

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA



DESCRIPCION DE LA PROFUNDIDAD DE LA CAPA MEZCLADA SUPERFICIAL EN EL GOLFO DE CALIFORNIA



TESIS QUE PARA OBTENER EL TITULO DE OCEANOLOGO

PRESENTA:
MARGARITA MARTINEZ SEPULVEDA

I. RESUMEN

Se hace una descripción de la profundidad de la capa mezclada superficial (PCM) en el Golfo de California usando perfiles de temperatura obtenidos en 39 cruceros oceanográficos desde 1939 hasta 1990. La profundidad de la capa se estima directamente de los perfiles de temperatura, se observan características de su distribución espacial mediante gráficas de contornos de algunos cruceros, se forman gráficas compuestas para cada mes del año realizando con ellas estadísticas básicas y se ajusta por cuadrados mínimos una curva sinusoidal anual a los promedios diarios de la PCM en cada zona del Golfo.

Los patrones de distribución espacial muestran un máximo bien definido sobre la cuenca Delfín en el Golfo Norte y otro sobre la cuenca de Guaymas; ambos aparecen de octubre a marzo. Entre las islas los patrones son menos claros y con fuertes gradientes horizontales. Desde el otoño hasta principios de la primavera existe en el Golfo Sur un gradiente transversal de la PCM con valores mayores en la costa peninsular que varían desde 70 metros en febrero hasta 10 metros en el verano contra un máximo en la costa oriental de 30 metros en febrero y un mínimo de 10 metros en verano.

La profundidad de la capa mezclada en el Golfo de California tiene una señal estacional con una transición de primavera que dura dos meses en el norte e islas y tres meses en el sur. En verano la PCM es espacialmente uniforme, con valores cercanos a 10 m en el sur e islas y 20 en el norte. Desde fines del verano y todo el otoño, la PCM se incrementa gradualmente en todo el Golfo haciendo la transición de otoño mucho mas lenta que la de primavera. El invierno está caracterizado por una mayor rapidez de profundización de la capa mezclada.

El promedio anual del ajuste de la PCM en el Golfo Norte y entre las islas es de 30 metros y en el Golfo Sur es de 22 metros. En el Golfo Norte el armónico anual explica el 75 por ciento de la varianza total y el armónico semianual explica el 25 por ciento. En el Golfo Sur el armónico anual explica el 91 por ciento de la varianza total y el armónico semianual el 9 por ciento.

DESCRIPCION DE LA PROFUNDIDAD DE LA CAPA MEZCLADA
SUPERFICIAL EN EL GOLFO DE CALIFORNIA

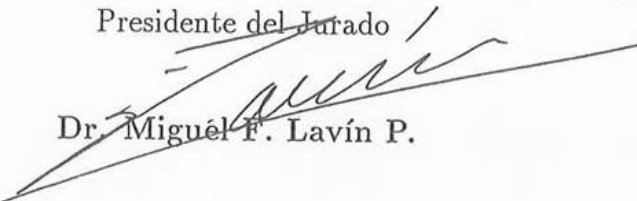
T E S I S

QUE PRESENTA:

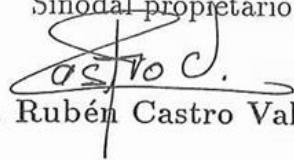
MARGARITA MARTINEZ SEPULVEDA

Aprobada por:

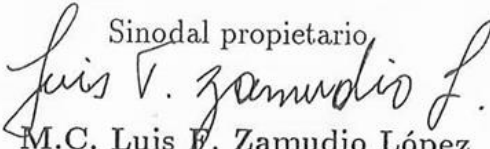
Presidente del Jurado


Dr. Miguel F. Lavín P.

Sinodal propietario


M.C. Rubén Castro Valdéz

Sinodal propietario


M.C. Luis F. Zamudio López

III. AGRADECIMIENTOS

Deseo dar las gracias al Dr. Miguel F. Lavín P. quien me sugirió el tema de tesis y me facilitó los datos para realizarla. Su dirección, consejos y sugerencias fueron de gran ayuda en la culminación de este trabajo.

A los miembros del comité, M.en C. Luis F. Zamudio y M.en C. Rubén Castro, gracias por su importante colaboración, por sus críticas y correcciones a esta tesis.

Gracias también al M.en C. Cristóbal Reyes y al Oc. Modesto Ortiz, quienes fueron fuente permanente de amistad, consejos y asistencia efectiva en toda clase de dudas académicas y atolladeros técnicos.

Quiero agradecer en forma especial al Dr. Myrl Hendershott por el apoyo que me brindó permitiéndome el uso del equipo, material e instalaciones del Centro de Estudios Costeros en Scripps Institution of Oceanography.

Al Dr. A. Badan Dagon y a la Dra. Ma.Luisa Argote gracias, por permitirme el acceso y uso a datos inéditos.

Igualmente agradezco a CICESE por facilitarme su equipo e instalaciones siempre que lo necesité.

Al Dr. Alejandro Parés y al Dr. José Luis Ochoa, por su oportuna ayuda al proporcionarme el imprescindible auxilio de la computadora.

Al Oc. Víctor Godínez y a Salvador Sánchez por su apoyo técnico.

A todos mis compañeros estudiantes por su amistad, su ayuda y su grata camaradería.

A Rebeca Acosta y Citlalli Martínez por su sincera amistad, de gran valor para mí, que me reiteraron incontables veces, a través de tantas acciones desinteresadas.

Y a todas las personas que han colaborado en la formación del banco de datos del Golfo de California, así como al CONACYT por haber proporcionado el tiempo de barco en el B/O EL PUMA para muestrear meses clave en el ciclo estacional.

Esta es una contribución del proyecto CONACYT 3209-T.

IV. TABLA DE CONTENIDO

I. Resumen	i
II. Página de Aprobación	ii
III. Agradecimientos	iii
IV. Tabla de contenido	.v
V. Lista de tablas	vi
VI. Lista de figuras	viii
1. Introducción	1
2. Objetivo	7
3. Datos y métodos	8
4. Resultados y discusiones	17
4.1. Distribución espacial	.17
4.2 Variación temporal	31
5. Conclusiones	43
6. Literatura citada	45

V. LISTA DE TABLAS

I. Datos. El tipo de instrumento, año y mes del crucero esta dado en la primera columna, BO corresponde a lances de botella, CT a lances de CTD y BC a cruceros realizados con ambos instrumentos. Las columnas de la 2 a la 4 contienen la cantidad de datos realizados por cada crucero en cada zona.

12

II. Promedios y desviaciones estándar de la PCM encontrados en el Golfo para cada mes del año. La primera columna contiene el número de intervalo en que se promediaron los datos a lo largo del Golfo, solo aparecen los intervalos en donde se encuentran los valores seleccionados. En la segunda columna aparecen promedio mayor y menor encontrados a lo largo del Golfo en cada mes. En la tercera columna se muestran la desviación mayor y menor. Las últimas dos columnas muestran algunos valores que indican la profundidad máxima y mínima que es posible observar en el Golfo.

30

III. Coeficientes de las componentes de la serie ajustada a los datos y errores cuadráticos medios.

37

IV. Promedios, amplitudes y fases de las aproximaciones anuales ajustadas a los promedios de la PCM clasificados por zona.

38

V. Promedios, amplitudes y fases de los armónicos anuales y semianuales ajustadas a los promedios diarios de la PCM clasificados por zona.

39

VI. LISTA DE FIGURAS

1. Golfo de California. Se muestran las isobatas de 100, 1000 y 2000 metros y principales localidades. 4
2. Clasificación de los perfiles de temperatura según de Mazeika (1960). Se señalan en cada perfil: el límite superior de la termoclina (letras A) y al cual nosotros llamamos PCM, el límite inferior de la termoclina (letras B) y termoclinas transientes (letras C) en los casos de las estructuras que las presentan. 11
3. Mapas de contornos de la PCM de muestreos realizados en el Golfo Norte y entre las islas. Los contornos fueron elegidos individualmente en cada gráfica para facilitar su inspección visual. Con el mismo fin algunos contornos fueron dibujados con líneas punteadas. 18
4. Mapas de contornos de la PCM de muestreos realizados en Golfo Sur. El mismo criterio que en las figuras anteriores fué seguido en la elaboración de éstos mapas. 24
5. Distribución longitudinal de la Profundidad de la Capa Mezclada. Se muestra una gráfica para cada mes con promedios y desviaciones estándar para secciones de 100 km de largo. 28
6. Ajuste con frecuencias anual a los promedios diarios de la PCM en el Golfo Norte 33

7. Ajuste con frecuencias anual mas semianual a los promedios diarios de la PCM en la zona entre las islas	34
8. Ajuste con frecuencias anual mas semianual mas trimestral a los promedios diarios de la PCM en el Golfo Sur	35
9. Razón de calentamiento del Golfo de California (Castro et al. 1994).	42
10. Resultados del modelo experimental de Turner and Krauss (1967). a) Ciclo de la capa mezclada, b) Calentamiento de la superficie del modelo.	42

1. INTRODUCCION

La continua interacción entre la atmósfera y el mar se manifiesta a través de cambios constantes en la distribución espacial y temporal de sus variables físicas y es la profundidad de las primeras capas del océano el objeto de interés en el presente trabajo.

El oleaje, causado por los vientos sobre la superficie del mar y los efectos convectivos debidos a la estabilidad de la capa superficial y al balance de calor son los factores más evidentes que originan mezcla en los primeros metros de profundidad del océano. Sin embargo, en zonas de particular configuración topográfica tales como las zonas costeras someras, canales y zonas cercanas a islas pueden cobrar relevancia los efectos de las mareas, corrientes divergentes o convergentes, ondas internas y giros de gran escala.

La estructura vertical de la temperatura y salinidad suele variar notablemente de una localidad a otra y es significativamente sensible a los cambios estacionales de los procesos que la generan. Por lo tanto es común encontrar ambos parámetros aproximadamente uniformes hasta alrededor de los veinticinco metros de profundidad, formando lo que conocemos como capa mezclada superficial. Dentro de esta capa, llamada también "capa límite oceánico-planetaria" y a través de sus fronteras tienen lugar muchos procesos interesantes y que tienen gran impacto en la dinámica oceánica, en la vida marina y por consecuencia, en la vida humana. Los efectos de fricción y del transporte de Ekman son ejemplos de esos procesos. También la capa de mezcla es un lugar en donde se guarda y administra gran cantidad de calor que se intercambia con la atmósfera, contribuyendo así a la moderación del clima.

