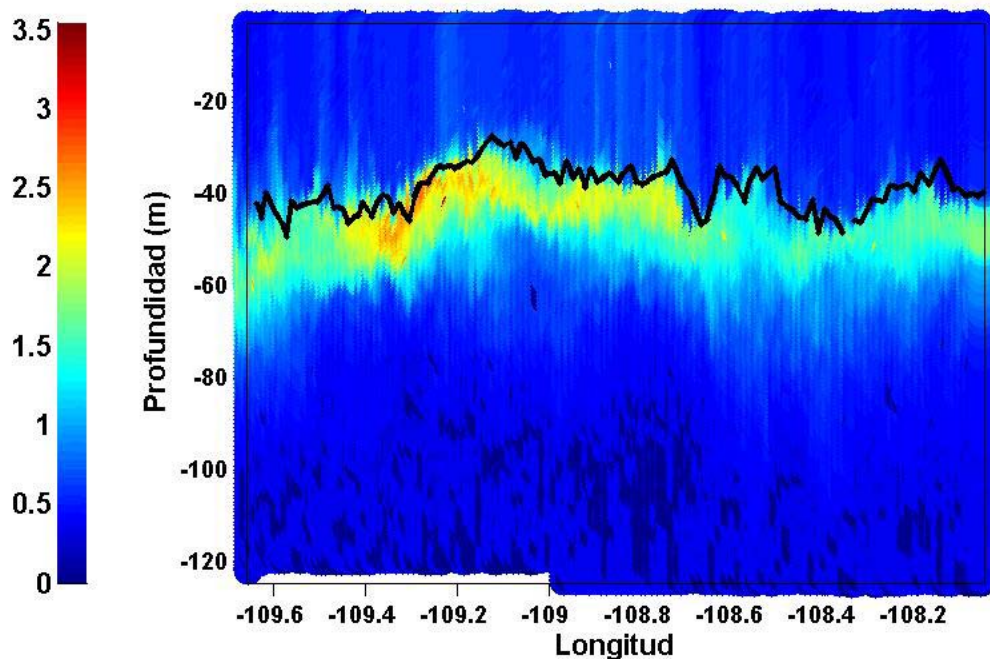


Figura 7. Ídem que figura 4 pero para la clorofila (mg m^{-3}).

IV. Distribución vertical de variables hidrográficas a través de las secciones B-C en la zona de transición Océano Pacífico-Golfo de California

Esta sección presenta la distribución vertical (0-120 m) de temperatura, salinidad, anomalía de densidad y clorofila de los transectos B y C en conjunto, para esto se unieron las observaciones de la sección B de CTD y de la sección C del Triaxus (ver Fig. 1). En las figuras se incluyó la PCM en línea negra, la hora en la que se tomaron las mediciones y la distancia desde la parte norte de la sección C hasta la parte este de la sección B, cerca de la costa de la plataforma de Sinaloa.

La distribución de temperatura a lo largo de la sección B-C se caracterizó por la existencia de una capa superficial bien mezclada, la cual alcanzó en la parte

más profunda ~65 m de profundidad, además de una termoclina bien marcada debajo de esta capa (Fig. 8). Como se puede apreciar en la figura, no se observa una diferencia significativa entre el comportamiento de la capa mezclada durante el día y la noche. Lo que sí se aprecia claramente es que la temperatura de la capa mezclada del Pacífico es más fría que alrededor de la punta de la península y en la entrada del golfo.

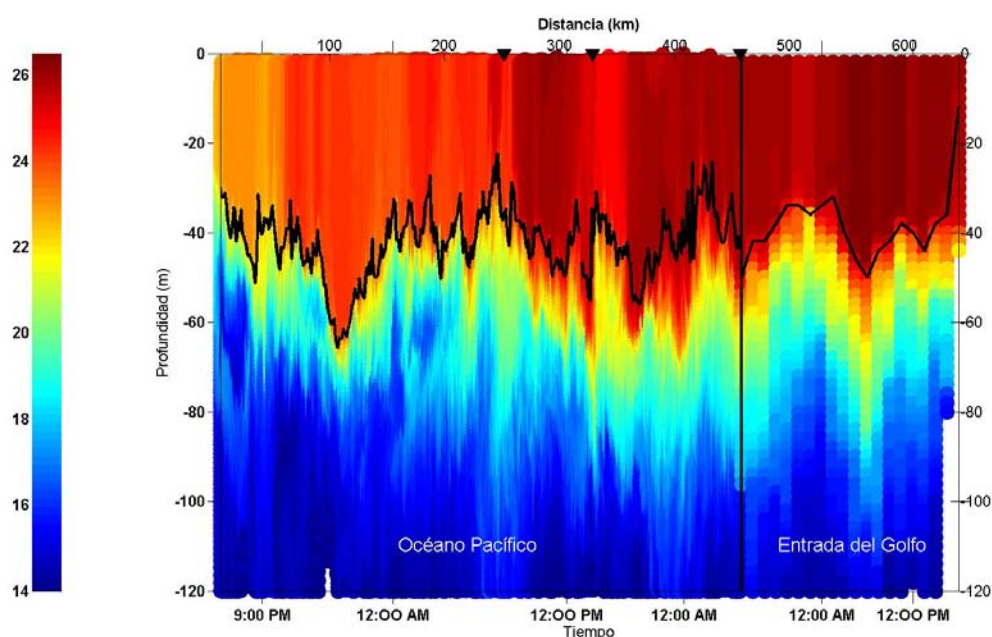


Figura 8. Sección vertical de temperatura (°C) para los transectos B-C. La línea negra denota la profundidad de la capa mezclada. Los triángulos negros representan de izquierda a derecha, la zona donde los datos se acercan a la costa, la punta suroeste de la península y el comienzo de la entrada del golfo.

Los cambios laterales en la capa mezclada se pueden dividir en zonas las cuales presentaron tramos con 'parches' de notables cambios en temperatura. Al inicio de la zona norte de la sección (0-60 km), la temperatura presentó valores bajos (~22.5-23 °C) entre la superficie y ~40 m. Entre 65 y 250 km la temperatura incrementó alrededor de 24.5 °C y la profundidad de la capa mezclada se extendió

hasta de ~65 m. Los valores en la punta de la península alcanzaron ~25 °C, y a medida que se acercan a la entrada del golfo aumentaron a más de 26 °C. Así mismo se aprecia que la termoclina es más angosta (~20 m) del lado del Pacífico que del en la entrada al golfo (~60 m).

A diferencia de la temperatura, la distribución de la salinidad presentó un patrón menos definido. A lo largo del transecto en la parte del Pacífico la PCM es evidente (Fig. 9, línea negra), así como en la parte de la entrada al golfo cerca de la plataforma de Sinaloa. Sin embargo, hay una zona frente a la punta de la península, entre 350-500 km, donde la profundidad de la capa mezclada no se detecta. Al utilizar el criterio de densidad para obtener la capa mezclada debido a que la densidad es más controlada por la temperatura que por la salinidad en esta parte, en algunas zonas en la columna de salinidad no se aprecia el cambio.