Por lo tanto, el conocimiento y predicción de la temperatura y profundidad de la capa mezclada es de importancia en la modelación de la dinámica en zonas de fuerte interacción océano-atmosférica. Además, la riqueza en vida marina de cualquier región está determinada por su productividad y ésta tiene lugar dentro de la capa mezclada principalmente, por lo que el conocimiento preciso de su distribución y variabilidad es de interés económico en problemas de pesquería y particularmente en el estudio de la evolución y distribución de las poblaciones marinas.

A pesar de que conocemos el importante papel que juega la capa de mezcla, no existe una definición cuantitativa única en términos de parámetros como el gradiente y el rango de temperatura. En este trabajo nos interesa identificar y describir la capa mezclada superficial que se forma como consecuencia de los eventos estacionales y dentro de la que suceden los procesos de que hemos hablado anteriormente, lo que implica que nos estaremos refiriendo a la estructura que se forma sobre la termoclina estacional. Así, partiendo del anterior interés y basándonos en la definición cualitativa que habla de una "capa relativamente homogénea y bajo la cual el gradiente de temperatura aumenta significativamente", los perfiles proporcionan información suficiente para alcanzar el objetivo planteado aquí. La identificación de las estructuras de transición o transientes que tienen períodos menores al estacional solo nos interesarán en los casos en que la capa mezclada no sea muy clara.

Descripción del área de estudio

El Golfo de California se encuentra entre los 107 y 115 grados longitud oeste y los 23 y 32 grados latitud norte, en una región predominantemente árida (Figura 1). Esta delgada porción de mar mide a lo largo aproximadamente 1200 kilómetros y de ancho promedio 135 kilómetros. Su topografía es muy irregular, con varias cuencas que varían entre poco más de 3000 metros a 200 metros de profundidad, separadas entre sí por umbrales. La plataforma se hace más amplia en la cabeza del Golfo en donde la profundidad promedio es de 200 metros, la pendiente en la costa de Sonora es relativamente menor y se incrementa de nuevo hacia el sur a partir de la mitad del Golfo.

A pesar de sus dimensiones y de estar casi totalmente limitado por las costas, el Golfo ha sido considerado por largo tiempo como la única cuenca grande de evaporación del Océano Pacífico aunque estudios más recientes ponen de manifiesto promedios anuales de flujo calor latente significativamente menores a los estimados anteriormente (Lavín y Organista, 1988; Figueroa y Palacios, 1991)

La interacción del Golfo con la atmósfera se manifiesta por fuertes gradientes diurnos y estacionales en las capas superficiales. También existen importantes diferencias a lo largo y de una costa a otra del Golfo. Todas estas variaciones están fuertemente relacionadas con la circulación atmosférica y con la existencia de cadenas montañosas, particularmente las de Baja California, las cuales actúan como una barrera contra el clima del Océano Pacífico.

Para la descripción espacial y temporal de la PCM, el área de estudio es dividida en cuatro regiones hidrográficas caracterizadas cada una por condiciones y mecanismos físicos propios.

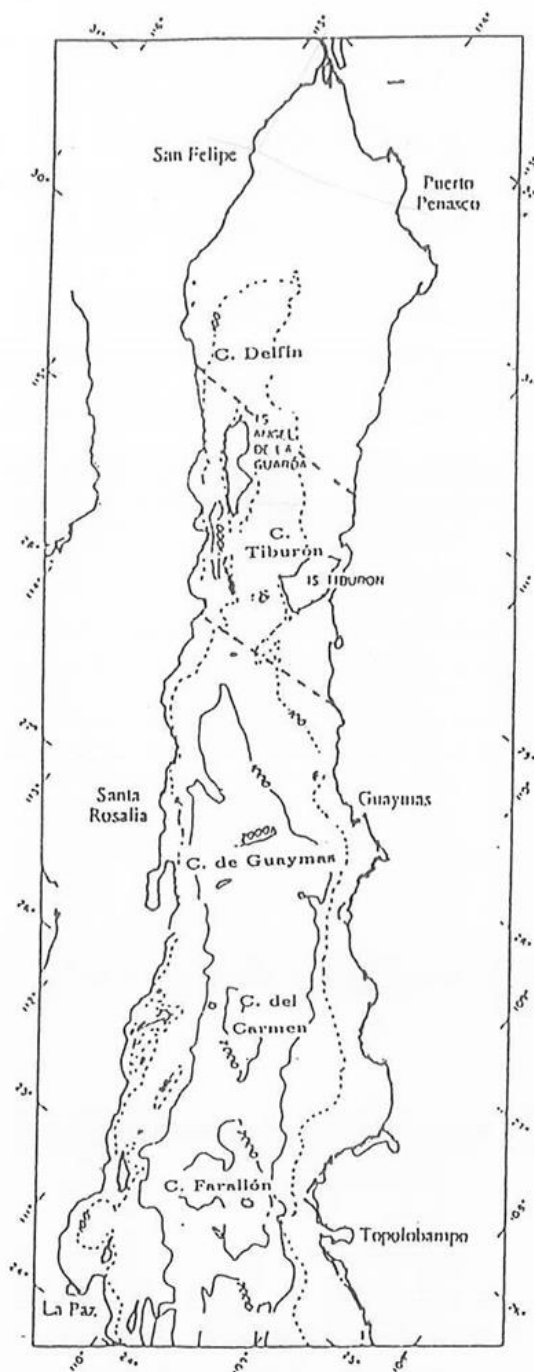


Figura 1. Golfo de California, (tomado de Bray, 1988). Se muestran las isobatas de 100 m, 1000 m y 2000 m. Las líneas punteadas dividen el área de estudio en tres zonas: El Golfo Norte, zona entre las islas y el Golfo Sur.

La parte norte o Golfo Norte, es relativamente somera, está expuesta a fuertes corrientes de marea, la intensa evaporación y el enfriamiento de la superficie en invierno producen condiciones de inestabilidad que generan movimientos convectivos de masas de agua. Organista (1987) cuantificó la importancia relativa de los vientos, las mareas y la convección en la mezcla vertical del Golfo Norte y encontró que la pérdida de calor durante el trimestre de octubre a diciembre produce siete veces más mezcla que el viento en las partes profundas. También aquí se observan los mayores rangos de temperatura anuales de las capas superiores, alta productividad fitoplanctónica (Gilbert y Allen, 1943) y vientos que soplan del norte la mayor parte del año. Esta región se encuentra entre la boca del Río Colorado y las islas Angel de la Guarda y Tiburón por lo que para nuestros fines la limitamos a los 29.5 grados de latitud norte.

El canal de Ballenas y Salsipuedes localizados entre Baja California y las islas Angel de la Guarda y San Lorenzo forman una zona (en este trabajo la situamos entre los 29.5 y 28.2 grados latitud norte) de especial interés ya que en ella existe fuerte mezcla por marea y los vientos se incrementan considerablemente al pasar entre las islas y sobre el canal. El área que rodea las islas se caracteriza por su topografía irregular, por tener la temperatura superficial mas baja de todo el Golfo, la cual persiste durante todo el año, y por generar importantes núcleos de surgencias en ambas costas cuyas aguas circulan hacia el sur, respondiendo a la advección generada por el viento (Badán et al., 1985).

El Golfo Sur -hacia el sur de los 28.2 grados latitud norte- entre las islas y la boca es mucho más profundo, su superficie experimenta intensa insolación durante la primavera y el verano. Esta zona recibe periódicamente la energía de las tormentas

tropicales que se generan durante el verano y es fuertemente influenciada por los eventos hidrográficos que ocurren en la boca.

Por último, la entrada del Golfo es un área triangular entre el paralelo 23 y una línea imaginaria que une a Mazatlán y a Cabo Corrientes en donde se dan encuentro las tres distintas masas de agua: la del Golfo, la de la Corriente de California y la del Pacífico Este Tropical. Aquí se observan frentes, remolinos, intrusiones y una complicada estructura termohalina, (Roden and Groves, 1959). A través de la boca se establece un vigoroso intercambio de masas de agua y un flujo neto de calor hacia afuera del Golfo durante la mayor parte del año (Bray, 1988; Castro et al., 1994)

Se cuenta ahora con una considerable cantidad de observaciones de temperatura y otras variables las cuales permiten hacer una descripción de la profundidad de la capa mezclada en el Golfo. El único antecedente directo que existe es el Atlas elaborado por Robinson (1973) con una cantidad significativamente menor de información. El resultado de su trabajo en el Golfo, aunque de importancia práctica, requiere actualizarse con la información proporcionada por cruceros oceanográficos posteriores.

2. OBJETIVO

Se determinará la distribución de la capa mezclada superficial en el Golfo de California destacando la presencia de patrones espaciales generales y se describirá su variación estacional a través de procedimientos sencillos pero necesarios en un primer análisis de datos.

3. DATOS Y METODOS

Existen diferentes métodos para la estimación de la profundidad de la capa mezclada derivada de datos. Una forma generalizada de hacerlo es especificando un límite de la variación de temperatura del perfil a partir de una cierta profundidad. Esta puede ser la superficie, pero lo común es fijarla algunos pocos metros bajo ella para evitar las variaciones debidas a ciclos diurnos u otras fluctuaciones que no sean producidas por cambios estacionales.

El rango de temperatura elegido es diferente de un autor a otro. La razón principal es que la profundidad promedio depende de las condiciones meteorológicas e hidrográficas típicas de la zona que se esté investigando. Por ejemplo, Rokkam et al. (1989) generaron las climatologías de la profundidad media mensual de la capa de mezcla y de la temperatura superficial para el Océano Indico a partir de una serie de perfiles de temperatura, y definieron la profundidad de la capa como la primera que presentara una diferencia de un grado centígrado respecto a la temperatura de los diez metros. Esteve and Soulas (1993), la definieron como la máxima profundidad sobre la cual la temperatura observada variara .05 grados centígrados con respecto de la temperatura a los cinco metros de profundidad, con datos de la costa de California.

En su modelo de simulación, Garwood y Adamec (1982) estimaron inicialmente la PCM con datos de una estación en el Océano Pacífico Este (50 grados latitud norte) estableciendo un cambio de temperatura dentro de la capa mezclada de .02 grados centígrados desde la superficie. A pesar de que el rango de temperatura es

muy pequeño, sus datos mostraron que la PCM en ese lugar puede alcanzar valores de alrededor de 100 metros.