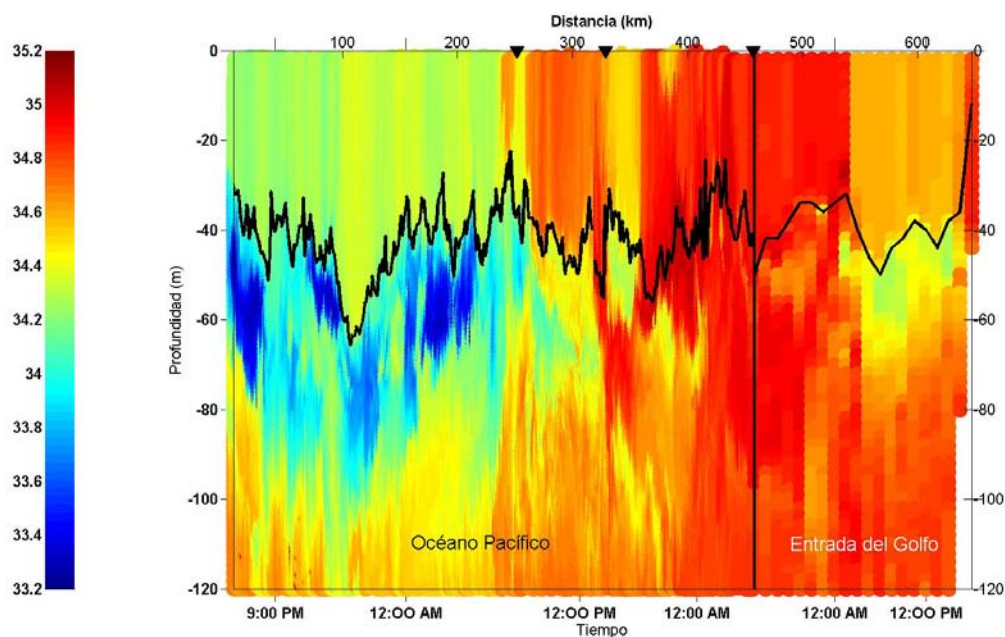


Figura 9. Ídem que figura 8 pero para la salinidad.

Por arriba de la base de la CM, en la parte más al norte del lado del Pacífico se observan pequeños cambios laterales de salinidad entre 34 y 34.2, sin embargo, a una distancia de 250 km la salinidad se incrementa drásticamente de ~34.2 a ~34.8, en la misma zona que se presentó el aumento de temperatura (Fig. 9). A la mitad de la entrada al golfo (~550 km) se observó un gradiente lateral marcado (~34.6 a ~35.0) desde la superficie hasta los 90 m de profundidad. Por debajo de la capa mezclada en la sección C del lado del Pacífico se encontró un mínimo de salinidad de ~33.2, el cual está asociado con la distribución del ACC hacia la punta de la península. Este núcleo desaparece paulatinamente de los 250 km en adelante y se localiza desde el límite inferior de la CM hasta los ~100 m de profundidad. En esta misma zona se presentó en la superficie un incremento en la salinidad. A la mitad de la entrada al golfo se observa otro mínimo de salinidad (~34.2) que se sitúa por debajo de la PCM y se relaciona con el gradiente lateral marcado de salinidad encontrado a lo largo de toda la columna. Posiblemente este mínimo este asociado al ACC (Castro *et al.*, 2000). Entre los 250 km y los 550 km los valores se sitúan alrededor de los ~35 con una zona de baja salinidad de ~34.4 exactamente en la punta de la península y otra zona de ~34.2 por debajo de la capa mezclada (Fig. 9).

El comportamiento de la densidad a lo largo de todo el transecto B-C es muy similar al de temperatura pero de manera inversa, indicando un mayor control de esta variable sobre la densidad (Fig. 10). Se distingue una capa homogénea por arriba de la capa mezclada con débiles gradientes horizontales. Destacan los valores más bajos (~22.5 Kg m⁻³) de anomalía de densidad en el último tramo cerca de la costa de Sinaloa, la cual es asociado a las Aguas Tropicales. Por

debajo de la CM, hay alta estratificación con las isopícnas más profundas a los 100 km y a los 570 km.

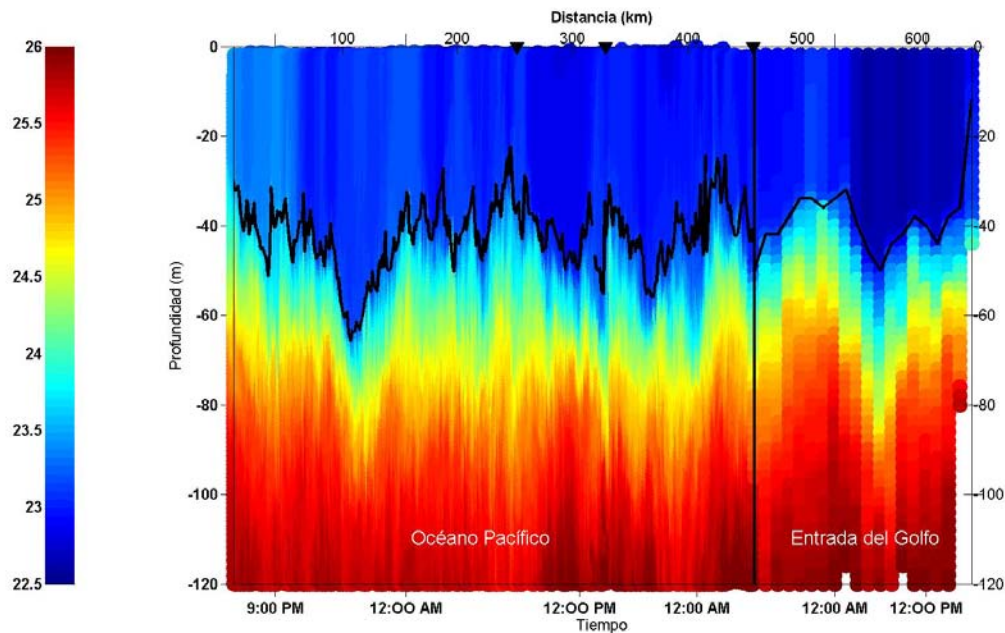


Figura 10. Ídem que la figura 4 pero para la anomalía de densidad potencial (kg m^{-3}).

La fluorescencia, la cual es relacionada a la clorofila, presentó un patrón similar respecto al comportamiento de la profundidad de la CM, en relación a las variables descritas anteriormente (Fig. 11). Por otro lado, el máximo sub-superficial de clorofila en todo el transecto B-C se encontró como un núcleo por debajo de la capa mezclada donde los valores disminuyen en la entrada del golfo y a medida que la profundidad de la capa mezclada aumenta. Los valores máximos de clorofila se observan generalmente donde la profundidad de la capa mezclada es menor, en la punta este de la península se encuentra el máximo de todo el transecto $\sim 3.5 \text{ mg m}^{-3}$. Los valores de este máximo sub-superficial disminuyen a medida que entran al GC.

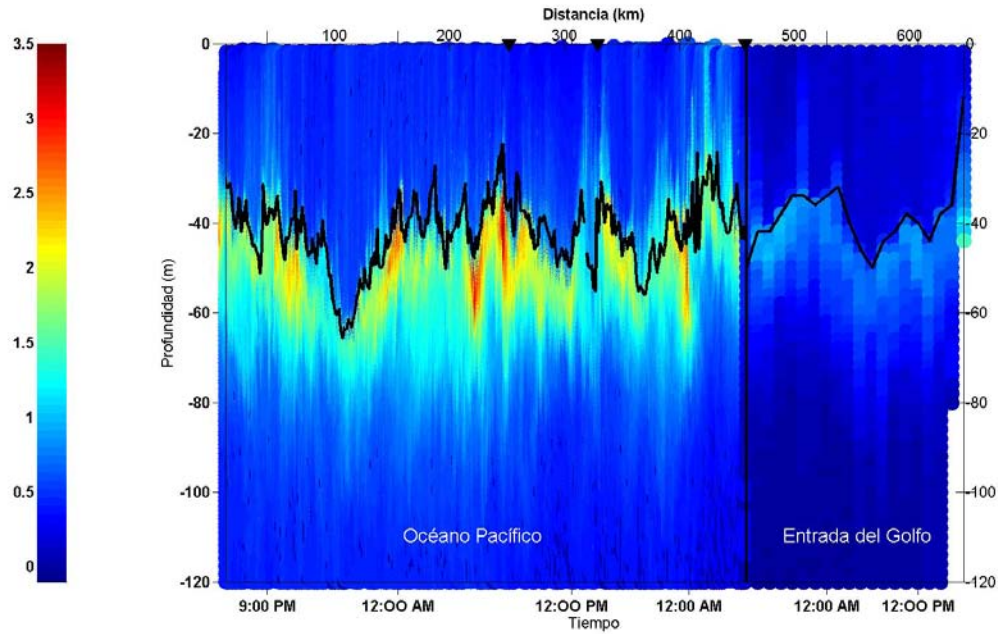


Figura 11. Ídem que la figura 4 pero para la clorofila (mg m^{-3}).

V. Distribución horizontal de salinidad, temperatura y densidad a través de las secciones A y C

Debido a las mediciones de alta resolución horizontal (~ 2.5 km) en los transectos A y C, al utilizar el instrumento Triaxus, y a la confluencia de distintas masas de agua con diferentes características termohalinas encontradas (ver sección II), se analizaron detalles de las variaciones de temperatura, salinidad y densidad en la base de la capa mezclada (Figs. 12 y 13). Para esto, las graficas de estas dos figuras cuentan con los ejes verticales escalados por el coeficiente de expansión termal y salina para que las fluctuaciones en temperatura y salinidad impliquen un efecto idéntico a la densidad.

Como se mencionó anteriormente, la presencia de frentes en los transectos es evidente (ver sección I de resultados). Puesto que las variaciones en salinidad y

temperatura contribuyen a la generación o desaparición de éstos, el frente desaparece cuando es de un lado caliente y salino y del otro lado es frío y dulce, entonces el contraste en densidad es pequeño. Por otro lado, el frente de densidad persiste cuando la mezcla vertical es baja o las diferencias termohalinas no se compensan, es decir de un lado el frente es caliente y menos salino y del otro lado es frío y salino (Rudnick & Martin, 2001).

La figura 12a presenta el comportamiento de la temperatura (T) y salinidad (S) en la base de la CM a lo largo del transecto A. Sólo en algunas partes del transecto se observa un comportamiento similar entre T y S, por ejemplo, entre 15 y 25 km, entre 85 y 90 km, sin embargo, en el resto de la sección la respuesta fue contraria, o sea, mientras la temperatura aumenta la salinidad disminuye o viceversa. Entre 0 y 100 km, la temperatura fluctuó alrededor de 26-26.3 °C, al tiempo que la salinidad mostró una tendencia a incrementar (34.75-35.0). Destaca el incremento (decremento) de temperatura (salinidad) alrededor de ~105 km, en la zona donde se observó el frente termohalino (ver sección III de resultados). En la zona del frente la temperatura incrementó de 26.2 a 26.6 °C, y se mantuvo casi constante entre 105-153 km, pero al final del transecto disminuyó a 26.3 °C. El cambio en salinidad fue más drástico, ya que disminuyó de 35.0 a 34.55 en la zona del frente, incrementó a 34.69 a una distancia de 140 km y disminuyó a 34.55 en la parte final del transecto. En la figura 12b, se graficó la temperatura y la densidad contra distancia (longitud); aunque en los primeros 100 km la temperatura no cambió mucho, es evidente que hay una respuesta del efecto de temperatura sobre la densidad. Pequeños incrementos (decrementos) de

temperatura resultan en decrementos (incrementos) de densidad. Aunque en la zona del frente se observa un decremento brusco de densidad, o es tan evidente el incremento en temperatura. Sin embargo, al graficar la densidad y la salinidad (Fig. 12c) se observa una respuesta muy similar de la densidad con la salinidad en casi en todo el transecto, especialmente en la zona del frente donde ambas variables disminuyen (0.4 kg m^{-3} y 0.5 respectivamente).

En la figura 13a se muestra el comportamiento de temperatura y salinidad en la base de la CM para el transecto C. A diferencia del transecto A, se aprecia un comportamiento similar en las dos variables, ambas incrementan y decrecen su valor a lo largo de casi toda la sección y puesto que su contribución a la densidad es contraria (la salinidad al aumentar incrementa la densidad y la temperatura al aumentar disminuye la densidad), el frente de densidad se elimina. En términos generales de norte a sur (izquierda a derecha en la figura) la salinidad y temperatura aumentaron su valor, 1 y 5 °C unidades respectivamente con un comportamiento escalonado típico de difusión por “salt fingers” o convección difusiva (ver sección VI resultados). Entre los 250 km y los 350 km se observa un comportamiento muy similar en T y S, este comportamiento se ubica 100 km al norte de la punta de la península. En las figuras 13b y 13c, se observa un comportamiento casi inverso de la temperatura y salinidad con la densidad.

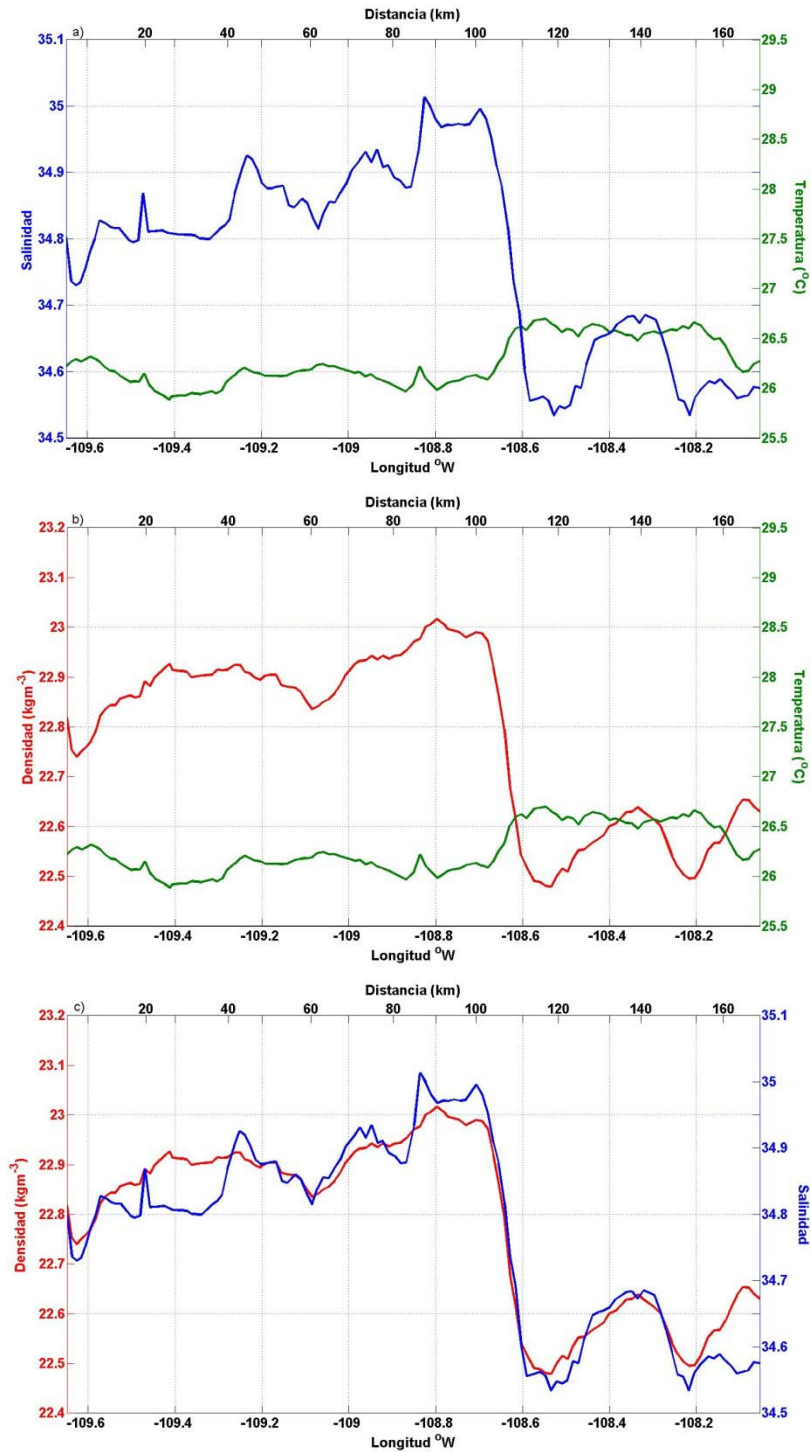


Figura 12. Distribución de propiedades termohalinas en la base de la capa mezclada a lo largo del transecto A: (a) Salinidad (Línea azul) y Temperatura (Línea verde), (b) Densidad (Línea roja) y Temperatura (Línea verde) y (c) Densidad (Línea roja) y Salinidad (Línea azul). Los ejes verticales están escalados por los coeficientes de expansión termal (α) y contracción salina (β) para que las fluctuaciones en temperatura y salinidad impliquen mismo efecto a la densidad.