Ya anteriormente se aplicó un criterio a los datos del Golfo, definido por Robinson (1973) para determinar la profundidad de la termoclina. Se usó una diferencia de dos grados fahrenheit con respecto a la temperatura superficial. Encontró que la PCM se incrementa de la boca del Golfo hacia la cabeza con máximos de 130 m en la parte norte durante enero, febrero y marzo y profundidades mínimas de alrededor de 15 m en julio y agosto en casi todo el Golfo excepto alrededor de la isla Angel de la Guarda y en algunas zonas en las costas del Golfo Sur.

Otros métodos están basados en procedimientos numéricos como el descrito por Papadakis (1981). El camino seguido por éste y otros autores (Krajean, 1993; Caperon et al., 1968) es objetivo y consiste básicamente en aproximar segmentos de rectas a los datos observados usando la condición del mínimo error cuadrático para elegir la mejor aproximación. Cada método establece particulares condiciones para analizar el problema, pero una ventaja común de todos ellos es el hecho rotundo de ahorrar enormes cantidades de tiempo. Otra ventaja que es importante mencionar es que el uso de métodos numéricos en la estimación de la PCM disminuye la ocurrencia de errores debidos a procedimientos subjetivos y cualquiera que sea el criterio empleado éste es aplicado en igual forma a todos los casos. Sin embargo, la evaluación visual de cada perfil sigue siendo la que da la última palabra y para el caso de perfiles de temperatura en los que tenemos gráficas simples en una dimensión, el criterio visual proporciona buenos resultados para una primera descripción.

Una excelente clasificación de los perfiles de temperatura basada en la presencia

y magnitud de diversos parámetros característicos de los perfiles tomados de diversas áreas del océano es dada por Laevastu y Stevens (1969). LaFond(1954) describe detalladamente la relación entre la estructura vertical y los factores que la afectan. Mazeika (1960) proporciona una clasificación de perfiles típicos de batitermógrafos en los cuales especifica el punto de la estructura hasta donde se encuentra la profundidad de la capa mezclada, y la de la termoclina, (Figura 2).

Su clasificación permite agrupar los perfiles en tres categorías básicas:

- a) Termoclina normal con una capa mezclada sobre ella
- b) Tipo de densidad continuo
- c) Tipo homotermal

3.1 DATOS

Se usa información obtenida en 39 cruceros realizados en el Golfo de California desde 1939 hasta 1990 (Tabla I), con un total de 2215 perfiles de temperatura. Una parte de los datos fueron obtenidos con termómetros reversibles y con intervalos de muestreo en cada lance de 10 a 20 metros. En los muestreos más recientes se usaron batitermógrafos y CTD y la información se obtuvo cada uno o dos decibares.

3.2 METODO UTILIZADO.

La profundidad de la capa mezclada se estimó en forma visual directamente de los perfiles de temperatura. Este procedimiento tiene sus limitaciones debido a su naturaleza subjetiva: el conocimiento y la experiencia personal y la forma en que

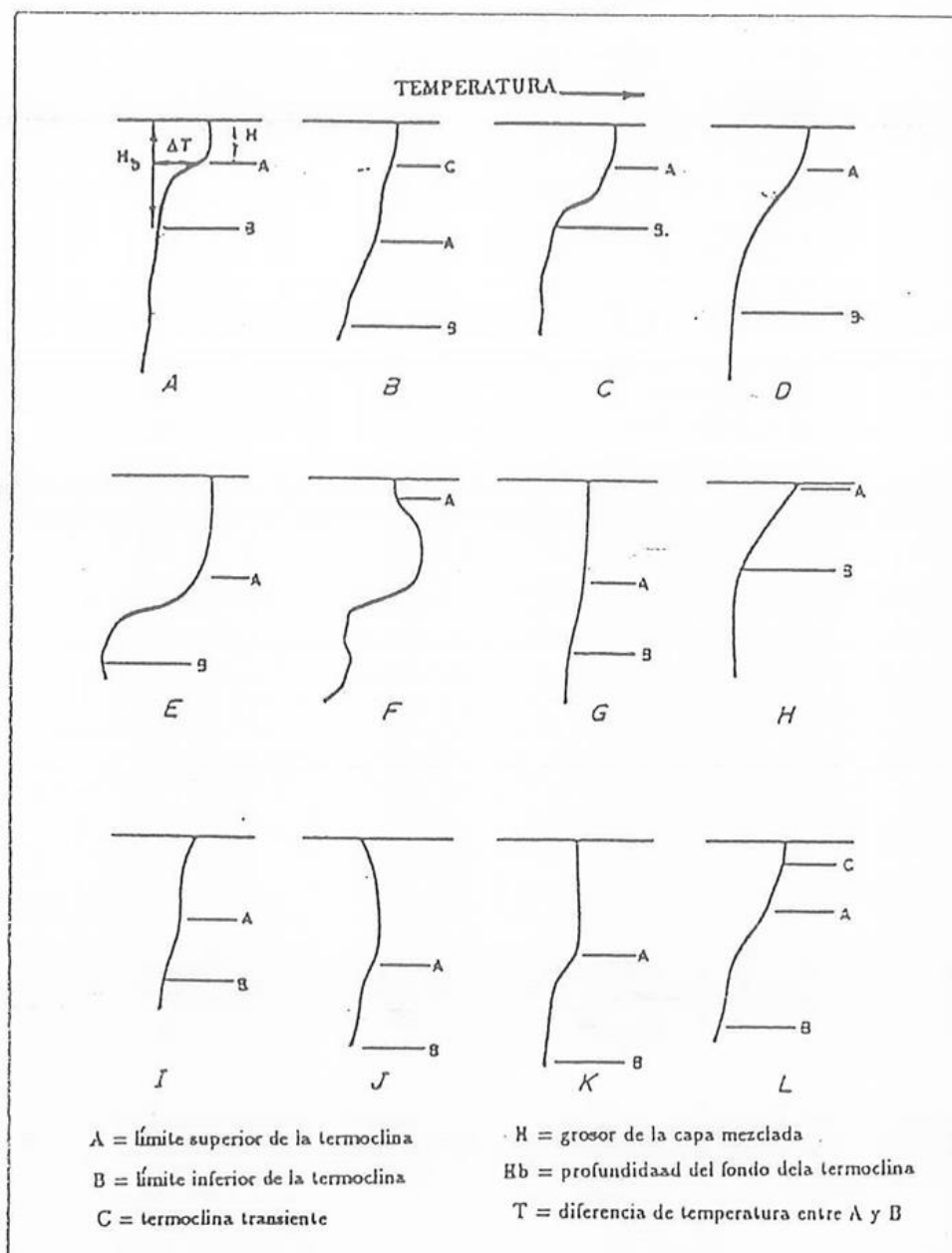


Figura 2. Perfiles de temperatura típicos de batitermógrafos, (tomado de Mazeika, 1960). En cada uno se marcan las principales características de la estructura termal.

Tabla I. Lista de datos agrupados por meses. BO son datos de botellas, CT y son de CTD, BC contienen datos de botellas y de CTD . Los cruceros marcados con * corresponden a períodos Niño.

Crucero (instr, ano,mes)	Cantidad de Lances				
	NORTE	ISLAS	SUR	total crucero	total mes
CT9001	060	062	064	186	186
BO5602	000	003	017	020	
* BO5702	000	007	046	053	235
BO7702	017	006	000	023	
CT9002	008	059	073	140	
BO3903	008	007	032	047	
CT7303	069	023	003	095	
* BC8303	000	013	096	109	394
CT8403	022	022	068	112	
BO8503	019	021	036	076	
BO5604	008	005	022	035	
* BO5704	007	005	022	034	164
BO7004	009	006	028	043	
BO5905	006	005	015	026	
BO6005	000	000	008	008	
BO6505	000	001	008	009	161
BO6705	000	000	004	004	
CT8405	030	065	050	145	
* BO5706	012	014	023	049	
BO6906	000	000	006	006	126
BO8206	036	031	004	071	
BO6707	000	000	020	020	68
CT9007	000	040	008	048	
* BO5708	015	012	022	049	
BO6908	001	002	010	013	147
CT9008	039	036	010	085	
BO6709	000	000	003	003	91
BO7109	066	022	000	088	
BO7410	019	037	031	087	
BO8110	006	040	006	052	216
* BO8310	000	006	035	041	
BO6111	000	006	034	040	
BO6311	000	001	008	009	
BO6711	001	003	011	015	
* BO7211	000	012	072	084	365
BO7911	020	000	017	037	
BC8411	021	030	046	097	
CT8511	000	077	067	144	
BO5612	000	004	008	012	12
TOTAL 39	499	683	1033	2215	

están graficados los datos puede influir en la apreciación de las características del perfil, particularmente en los que se presentan numerosas termoclinas y capas transientes, o los que son tipo densidad continua.

Como se ha mencionado, en todos los métodos automáticos para calcular la PCM se recurre a la observación directa de los perfiles para decidir si el método funciona correctamente (especialmente en los casos de perfiles complicados), por lo que es justificable el método directo, cuando menos como un criterio mínimo para métodos automáticos. Desde luego, en el caso del Golfo de California es posible hacer ésto porque la cantidad de perfiles disponibles no es excesivamente grande.

Para sistematizar en lo posible el procedimiento de evaluar cada perfil se siguieron los pasos descritos a continuación:

1o. La PCM estimada en cada lance de botella es la correspondiente al último dato en el perfil de temperatura que no varía significativamente. Por lo tanto en algunos lances puede haber una subestimación de hasta 10 metros dependiendo del intervalo encontrado con el dato siguiente.

2o. Los perfiles de datos sin información arriba de los 15 metros o mas, son descartados, así como aquellos cuyos intervalos de muestreo en la capa superior es mayor de 30 metros.

3o. Todos los perfiles son graficados con la misma escala.

4o. Se ignora cualquier estructura en los primeros 10 metros de profundidad (LaFond, 1954) a menos que bajo ella no se visualice ninguna capa mezclada, entonces la PCM adquiere el valor que le corresponda entre el primero y 10 metros.

5o. Se determina si la estructura es normal o de densidad continua.

6o. Se visualiza la termoclina estacional y la capa mezclada y se determina su profundidad.