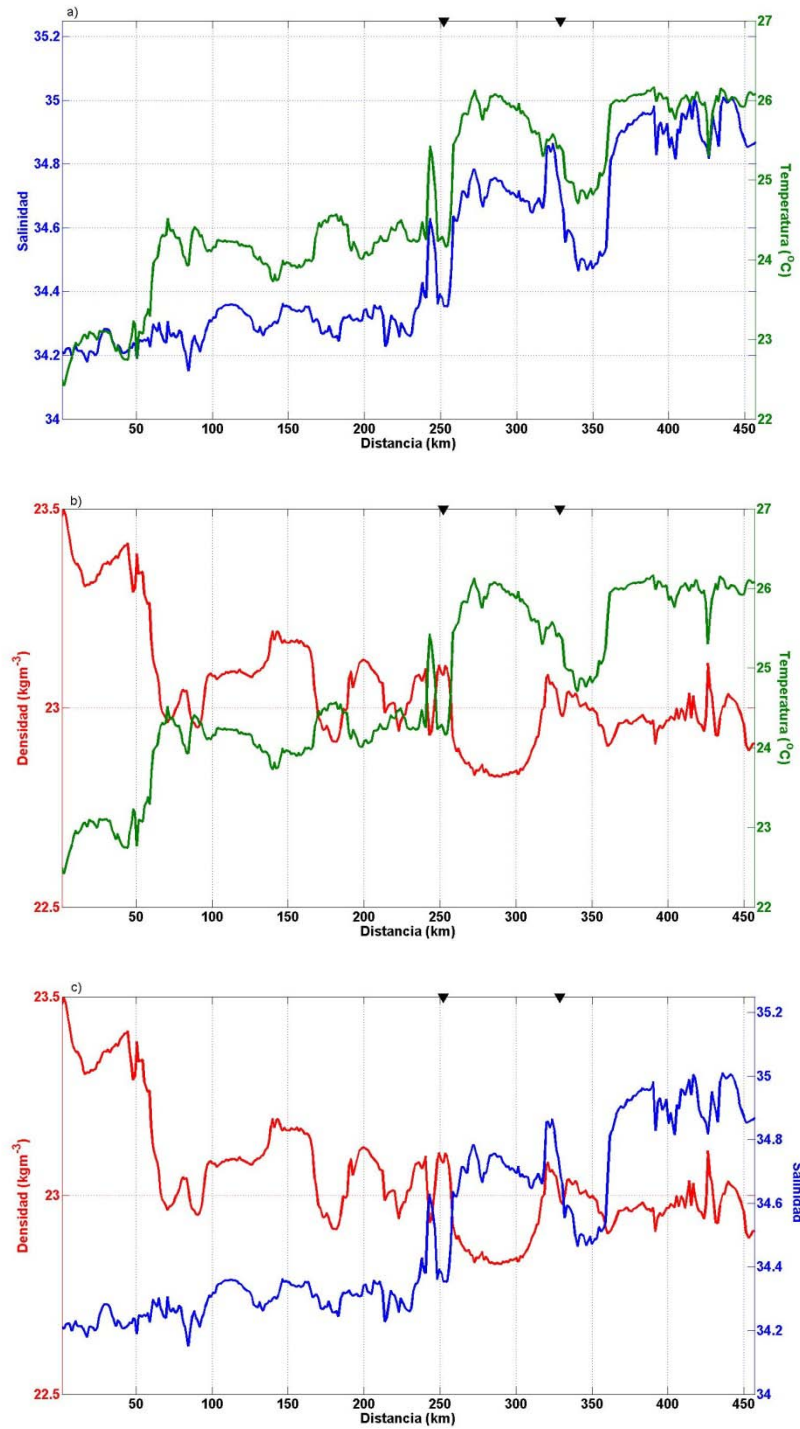


Figura 13. Ídem que la figura 12 pero para el transecto C. Los triángulos de izquierda a derecha: representan el punto donde los datos se acercan a la costa y la punta sudoeste de la península.

VI. Estabilidad termohalina de acuerdo a doble difusión

Puesto que encontramos una confluencia de masas de agua con diferentes características termohalinas, es importante mostrar que procesos de difusión de temperatura y salinidad se están llevando a cabo en la capa mezclada. Para esto se hicieron gráficas del ángulo de Turner (Tu°), éste parámetro sirve para discriminar el origen de la estabilidad de la columna de agua de acuerdo al comportamiento de la salinidad y temperatura con respecto a la densidad. (Bianchi, 2001).

En el transecto A se observa una diferencia en color en la base de la CM, por arriba de esta se encuentran valores menores a -45° , y por arriba de esta la mayor parte de los datos se encuentran mayores a 45° . (Fig 14) El transecto C presenta la mayor parte de los datos debajo de 45° , indicando que los procesos de doble difusión indican en su mayoría estabilidad y convección difusiva.