7o. Si la estructura es tipo densidad continua y su pendiente es igual o menor a .07 grados centígrados por metro, se considera la PCM hasta un cambio de temperatura de un grado centígrado con respecto a la de los diez metros.

8o. Se considera termoclina estacional cualquier cambio de temperatura mayor o igual a los .07 grados centígrados por metro.

9o. Si la complejidad del perfil dificulta la visualización de la capa mezclada, se aplica en forma analógica el sistema de clasificación desarrollado por Mazeika (1960) que se muestra en la figura 2 (página 12).

El valor de la pendiente especificada en el inciso 7o fué obtenido de una muestra aleatoria de 100 perfiles de temperatura del Golfo con estructuras normales, en ellas se encontró que las capas mezcladas tienen pendientes dentro de un rango de 0 a .07 grados por metro y la temperatura tiene una variación promedio desde la superficie de 0.85 grados centígrados en ésta muestra. Los máximos que pueden llegar hasta 2 grados centígrados en perfiles de densidad continua y mínimos de 0 grados en los homotermales. Esto se hizo con el fin de establecer un criterio que auxilie en la evaluación de perfiles de temperatura más complejos, en particular aquellos en los que se presentan numerosas termoclinas y capas transientes.

Para hacer una descripción espacial, inicialmente se graficaron los contornos de diferentes profundidades en cada crucero. Para ello es usado un paquete de

subrutinas de NCAR, las cuales triangulan los datos no-equiespaciados y sobre ellos extiende una red virtual. Cada punto de la red recibe un valor interpolado. El método de interpolación es el basado en el algoritmo de interpolación de superficie C1 de Lawson (1977), redefinido por Akima (1978).

Cada gráfica se obtuvo separadamente, y a fin de mejorar el reconocimiento de algún patrón, se graficaron los contornos en forma particular para cada una de ellas. Esto no permite comparar las gráficas directamente entre sí o hacer el seguimiento temporal de una profundidad de capa mezclada en particular, sin embargo, es posible observar algunos patrones generales para cada zona y sus variaciones estacionales.

Enseguida se elaboraron gráficas mensuales de la PCM contra la distancia a lo largo del Golfo, a fin de proporcionar algunas estadísticas generales tales como promedios mensuales para secciones de 100 km de largo y sus desviaciones estándar.

La descripción temporal se llevó a cabo ajustando por mínimos cuadrados a los promedios diarios de la PCM las curvas:

$$h(t) = x_1 + x_2 \text{ sen}(wt) + x_3 \text{ cos}(wt) \quad (1)$$

para una señal anual,

$$h(t) = x_1 + x_2 \text{ sen}(wt) + x_3 \text{ cos}(wt) + x_4 \text{ sen}(2wt) + x_5 \text{ cos}(2wt) \quad (2)$$

para una señal anual mas una semianual y

$$h(t) = x_1 + x_2 \operatorname{sen}(wt) + x_3 \cos(wt) + x_4 \operatorname{sen}(2wt) + x_5 \cos(2wt) + x_6 \operatorname{sen}(4wt) + x_7 \cos(4wt) \quad (3)$$

para el ajuste anual mas la semianual respectivamente, en donde:

$$w = (2\pi/365)t^{-1}$$

el mínimo error cuadrático es:

$$e = \sqrt{(p - h)^2}$$

en donde p son los valores de los promedios diarios de los datos empíricos y h el valor correspondiente obtenido con la aproximación.

La amplitud de la señal anual es:

$$A = \sqrt{x_2^2 + x_3^2}$$

y su fase:

$$\phi = \arctan(x_3/x_2)$$

El ajuste por mínimos cuadrados se realizó para tres zonas típicas del Golfo: la parte norte, la zona entre las islas y la parte sur.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

En este capítulo se describen los resultados de la estimación de la profundidad de la capa mezclada en el Golfo de California y se ilustra con gráficas su distribución espacial y temporal, enfatizando la presencia de patrones generales, del ciclo estacional y de posibles anomalías relacionadas con el evento interanual de El Niño. Al término de cada descripción, se ofrecen y discuten posibles explicaciones de lo observado en los resultados.

4.1 DISTRIBUCION ESPACIAL.

En las gráficas iniciales de la PCM se pudo apreciar a primera vista que la división natural del Golfo también se reflejaba en los patrones de distribución y comportamiento de la PCM. Por esta razón, y para facilitar la inspección de las figuras, éstas fueron separadas en: el Golfo Norte incluyendo la Zona entre las Islas (Figura 3), y en el Golfo Sur (Figura 4). En estas figuras se presentan algunos ejemplos representativos a lo largo del ciclo estacional.

Golfo Norte.

En esta región destaca la presencia de un máximo de PCM sobre la cuenca Delfín durante los meses de octubre a marzo (Figura 3a a 3h). De octubre a febrero el máximo de PCM aumenta de 30 a 90 metros, y el valor promedio aumenta de 20 a 70 metros. De junio a septiembre la distribución de PCM no presenta patrones claros y su valor promedio se mantiene alrededor de 25 metros.

La señal estacional está claramente relacionada con la estacionareidad de los

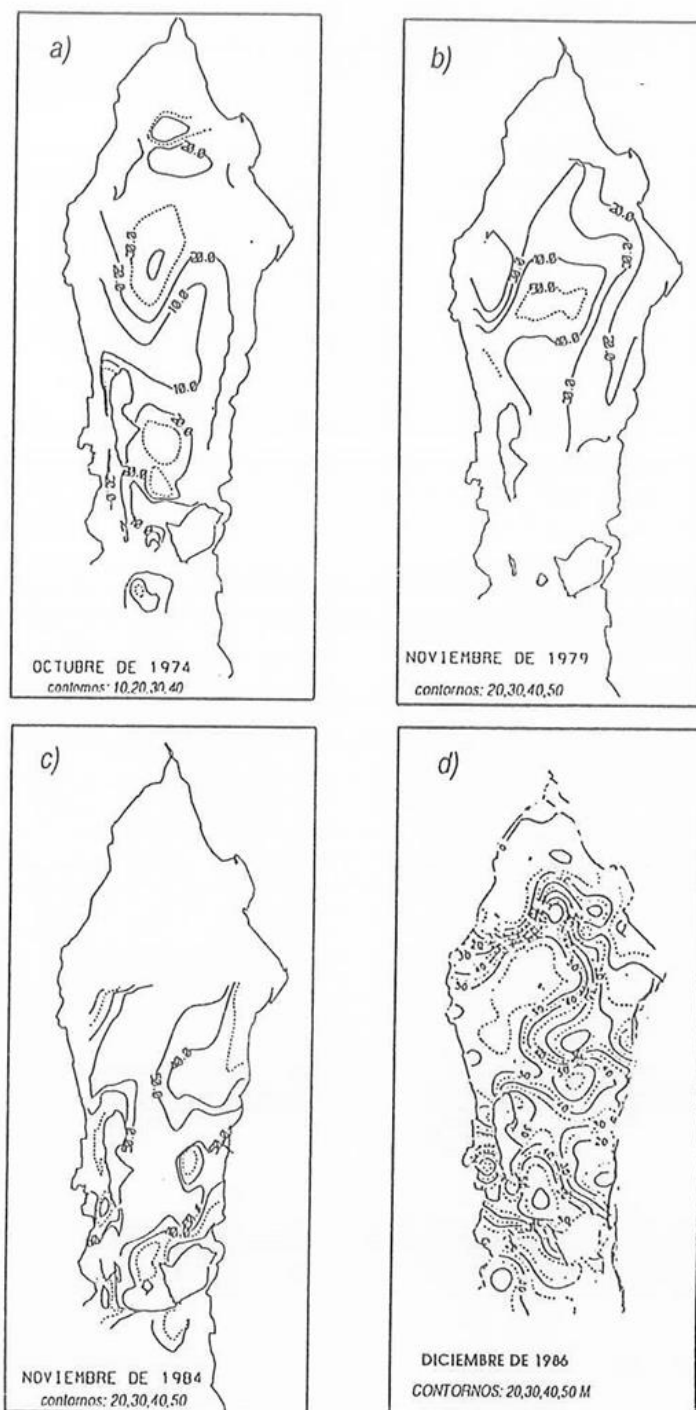


Figura 3. Contornos (m) de la PCM, de muestreos realizados en el Golfo Norte de octubre a febrero durante diversos años, entre 1957 y 1990.

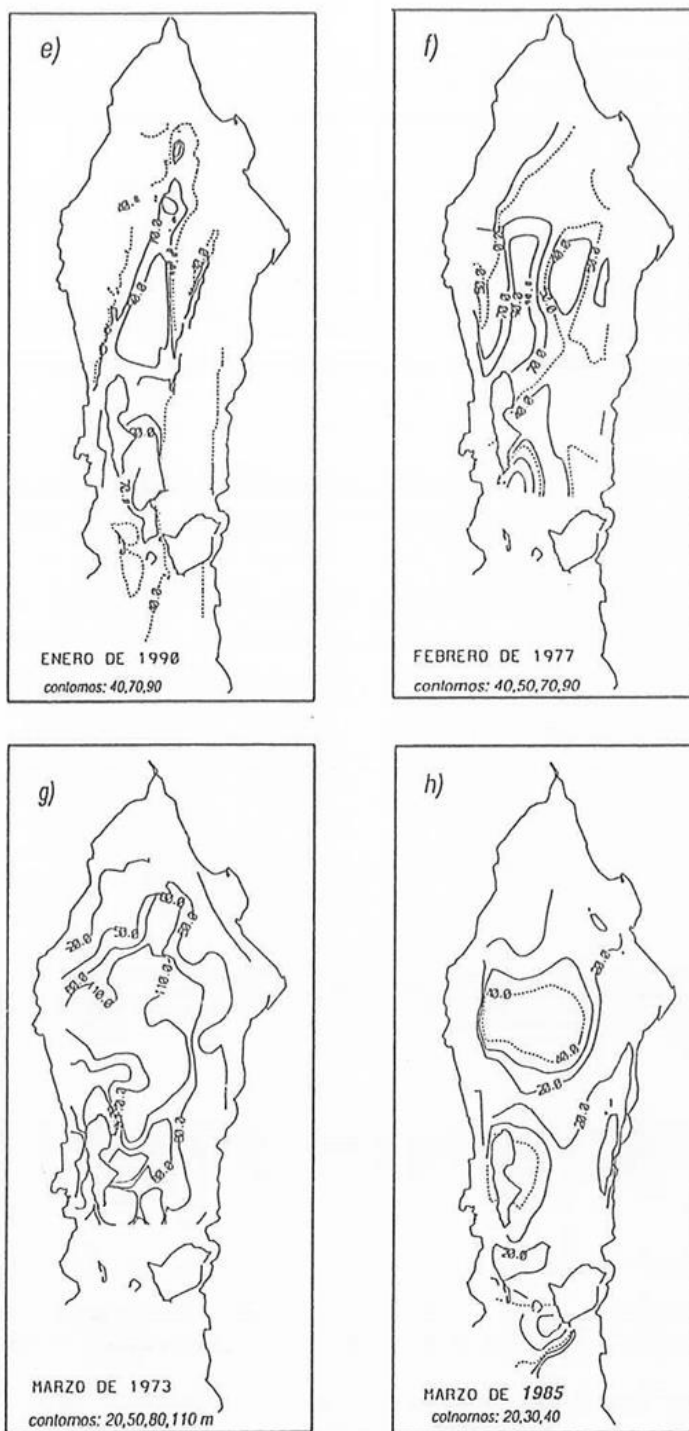


Figura 3. (continuación).