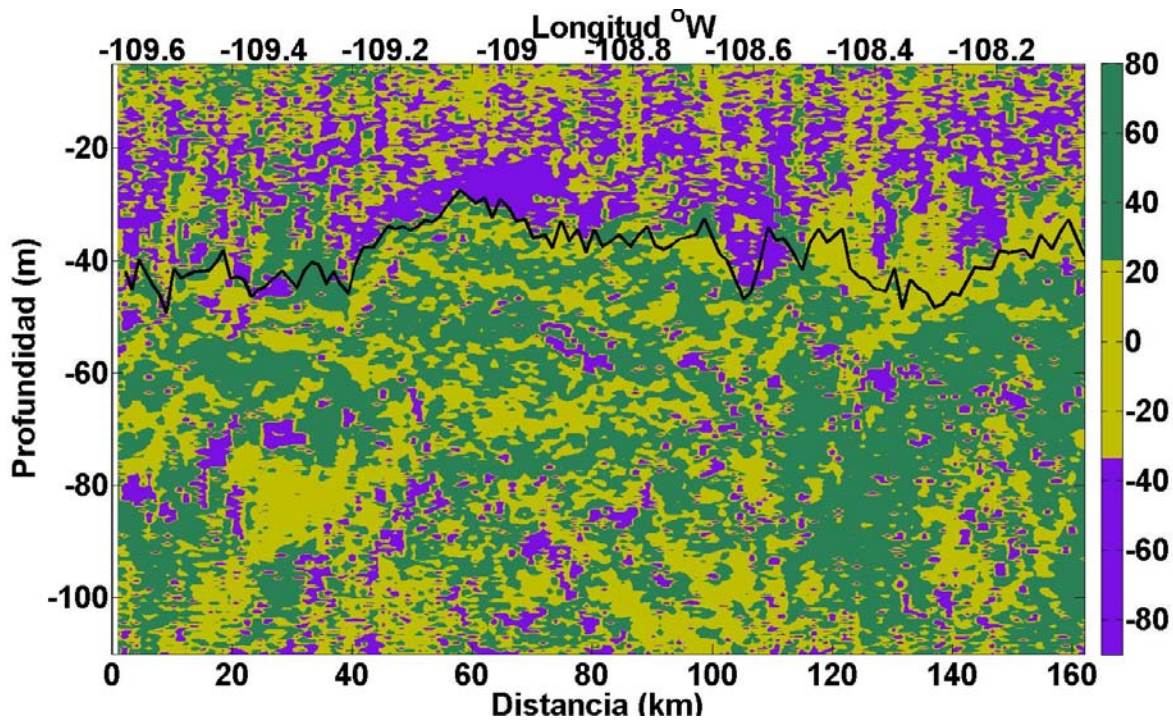


Figura 14. Contornos del ángulo de Turner para el Transecto A. La figura se divide en 3 zonas, en verde se presentan los valores entre 90° y 45° (Inestabilidad por "salt fingering"), en amarillo entre 45° y -45° (Agua Estable) y en morado entre -45° y -90° (Inestabilidad por "convección difusiva"). En los ejes horizontales se presentan la longitud ($^\circ\text{W}$) y distancia (km) en los ejes superior e inferior respectivamente. La línea color negro representa la profundidad de la capa mezclada.

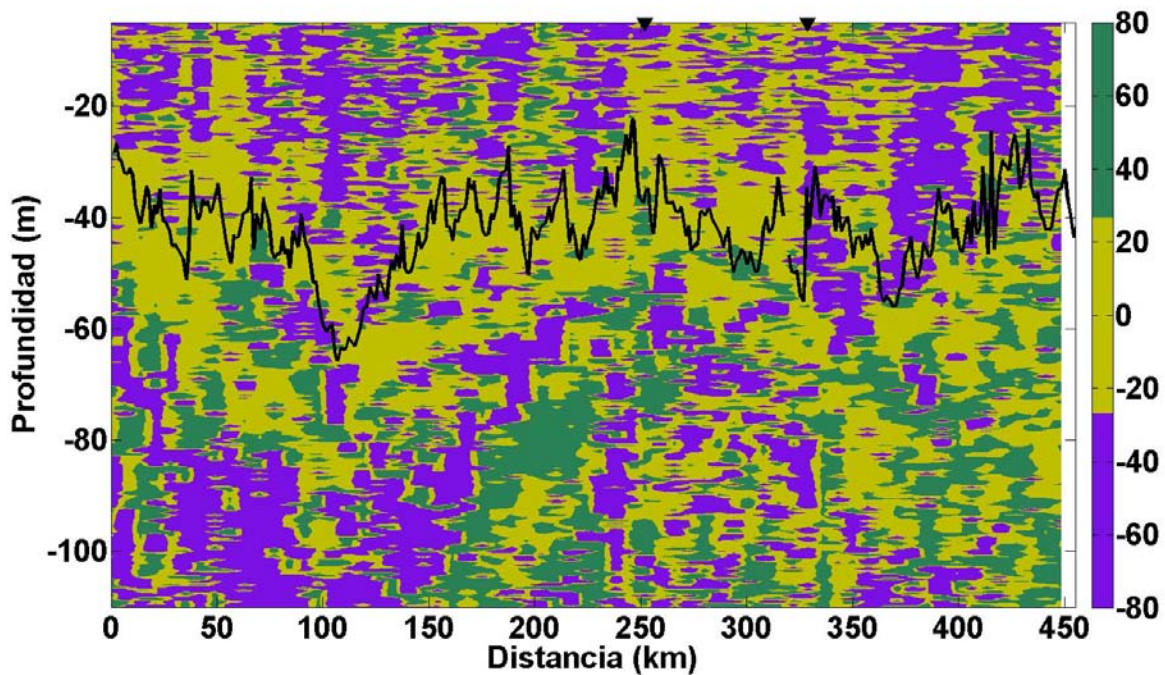


Figura 15. Ídem que la figura 14 pero para el transecto C. En el eje horizontal se presentan la distancia (km).

VII. Patrón de corrientes obtenidas mediante ADCP y corrientes geostróficas

Enseguida se presentan los datos obtenidos de la circulación en la zona. Se describen las corrientes promedio para los primeros 60 m de profundidad (Fig. 16), obtenidas con el ADCP del buque en las líneas A-B-C y se incluye el patrón de corrientes geostróficas obtenido por medio de la anomalía de la altura del nivel del mar (ver sección método).

El promedio de velocidades para el transecto A fue de 0.20 ms^{-1} . Los datos muestran que es posible definir 3 zonas dependiendo de los cambios en la ¿dirección? y magnitud de la corriente. Al oeste de la sección (cerca de la península) hay un flujo de salida de agua del golfo con dirección suroeste y velocidades de hasta 0.33 ms^{-1} ; en cambio, de los -109° W a los -108.5° C la dirección de la corriente cambia hacia el noreste (flujo entrado al golfo) con velocidades máximas de 0.20 ms^{-1} , para después y hasta la plataforma continental la dirección cambiar al sureste donde el flujo fue de hasta 0.25 ms^{-1} .

En el transecto B la dirección de las corrientes cerca de la península también muestra un flujo hacia la plataforma continental con velocidades de hasta 0.22 ms^{-1} . En la última parte de la sección, cerca de la plataforma de Sinaloa, el flujo se intensifica hacia el este con velocidades de hasta 0.30 ms^{-1} .

En el Pacífico en el transecto C se observan flujos hacia el noreste a los 24° N con magnitudes de 0.27 ms^{-1} , a partir de ahí y hasta los 23° N la dirección predominante cambia hacia el sur oeste con magnitudes de hasta 0.50 ms^{-1} . En la

parte de la sección cercana a la costa ($\sim 23.3^\circ\text{N}$), las corrientes disminuyen su magnitud a 0.15 ms^{-1} y la dirección cambia hacia el noreste. En la punta oeste de la península se observan velocidades de 0.50 ms^{-1} hacia el sur, por el contrario en la punta este hay valores de 0.42 ms^{-1} hacia el este-noreste.

En color negro claro se observan las corrientes geostróficas. En general se aprecia la presencia de remolinos que parecen interactuar con el patrón de corrientes descritas arriba. Por ejemplo, inmediatamente al sur de la sección B, los rasgos de un remolino anticiclónico parecen concordar con la dirección de las corrientes de la sección B, sobre todo cerca de la plataforma de Sinaloa. Frente a la punta este de la península del lado del Pacífico los rasgos de un remolino ciclónico no concuerda con los datos de ADCP. (Fig. 16). La parte norte de la sección C hay un flujo hacia la península que concuerda con el patrón de corrientes geostróficas, sin embargo desde los 24°N y hasta la punta oeste de la península el flujo geostrófico no concuerda con los datos obtenidos, posiblemente debido a que los datos satelitales son producto semanal y los datos obtenidos se tomaron al momento.

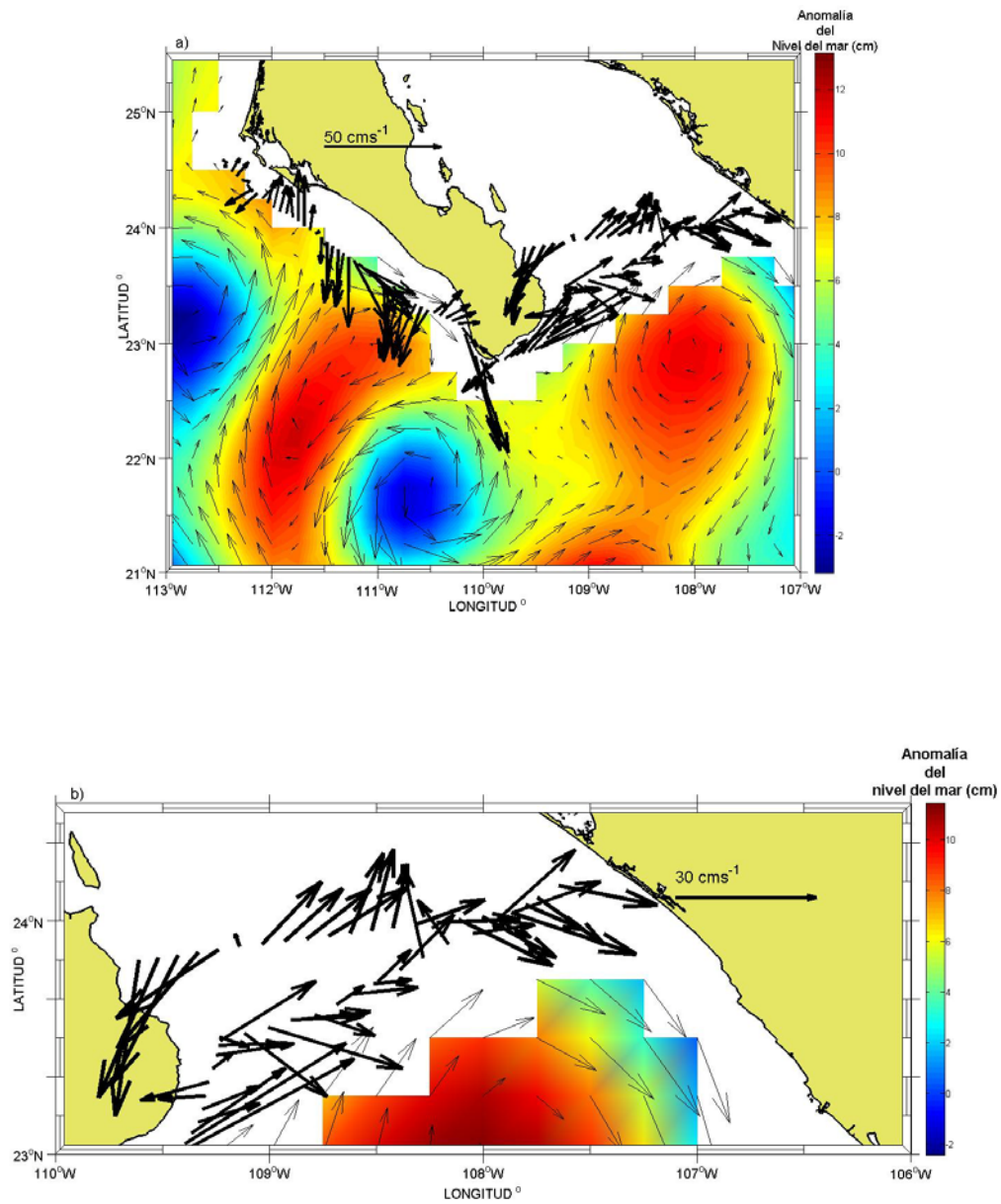


Figura 16. Vectores de las corrientes promedio para los primeros 60 m de profundidad. En color negro intenso se muestran los datos tomados por el ADCP del buque. En color negro claro las corrientes geostróficas obtenidas por la anomalía del nivel del mar (contorno) a través del producto AVISO. a) Transectos A, B y C y b) Transectos B y C.

6. DISCUSIÓN

El área de estudio de este trabajo es una zona de confluencia de masas de aguas sub-árticas, tropicales y del Golfo de California (Griffiths, 1965, 1968; Roden, 1971, 1972; Alvarado-Graef, 1998; Castro, 2000; Lavín, 2003, 2009). Debido a la alta resolución de las observaciones se encontraron detalles en los contrastes termohalinos como frentes con núcleos o “parches” cerca de Cabo San Lucas y en la entrada del golfo.

Debido al gran aporte del Agua Corriente de California (ACC) en la sección C, la salinidad y la temperatura fueron bajas en el Pacífico. Al sur de esta sección y hacia la zona de la entrada del golfo las aguas se incrementaron tanto en temperatura como en salinidad por la confluencia del Agua Tropical Superficial (ATS) y Agua del Golfo de California (AGC). Se presentó un frente en la entrada del golfo a los -108.7°W y 23.7°N marcado en los transectos A y B; este fue más intenso en salinidad (35 a 34.6) que en temperatura (26°C a 27°C). La salinidad disminuyó y la temperatura aumentó de oeste a este (Fig. 2), lo cual concuerda con Castro *et al.* (2000, 2006), ellos encontraron un núcleo de alta salinidad (34.9) del lado de la península para Noviembre del 2007. En el transecto C se observaron gradientes intensos horizontales análogos en temperatura y salinidad desde los 24°N hasta la punta de la península, a partir de ahí, los gradientes de temperatura no fueron tan intensos como los de salinidad. Es claro que frente a Cabo San Lucas hay una zona de “parches” de salinidad y temperatura (Fig. 2).

Roden (1971) y Alvarado-Graef (1998) encontraron fuertes gradientes de salinidad en la misma zona.

La profundidad de la capa mezclada se encontró entre los 20 y 50 m de profundidad para todo los transectos; aunque en algunas partes del transecto C alcanzó ~65 m. Castro *et al.*, (2000) encontraron una capa mezclada de ~40 m para invierno en la entrada al golfo, pero en noviembre de 1997 bajo condiciones anómalas debido a los efectos de El Niño 1997-1998, la capa mezclada alcanzó ~55 m de profundidad debido a la invasión de aguas tropicales cálidas.

Debido a que la profundidad de la capa mezclada puede variar por diferentes factores como corrientes, flujos de calor y principalmente viento (Sprintall y Cronin, 2009), es difícil determinar a qué se deben los cambios en su profundidad. Sin embargo, hay rasgos específicos para esta zona en cuanto a la capa mezclada; Roden (1971) señaló que frente a Cabo San Lucas hay un adelgazamiento de la termoclina con gradientes horizontales intensos, los datos de la sección C además de contrastar núcleos o parches de salinidad, muestran una capa mezclada de ~30 m para esa zona, comparado con todos los transectos, esa zona indica la capa mezclada más angosta.

Además, se encontró una relación directa de las variables medidas en este trabajo con la capa mezclada. Resaltando a la clorofila como la más afectada. En todos los transectos, se presentó el máximo sub-superficial exactamente debajo de la capa mezclada, además de que en las zonas donde esta fue más angosta, se encontraron los valores más altos (2 mg m^{-3}). Ya que la profundidad de la capa mezclada determina el flujo de nutrientes a la zona eufótica y por consiguiente la intensidad de luz que necesita el fitoplancton (McCreary *et al.*, 2001), es de suma

importancia determinar la profundidad de esta, cuando hay hundimiento de la pícnoclina hay disminución de fitoplancton por baja irradiancia. Además de que la disponibilidad de macro-nutrientes para la fotosíntesis depende de procesos capaces de erosionar la capa mezclada (Cepeda Morales, 2010).

El hecho de que nuestro estudio fue realizado con datos de alta resolución permitió distinguir en los transectos transversales de la entrada del golfo, un gradiente horizontal intenso en salinidad y temperatura a los -108.7°W , entre la superficie y ~ 90 m de profundidad. En esa zona para la capa mezclada, la salinidad disminuyó de 35 a 34.6 y la temperatura aumentó de 25°C a 25.5°C . Por debajo de la capa mezclada en la parte oeste de la entrada, se encontraron núcleos de baja salinidad (~ 34.6) los cuales podrían estar asociados a intrusiones del ACC. Sin embargo, entre la parte central y la plataforma de Sinaloa se encontró un mínimo de salinidad (~ 34.3), exactamente por debajo del límite inferior de la capa mezclada, estos valores tienen salinidades correspondientes al ATS y la ACC. Si se observa la Fig. 4 de temperatura para la misma zona se puede decir que los valores en T y S concuerdan con el ATS. Lavín *et al.*, (2009), caracterizó estos valores bajos en salinidad como un mínimo de salinidad somero (Shallow Salinity Minimum Water) proveniente de la Corriente de California con rangos termohalinos de 34.1-34.5 y $16-25^{\circ}\text{C}$.