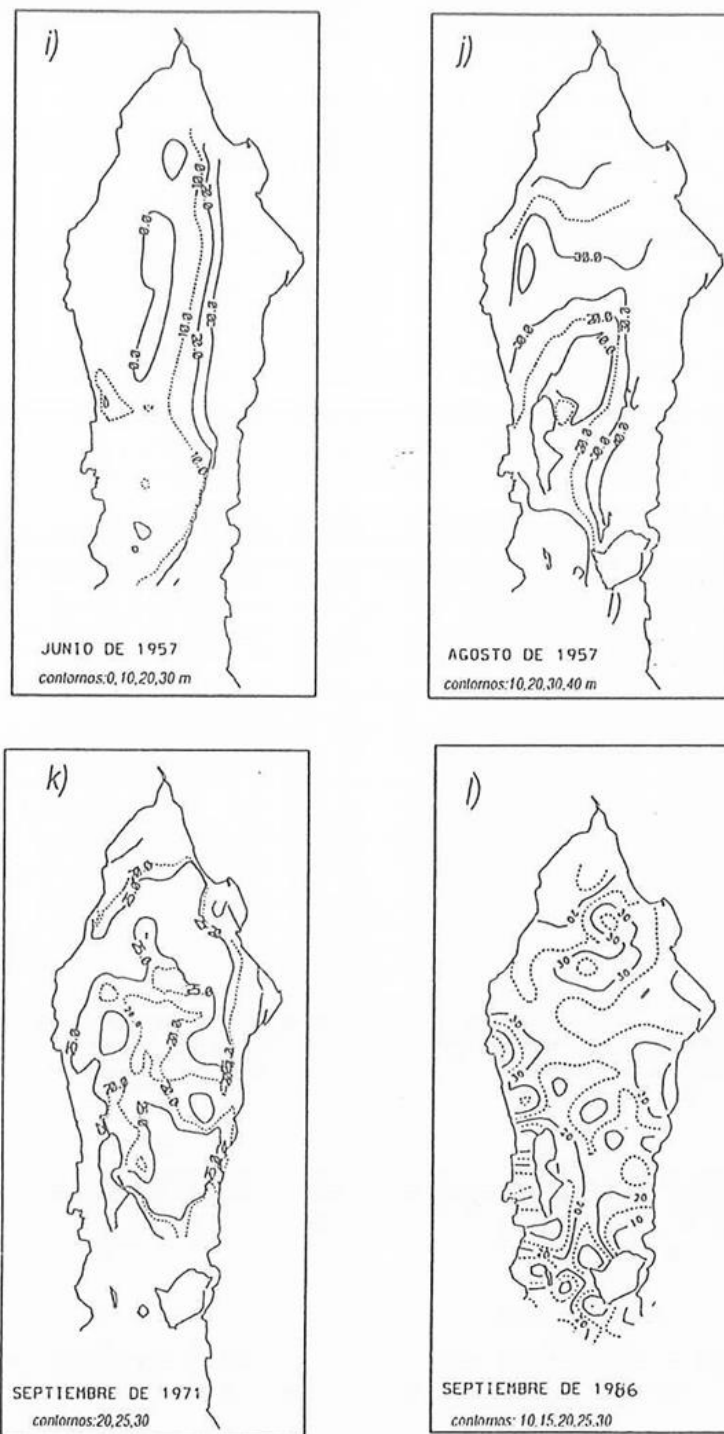


Figura 3. (continuación).

mecanismos de estratificación y de mezcla. De octubre a febrero disminuye el flujo de calor por radiación solar mientras aumenta la intensidad del viento causando mezcla por agitación y por convección vertical (las capas superficiales son enfriadas por la evaporación, la cual se incrementa con la velocidad del viento).

La posición del máximo de la PCM coincide con la del giro anticiclónico propuesto por Bray (1988) como característico de la circulación de invierno en esta zona. Esta autora también sugiere que la circulación anticiclónica de invierno es mas fuerte que la circulación ciclónica de verano. La gran diferencia entre las distribuciones de la PCM para verano e invierno sugiere cierta congruencia con el patrón estacional de circulación.

Se observó un comportamiento diferente en los cruceros realizados durante e inmediatamente después de eventos El Niño. En el crucero de marzo de 1984 no aparece el máximo de PCM y su valor promedio es de solo 20 metros. En gran contraste, durante el crucero de marzo de 1973 la capa mezclada alcanzó 130 metros de profundidad sobre la cuenca Delfín.

Dado que los dos cruceros mencionados se hicieron al finalizar ambos períodos de El Niño, podría esperarse que la variabilidad inusual de la PCM observada esté relacionada con ese evento interanual. Además ambos eventos fueron muy fuertes, particularmente el de 1982-1984 el cual, por otro lado, difiere en muchos aspectos de otros períodos de El Niño (Taft, 1984). Sin embargo, los muestreos no coincidieron con las máximas anomalías registradas en el Golfo y de hecho existen reportes de condiciones intensas no-El Niño durante marzo de 1984 (Torres, 1983) lo que nos haría esperar mezcla intensa en la columna de agua en vez de la relativa estratifi-

cación que ya hemos observado en esta fecha. Santamaría et al. (1994), encontró que no hubo efectos significativos de El Niño de 1982-1984 en la biomasa del Norte del Golfo a pesar de la anomalía positiva de temperatura superficial.

Lo anterior sugiere que el Golfo Norte responde anómalamente a los eventos de El Niño. Sin embargo, la información disponible no permite delinear un patrón de comportamiento de la PCM durante El Niño. Aparentemente la PCM se comporta de diferente forma en diferentes períodos El Niño, ésto ha sido señalado por Lavín, et al. (1994) para la hidrografía del Golfo Norte y por Reyes-Hernández (1993) para la meteorología de la misma zona.

Zona entre las Islas.

En esta zona, los contornos de PCM no muestran patrones espaciales claramente definidos; sin embargo parece haber valores mas altos durante el invierno que durante el verano. En varios de los cruceros resaltan fuertes gradientes horizontales de PCM.

Los agentes causantes de mezcla en la zona entre las islas zona presentan algunas diferencias importantes con respecto al resto del Golfo. La mezcla por mareas y por fenómenos hidráulicos internos están concentrados sobre los umbrales del canal de Ballenas creando intensos frentes térmicos (Argote et al., 1994; Paden et al., 1991; Badan et al., 1985). Además, el canal de Ballenas presenta condiciones de mezcla aparentemente debidas a fricción en las paredes del canal y por turbulencia interna; la energía para esta mezcla se debe principalmente a las fuertes corrientes de marea. El régimen de vientos también presenta un comportamiento singular:

normalmente el viento es mas fuerte que en el resto del Golfo y presenta componentes transversales al canal. Esta combinación de fenómenos, todavía no estudiados, no permite la formación de patrones claros de la PCM.

Golfo Sur.

La distribución de la PCM en el Golfo Sur (Figura 4) presenta núcleos en donde la capa mezclada es máxima, principalmente sobre la cuenca de Guaymas y algunas veces en la cuenca del Carmen y la de Farallón. Además de la señal estacional que tiene el promedio espacial de la PCM (entre 70 y 10 metros), es claro que la mayor parte del año la PCM presenta un gradiente transversal al Golfo, el cual también cambia estacionalmente. De octubre a marzo la PCM es mayor en la costa occidental del Golfo; este patrón desaparece a partir de abril o mayo. No es muy claro, debido a la escasez de datos, si el gradiente cambia de signo durante el verano, aunque en junio de 1957 la PCM es mayor en la costa oriental.

La explicación mas probable del gradiente transversal de la PCM y sus cambios estacionales es la generación de surgencias costeras en la costa oriental por el viento NW que sopla durante el invierno a lo largo del Golfo. Esto transportaría agua superficial de la costa oriental (reduciendo la PCM) hacia la costa occidental (donde la convergencia aumentaría la PCM).

El comportamiento de la PCM descrito anteriormente es consistente con los cambios transversales y temporales de la temperatura superficial reportados por Robinson (1973). Durante junio a septiembre la temperatura es mayor en la costa este y de noviembre a marzo es mayor en la costa oeste. Robles y Marinone (1987)

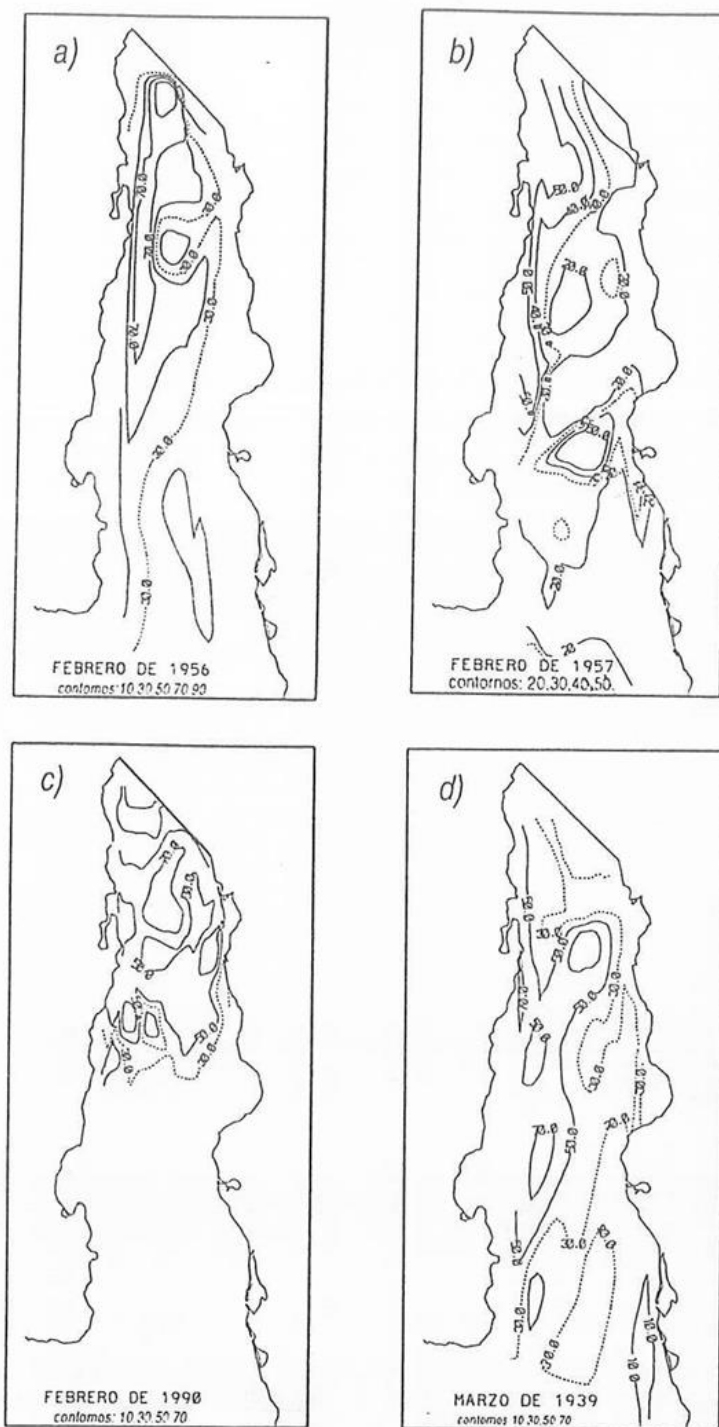


Figura 4. Contornos (m) de la PCM, de muestreos realizados en el Golfo Sur de febrero a diciembre durante diversos años, entre 1939 y 1990.

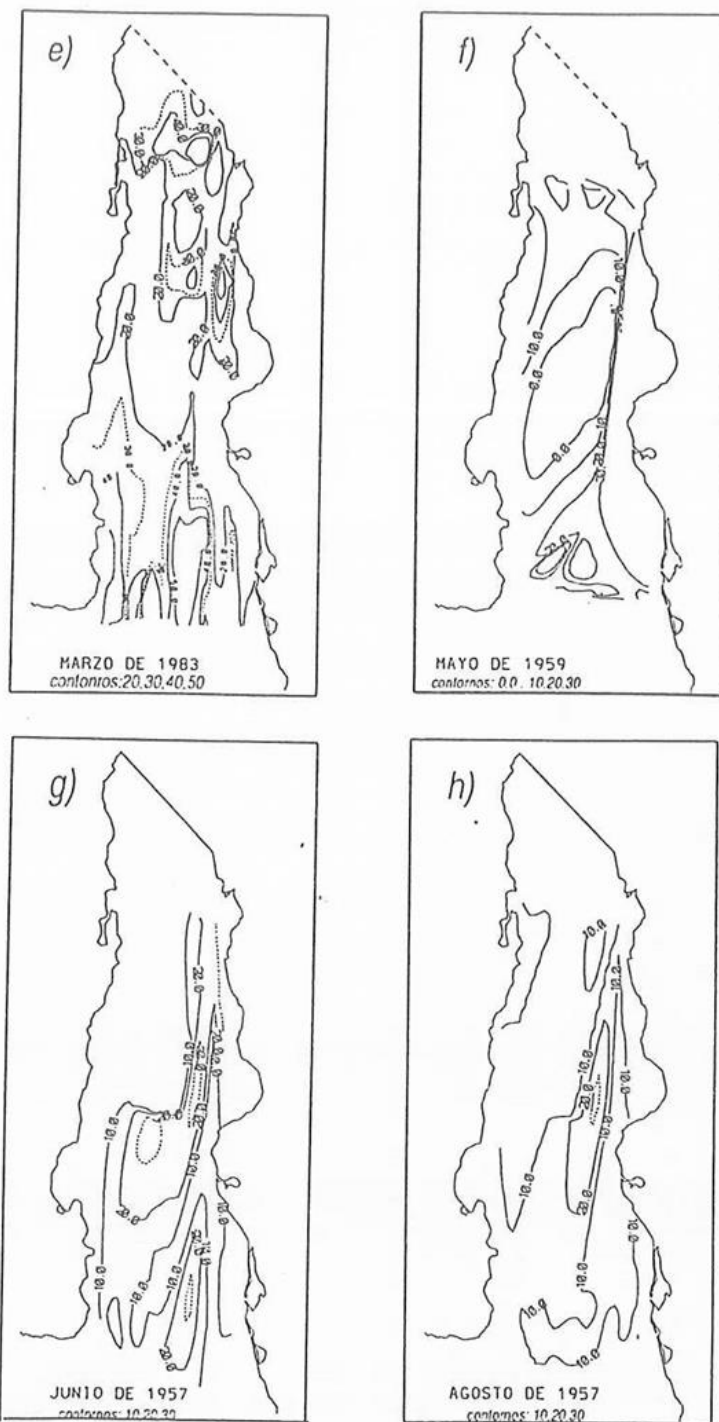


Figura 4. (continuación).

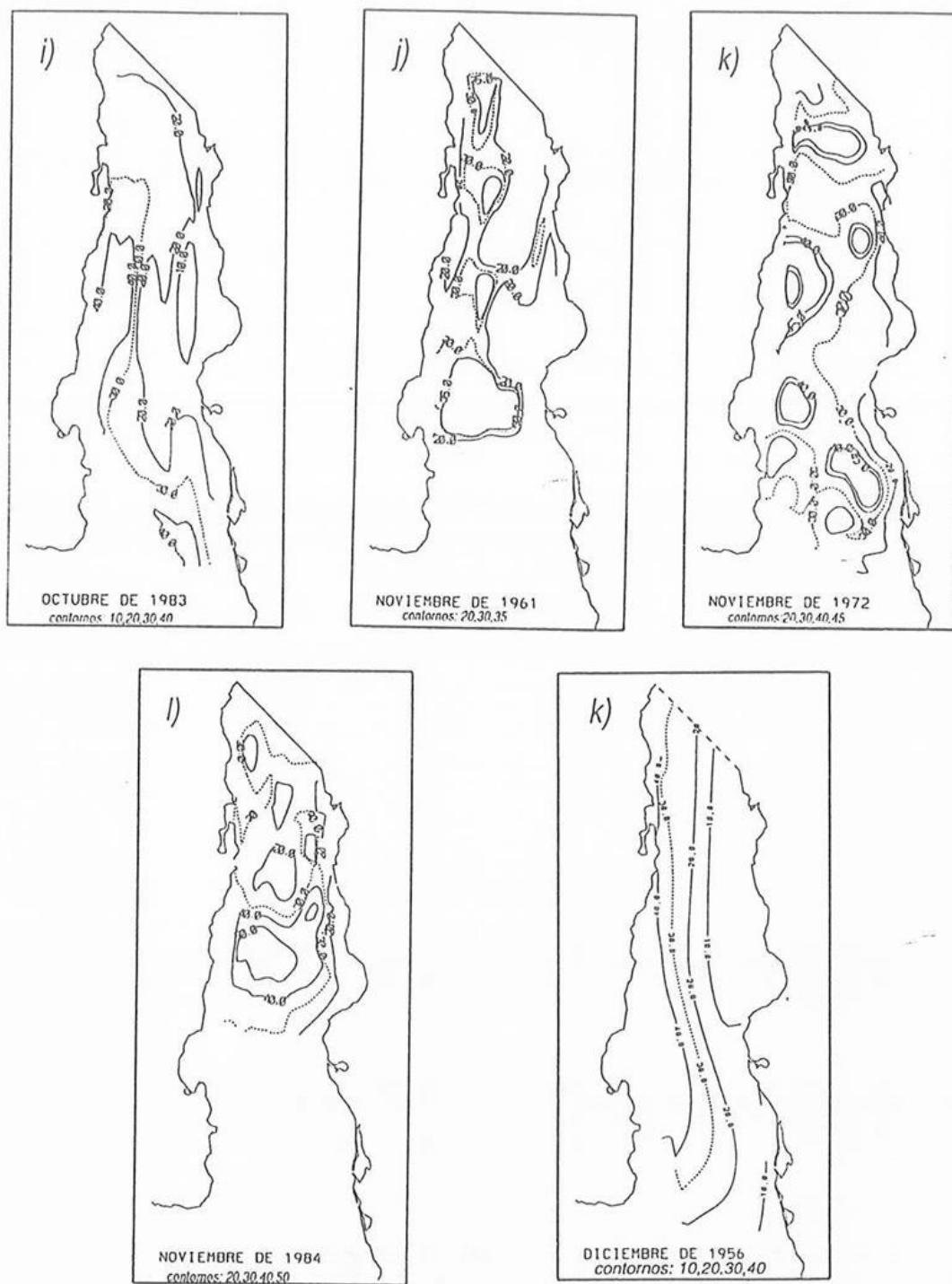


Figura 4. (continuación).

observaron un gradiente transversal de la profundidad del fondo de la picnoclina sobre la Cuenca de Guaymas atribuido al efecto de las surgencias.

También existen varios reportes de la presencia de giros del ancho del Golfo sobre las cuencas (Badán et al., 1985; Emilsson y Alatorre, 1980), y es probable que los máximos de PCM sean también una manifestación de su presencia.

El efecto de El Niño no es claro en el Golfo Sur, aunque las mínimas PCM observadas en el crucero de mayo de 1959 (figura 4f), son consistentes con la anomalía positiva de la temperatura superficial señalada por Robles y Marinone (1987), durante el evento de El Niño de 1957. La anomalía persistió durante los siguientes dos años alcanzando las máximas temperaturas superficiales en abril-mayo de 1959.