Para visualizar la relación termohalina entre la zona del Pacífico y la entrada del golfo se unieron los transectos B y C en la sección IV de resultados. En términos generales se aprecia como la temperatura incrementa gradualmente de

norte a sur desde la zona del Pacífico hasta la entrada del golfo. Desde los 24 °N hasta los 23.2 °N se encontró un mínimo de salinidad de 33.2, el cual está relacionado con la Corriente de California. Aunque Badán (1998), argumenta que el ACC se desprende de la costa a los ~25 °N es posible que debido a la carencia de datos en la zona haya descrito erróneamente la caracterización de la distribución de las corrientes cercanas a la península. A medida que los datos se acercan a la costa y al sur, este mínimo decrece, probablemente por la mezcla con otras aguas superficiales. En el sur de la Corriente de California se ha encontrado la presencia de valores del ATS con $T > 25$ °C y $S > 34$ (Alvarado-Graef, 1998), Entre los 23 °N y Cabo San Lucas (Fig. 1) hay un núcleo de alta temperatura (26 °C) y alta salinidad (35.2) en la capa mezclada solamente, el cual se observa en las gráficas de variables superficiales obtenidas (Fig. 2), sin embargo, Alvarado Graef (1998) encontró núcleos de baja salinidad en la capa superficial frente a Cabo San Lucas para julio de 1995. Cabe mencionar que no se han hecho estudios similares para nuestra época y que los frentes pueden persistir desde semanas a años (Rudnick, 2009). Ya que los diagramas TS muestran ATS y AGC para la capa mezclada, y ACC y AStSs para toda la columna de agua, es muy posible que las propiedades termohalinas en la capa superficial cambien sus características. El transecto B localizado ~60 km al sur del transecto A también muestra un mínimo de salinidad (~34.2) del lado de la plataforma de Sinaloa. Lavín (2009) encontró por medio de imágenes satelitales filamentos de la ACC hasta el Golfo de California, así como intrusiones de agua cálida cerca de la plataforma de Sinaloa acarreando ATS. Además, Collins *et al.* (1997) y Castro *et*

al. (2000) encontraron agua fría y dulce derivada de la ACC que probablemente entra al golfo en parches de entre 10 y 50 km.

Cuando las corrientes con diferentes características termohalinas se interceptan, se generan frentes (Griffiths, 1965, 1968; Roden 1971, 1972), estos persisten a pesar del balance geostrófico.

Ya que nuestra área de estudio es una zona de confluencia de masas de agua y nuestra resolución espacial horizontal es de ~ 3 km, se analiza la relación de la temperatura y salinidad con la densidad en la base de la capa mezclada. El rasgo principal encontrado en el transecto A (Fig. 12) fue en la zona donde se observó un gradiente intenso de densidad (sección II de resultados). La salinidad disminuye tres veces más de lo que la temperatura aumenta, pero la densidad se comporta casi igual que la salinidad, disminuyendo ambas en la zona del frente. Rudnick y Ferarri (1999) observaron que un frente donde el efecto de la temperatura a la densidad es el doble (opuesto) que la salinidad, el gradiente horizontal de densidad puede persistir. Por otro lado, en el transecto C se observa un comportamiento escalonado de T y S, donde ambas variables aumentan de Norte a Sur. En Estudios realizados en la capa mezclada por Rudnick y Ferrari (1999) en el Pacífico norte, se encontraron comportamientos horizontales de T y S escalonadas similares a nuestros datos, aunque se sabe que esto es generado por las diferencias en los coeficientes de difusión de T y S, no se ha determinado todos los factores que generan este proceso. Rudnick y Martin (2002) mencionan que los comportamientos de T y S escalonados son comunes en la capa superficial de los océanos. En el transecto C, los gradientes intensos de densidad

tienden a hundirse como resultado de la gravedad y la mezcla vertical (capa mezclada) a diferencia del transecto A donde se observa el gradiente de densidad persiste (Rudnick y Ferrari, 1999).

Se puede decir que en la zona frontal dominan fuertemente los procesos de doble difusión (Tippins y Tomczak, 2003), ya que no se sabe el proceso que genera esa zona de frentes de S y T en nuestros transectos, se obtuvo el ángulo de Turner. Este determina el tipo de doble difusión y la estabilidad vertical de la columna de agua de acuerdo a las diferencias en los coeficientes de difusión de temperatura y salinidad (es más fácil perder calor que sal en una parcela de agua). Además nos ayuda a determinar el comportamiento de T y S a la densidad, es decir qué tipo de estabilidad se asocia a frentes compensados por S y T o frentes de densidad no compensados (Bianchi *et al.*, 2001), como los encontrados en los transecto A y C.

El transecto A (Fig. 14) presenta valores $-90^{\circ} < Tu < -45^{\circ}$ en la mayor parte de la capa mezclada (específicamente en la zona del frente), indicando “convección difusiva”, este proceso transporta más calor que sal. En esta zona hay un frente marcado de densidad y salinidad y no hay comportamiento escalonado típico de la capa mezclada (Schmitt, 2001).

Para el transecto A y C (Fig. 15) en la base de la capa mezclada la mayoría de los valores se encontraron entre $-45^{\circ} < Tu < 45^{\circ}$, indicando estabilidad por doble difusión), es más estable el agua cerca de la base de la CM que en la zona de estratificación y en la superficie. Esta estabilidad a la vez podría estar asociada a los mínimos de salinidad mencionados y al máximo sub-superficial de clorofila. En

ambos transectos se encontraron más valores de convección difusiva para la CM, indicando que la temperatura decreció hacia abajo. El transecto A presentó áreas con más valores mayores a 45° , " $45 < Tu < 90$ ") debajo de la CM que el transecto C. Estos valores indican la posibilidad de encontrar dedos de sal en zonas donde la salinidad decrece hacia abajo. Además los "salt fingers" generan agua caliente y salada, mientras que los procesos de convección difusiva generan agua fresca y dulce (Hebert, 2001). Entonces, esto concuerda con que arriba de la CM en el transecto A se encontraron aguas más frías y dulces que en la parte de debajo de la CM.. El transecto C por otro lado presento pocos valores que indican inestabilidad por salinidad ("salt fingers"), y una gran cantidad de valores que indican convección difusiva, indicando inestabilidad por temperatura. (temperatura decrece hacia abajo).

La circulación en la zona de estudio muestra los rasgos de la distribución de las masas de agua superficiales. Aunque el producto satelital fue semanal y superficial, hubo una relación marcada de las corrientes geostróficas obtenidas satelitalmente con los datos de ADCP tomados al momento. Se encontró un remolino anticiclónico en la boca del golfo, Figueroa *et al.* (2003) indican que los remolinos geostróficos son comunes en todo el golfo, Collins *et al.* (1997) mencionan que se ha encontrado remolinos ciclónicos en la entrada del golfo para Noviembre de 1990 estos generan mezcla de aguas (Castro *et al.*, 2006). En la zona del Pacífico el flujo principal fue hacia el sur, concordando con la circulación geostrófica general y la Corriente de California. (Lynn y Simpson, 1987). Las masas de agua sub-árticas mueven agua fría al golfo algunas veces en forma de

remolinos (Collins *et al.*, 1997), en el transecto C se encontraron ATS en la capa superficial y ACC con bajas salinidades y bajas temperaturas a profundidades mayores. Cerezo-Mota (2002) y Collins *et al.*, (1997) encontraron un remolino anticiclónico frente a la península que probablemente hundió a la ACC. Las intrusiones de ACC hacia la entrada del golfo generan una mezcla en la capa superficial de la entrada del golfo generando también la disminución de salinidad en esa zona.

7. CONCLUSIÓN

La profundidad de la capa mezclada se encontró entre los 20 y 65 m de profundidad en la entrada del golfo y el Pacífico adyacente. En el lado del Pacífico se encontró un mínimo de baja salinidad por debajo de la capa mezclada asociado a valores de la Corriente de California. Por otro lado, en la zona este de la entrada del golfo se encontraron valores de baja salinidad y alta temperatura por debajo de la capa mezclada que también podían estar asociadas a Agua de la Corriente de California modificada por temperatura.

Los resultados obtenidos con anomalías del nivel del mar por medio del producto satelital AVISO son muy consistentes con los obtenidos por las mediciones INSITU obtenidas por corrientímetros.

La zona del Golfo es una zona de transición con un frente intenso de salinidad y densidad, así mismo la zona frente a Cabo San Lucas es una zona de fuertes gradientes horizontales de S y T, esto debido a la confluencia de masas de agua superficiales encontradas como ATS, ACC y AGC.

El ángulo de Turner es un parámetro que permitió distinguir los diferentes procesos de doble difusión por arriba y abajo de la capa mezclada. La mayor parte de la capa mezclada se encontró estable por doble difusión mientras que por debajo de esta se encontraron valores de convección difusiva indicando inestabilidades por temperatura.

8. REFERENCIAS

- Alvarado-Graef P. 1998. Estructura hidrográfica y circulación costera frente a Baja California Sur, en el Pacífico y en el Golfo. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC. 75 pp.
- Badán-Dangón, A. 1998. La Corriente Costera de Costa Rica en el Pacífico Mexicano. Capítulo del libro: Contribuciones a la Oceanografía Física en México, Monografía No. 3, UGM. 99-112.
- Bianchi AA, Piola A y Collino GJ. 2001, Evidence of double diffusion in the Brazil-Malvinas Confluence. Deep Sea Research I. 1-12.
- Castro R, Mascarenhas A, Durazo R, Collins C. 2000. Seasonal variation of the temperature and salinity at the entrance to the Gulf of California, México. Ciencias Marinas 26: 561-583.
- Castro R, Durazo R, Mascarenhas A, Collins C y Trasviña A. 2006. Termohaline variability and geostrophic circulation in the southern portion of the Gulf of California. Deep Sea Research 53: 188-200.
- Cepeda J. 2010. Respuesta de los productores primarios a algunos procesos dinámicos en la región de transición del Pacífico oriental tropical mexicano. Tesis de doctorado. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 140 pp.
- Cerezo-Mota R. 2002. El Impacto del Niño 1997-1998 en la entrada al Golfo de California. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC. 49 pp.
- Collins, C, Garfield, N, Mascarenhas Jr., AS y Spearman, MG, 1997. Ocean currents across the entrance to the Gulf of California. Journal of Geophysical Research 10,20927–20936.
- Collins, C y Chu PC. 1995. Oceanography. Enciclopedia of Applied Physics, Vol 12. VCH Publisher, Inc. USA.
- Griffiths, RC. y Raymond C. 1965. A study of ocean fronts off Cape San Lucas, lower California. U.S, FiSh Wildl. Serv., Spec. Sci. Rep. Fish. 499, 54 pp.
- Griffiths, RC. 1968. Physical, chemical, and biological oceanography of the entrance to the Gulf of California, spring 1960. US Fisheries and Wildlife Service Special Scientific. 573: 1–47.
- Figueroa JM, Marinone SG y Lavin MF. 2003. A description of geostrophic gyres in the Southern Gulf of California. Capítulo del libro: Non linear processes in

geophysical in geophysical fluid dynamics. Kluwer Academic Publishers. Editor: O Velasco O, J Sheinbaum y J Ochoa. Dordrecht, The Netherlands.

Hebert DL. 2001. Intrusions. Capítulo del libro: Elements of Physical Oceanography. Elsevier. Editor S. A. Thorpe. London, U.K.

Kara PA, Rochford PA. 2000. An optical definition for ocean mixed layer depth. Journal Geophysical of Research. 105: 16803-16822.

Kundu PK. 1990. Fluid Mechanics. Academic Press. San Diego CA. USA.

Lavin MF y Marinone SG. 2003. An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. Capítulo del libro: Non linear processes in geophysical in geophysical fluid dynamics. Kluwer Academic Publishers. Editor: O Velasco O, J Sheinbaum y J Ochoa. Dordrecht, The Netherlands.

Lavin MF, Castro R, Beier E, Godinez V, Amador A. 2009. Thermohaline structure, and circulation in the southern gulf of California in June 2004, during the North American Monsoon Experiment. Journal of Geophysical Research. 114: C02025, doi:10.1029/2008JC004896

Lynn Simpson. 1987. The California current system: The seasonal variability of its physical characteristics. Journal Geophysical Research. 92(C12):129745:12966

Martínez M. 1994. Descripción de la profundidad de la capa mezclada superficial en el Golfo de California. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC. 48 pp.

Mascarenhas Jr. AS, Castro R, Collins CA y Durazo, R, 2004. Seasonal variation of geostrophic velocity and heat flux at the entrance to the Gulf of California, Mexico. Journal of Geophysical Research 109 (7).

McCreary JP, Kohler KE, Hood RR, Smith S, Kindle J, Fischer AS y Weller RA. 2001. Influences of diurnal and intraseasonal forcing on mixed-layer and biological variability in the central Arabian Sea. Journal of Geophysical Research 106(C4):7139-7155.

Perez-Brunuis P, Lopez M y Pineda J. 2006. Hydrographic Conditions near the coast of Northwestern Baja California: 1997:2004. Continental Shelf Research. 26:885-901

Roden, GI, y Groves GW. 1959. Recent oceanographic investigations in the Gulf of California, J. Mar. Res., 18:10-35.

Roden, GI. 1964. Oceanographic aspects of Gulf of California. In: T. H. Van Andel and G. G. Shor Jr. (Eds.) Marine Geology of the Gulf Of California: A symposium. Am. Assoc. Pet. Geol. Mem., 3, 30-54 pp,

Roden GI, 1971. Aspects of the Transition Zone in the Northeastern Pacific. *Journal of Geophysical Research*. 76(15) 3462-3475.

Roden, GI. 1972. Thermohaline structure and baroclinic flow across the Gulf of California entrance and in the Revilla Gigedo Islands region, *J. Phys. Oceanogr.*, 2(2), 177– 183, doi:10.1175/1520-0485(1972)002<0177:TSABFA>2.0.CO;2.

Rudnick DL y Ferrari R. 1999. Compensation of horizontal temperature and salinity gradients in the ocean mixed layer. *Science*. 283: 526-528.

Rudnick DL. 2001. Upper ocean space and time Variability. Capítulo del libro: *Elements of Physical Oceanography*. Elsevier. Editor S. A. Thorpe. London, U.K.

Rudnick DL y Martin JP. 2002. On the horizontal density ratio in the upper ocean. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 36:3-21.

Schmitt RW. 2001. Double-Diffusive Convection. Capítulo del libro: *Elements of Physical Oceanography*. Elsevier. Editor S. A. Thorpe. London, U.K.

Sprintall Jy Cronin MF. 2009. Upper Ocean Vertical Structure. Capítulo del libro: *Elements of Physical Oceanography*. Elsevier. Editor S. A. Thorpe. London, U.K.

Tippins D y Tomczak M. 2003. Meridional Turner angles and density compensation in the upper ocean. *Ocean Dynamics*. 53: 332-342

Tomita, T y Masami N, 2006. Upper-Ocean Mixed Layer and Wintertime Sea Surface Temperature Anomalies in the North Pacific. *J. Climate*, **19**, 300–307