La presencia de El Niño de 1982-1983 no es notable en la distribución de la PCM de marzo y octubre de 1983, quizá debido a que durante esos meses los procesos de mezcla pueden encubrir el efecto estratificador de El Niño.

Una vez que se han identificado los patrones generales de la distribución espacial de la PCM, se hace necesario simplificar los datos para proporcionar una cuantificación del comportamiento espacio-temporal de la PCM en el Golfo de California. Para ello se promediaron los datos de la PCM en celdas de 100 km a lo largo del Golfo (Figura 5).

Las mínimas PCM observadas en el Golfo son de cero metros y las mayores son de casi 200 m. Las primeras aparecen a todo lo largo del Golfo especialmente en los meses de verano; las CM mas profundas ocurren en el Canal de Ballenas, en la Zona entre las Islas y en el Golfo Norte.

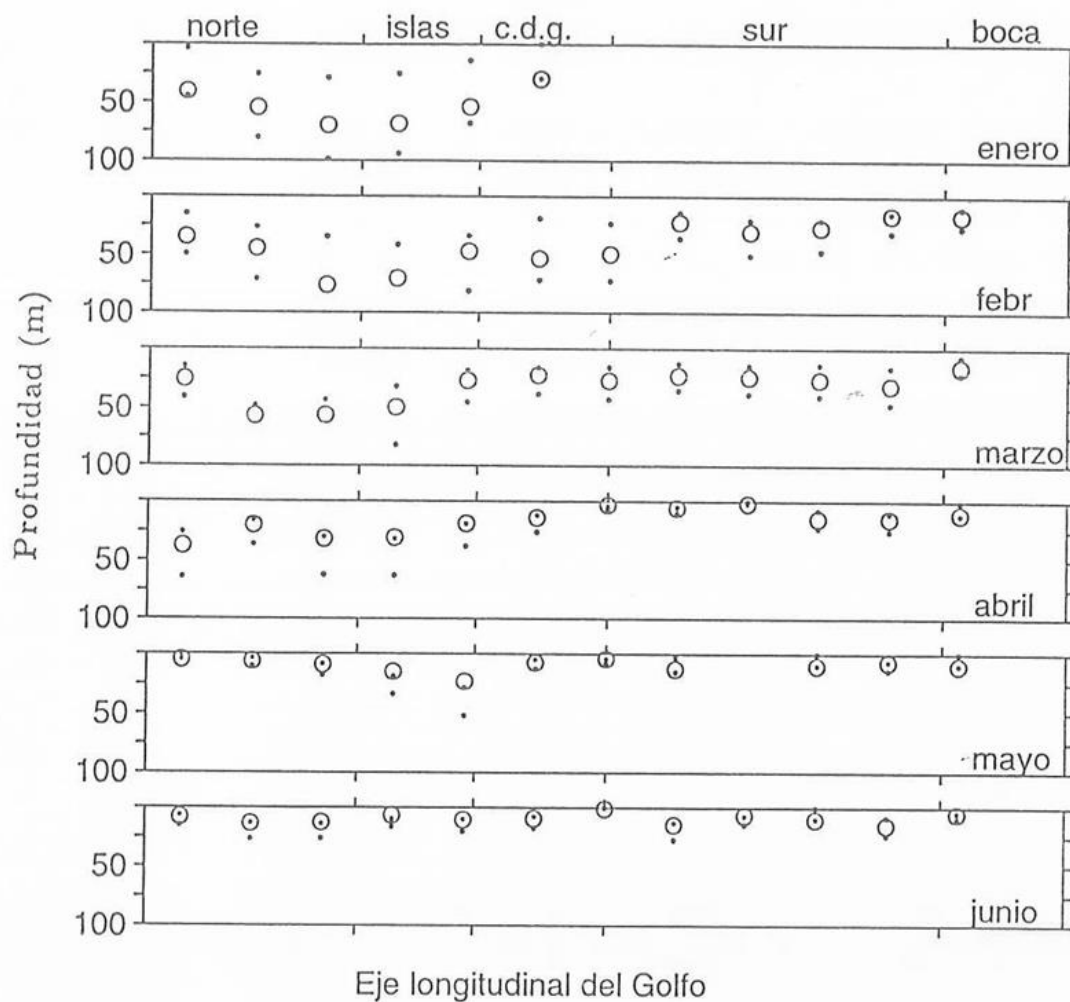


Figura 5. Distribución longitudinal de la profundidad de la capa mezclada durante los meses de enero a junio. Los círculos son los promedios en metros y los puntos son su desviación estándar obtenida cada 100 km. Se presenta una gráfica para cada mes.

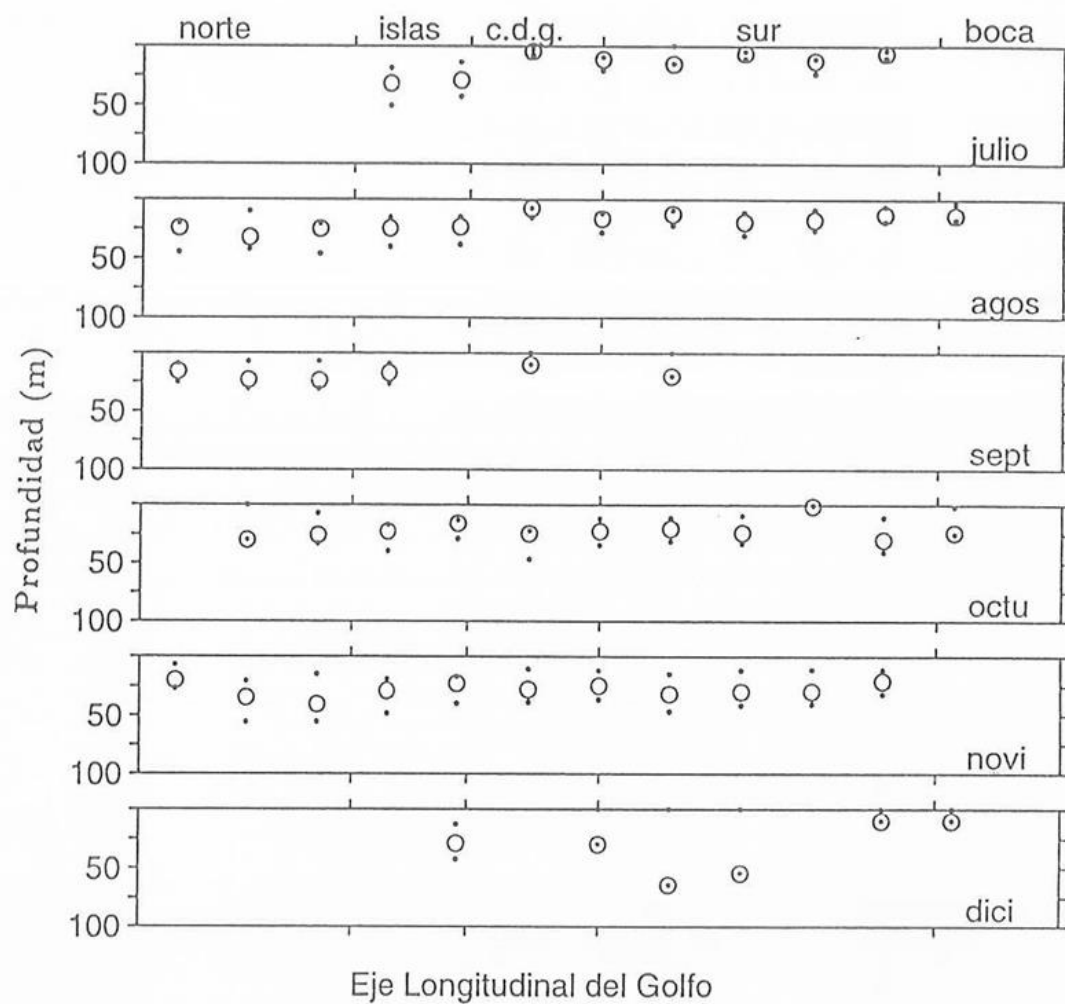


Figura 5 (continuación). Distribución longitudinal de la profundidad de la capa mezclada durante los meses de julio a diciembre.

Tabla II. Algunos valores de promedios de la PCM y su desviación estándar. Los datos por columna de izquierda a derecha para cada mes son: a) Número de intervalo, b) Promedio mayor y menor de todo el Golfo, c) Desviación estándar mayor y menor y d) Valor superior del máximo rango de temperatura encontrado en todo el Golfo.

	a	b	c	d
enero 186 dat	1.		3.9370	
	2.			
	3.	69.7143	29.2072	98.9215
	6.	30.0000		
febrero 235 datos	3.	76.5238		
	4.		42.0209	112.0409
	11.	16.3333		
	12.		10.6500	
marzo 394 dat	2.	57.1007	40.1931	105.3010
	6.			
	12.	15.4000	6.6013	
abril 164 dat	1.	37.6667		63.9514
	4.		32.0623	
	7.	3.1000		
	12.		1.0000	
mayo 161 dat	4.	23.3367	20.6049	51.9416
	6.	4.0000		
	7.		2.5000	
junio 126 dat	2.			26.7676
	3.		13.0244	
	4.			
	11.	15.0000		
julio 68 dat	12.	5.5000	4.5000	
	4.	31.9167	10.0545	50.7712
	6.	4.4000	3.3226	
agosto 147 dat	2.	32.2500		
	3.		20.0459	45.9007
	6.			
	12.	7.6154	3.5000	
septiembre 91 dat	1.		9.5379	
	4.	23.6429	7.3252	30.9680
	7.	10.0000		
octubre 216 dat	2.	30.0000		
	6.		22.1207	46.4707
	10.	1.0000		
	12.		1.5000	
noviembre 365 dat	1.	20.0000	7.0711	
	2.		20.0301	55.6301
	3.	40.5217		
	5.			
diciembre 12 dat	8.	64.0000		
	11.	10.0000		
	12.	10.0000		

El trimestre de enero a marzo es un período notable en el Golfo Norte y en la zona entre las islas: la capa mezclada se profundiza mucho, alcanzando un promedio de 76.5 m sobre la cuenca en febrero (intervalo 3). También en los intervalos del 1 al 5, se observan las desviaciones estándar mas grandes de todo el Golfo durante todo el año, incrementándose aún más al finalizar el invierno; en marzo la PCM varía entre los 6 y los 105 metros. Por lo tanto durante esta temporada no es raro encontrar capas homotermales de más de 100 metros de profundidad. El cambio al régimen de verano ocurre en abril en el sur del Golfo, luego en mayo en la parte norte y por último en el sur durante el mes de junio.

Si bien la PCM en el norte del Golfo se caracteriza por los amplios valores de sus parámetros, lo opuesto ocurre en el sur (intervalos del 6 al 12) en donde la profundidad promedio de la capa de mezcla rara vez sobrepasa los 25 metros elevándose hasta alrededor de los 15 metros desde abril hasta julio y la máxima desviación, de 23 metros, ocurre en febrero.

4.2 VARIACION TEMPORAL.

En la distribución espacial que acabamos de describir, es claro que el Golfo está dividido al menos en tres regímenes espaciales distintos: el Golfo Norte, la Zona entre las Islas y el Golfo Sur; los cuales también exhiben algunos cambios temporales (Figura 5). La variación temporal observada en los resultados anteriores sugieren un cierto grado de independencia entre cada zona del Golfo.

Al principio del año, la capa mezclada es relativamente profunda en todo el Golfo. Enseguida suceden rápidos cambios, en menos de cuatro meses ocurren los valores mínimos anuales estableciéndose el régimen de verano que persiste entre un

mes en el norte, a tres meses en el sur sin variaciones notables. A partir de entonces empieza el proceso más lento de mezclar nuevamente la columna de agua, hasta alcanzar de nuevo su máxima profundidad entre enero y febrero.

La transición de primavera ocurre durante marzo y abril y los datos, a los que se ajustan las curvas, están más dispersos. En contraste, durante la transición de otoño es notable la menor dispersión de los datos y el tiempo que dura esta etapa es mucho mayor que en primavera. Este patrón se observa con más claridad en el Norte en donde la transición dura tan solo un par de meses seguido de un verano que también transcurre con relativa rapidez.

De cualquier forma, es evidente a través de los sucesivos ajustes armónicos que se presentan en las figuras 6, 7 y 8, que la evolución temporal de la capa de mezcla no es simétrica a lo largo del año en ninguna zona del Golfo. Basta la introducción de un segundo armónico (Figuras 6b, 7b y 8b), para que las curvas se ajusten mejor a los datos en forma significativa: todos los mínimos se desplazan hacia la izquierda entre dos a tres meses apareciendo a fines de mayo aproximadamente. También los valores máximos se recorren hacia febrero y lo que obtenemos finalmente es un comportamiento no sinusoidal de la PCM a lo largo del ciclo anual.

No obstante que el comportamiento de la PCM descrito anteriormente se observa en todo el Golfo, existen variaciones notables entre la parte sur y el norte del Golfo. El promedio del ajuste de la capa mezclada es cercana a los 30 metros en la región Norte y en las islas con una amplitud de los armónicos anual y semianual de 21 y 12 m en el Norte y de 17 y 10 metros en las islas. En el Golfo Sur el promedio del ajuste es de 22 metros y la amplitud de los armónicos es de 14 y 4 m.

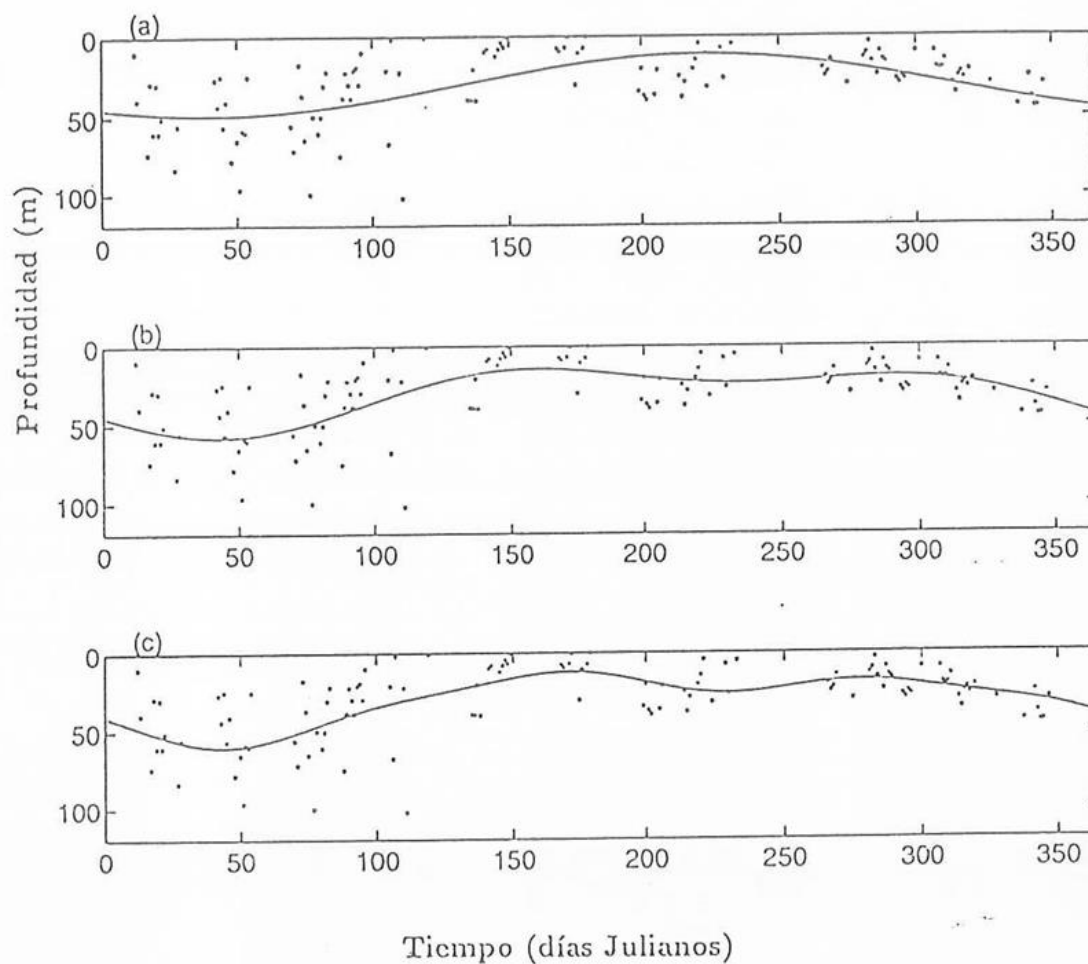


Figura 6. Señales estacionales de la PCM (m) en el Golfo Norte: a) ajuste anual, b) ajuste anual mas el semianual, c) ajuste anual mas semianual mas trimestral. Los puntos son los promedios diarios de la PCM a los que se ajustaron las curvas.

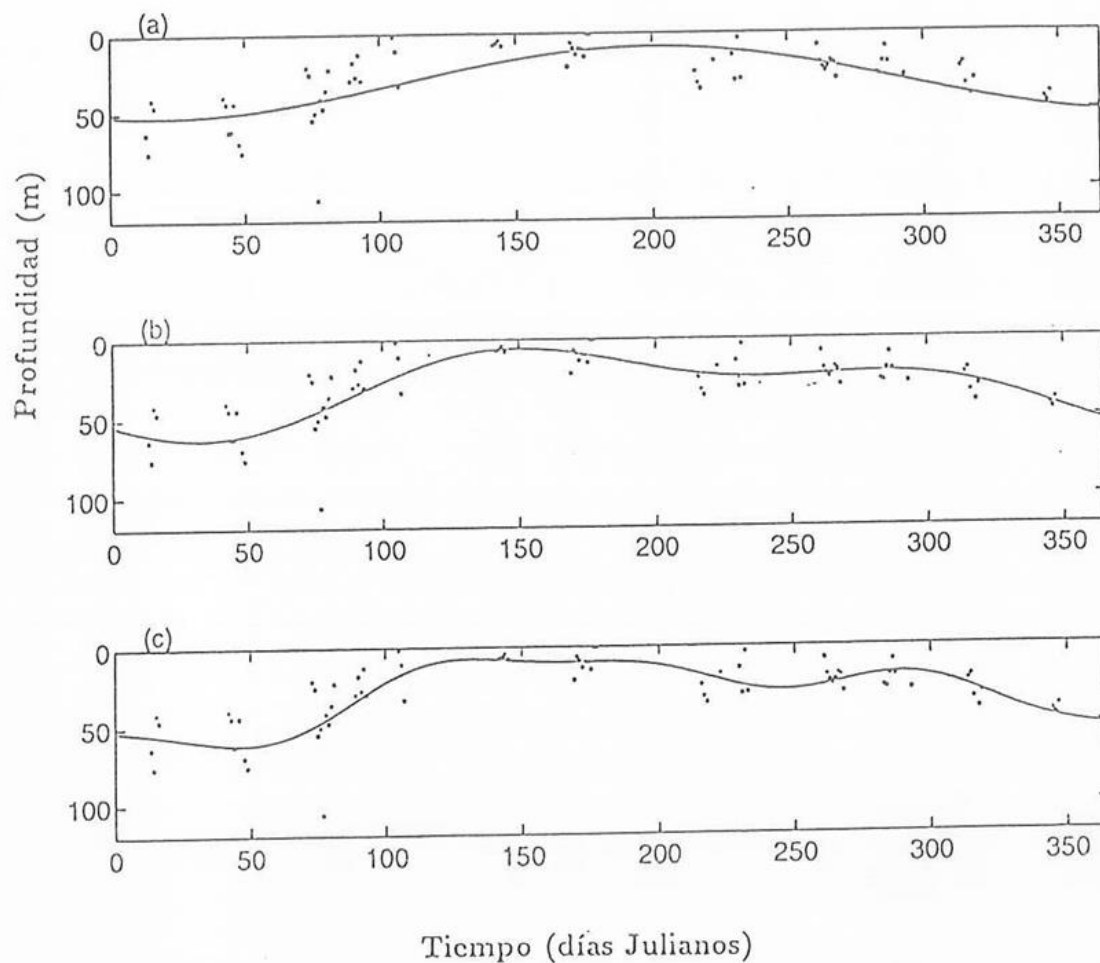


Figura 7. Señales estacionales de la PCM (m) en la zona entre las Islas: a) ajuste anual, b) ajuste anual mas el semianual, c) ajuste anual mas semianual mas trimestral. Los puntos son los promedios diarios de la PCM a los que se ajustaron las curvas.

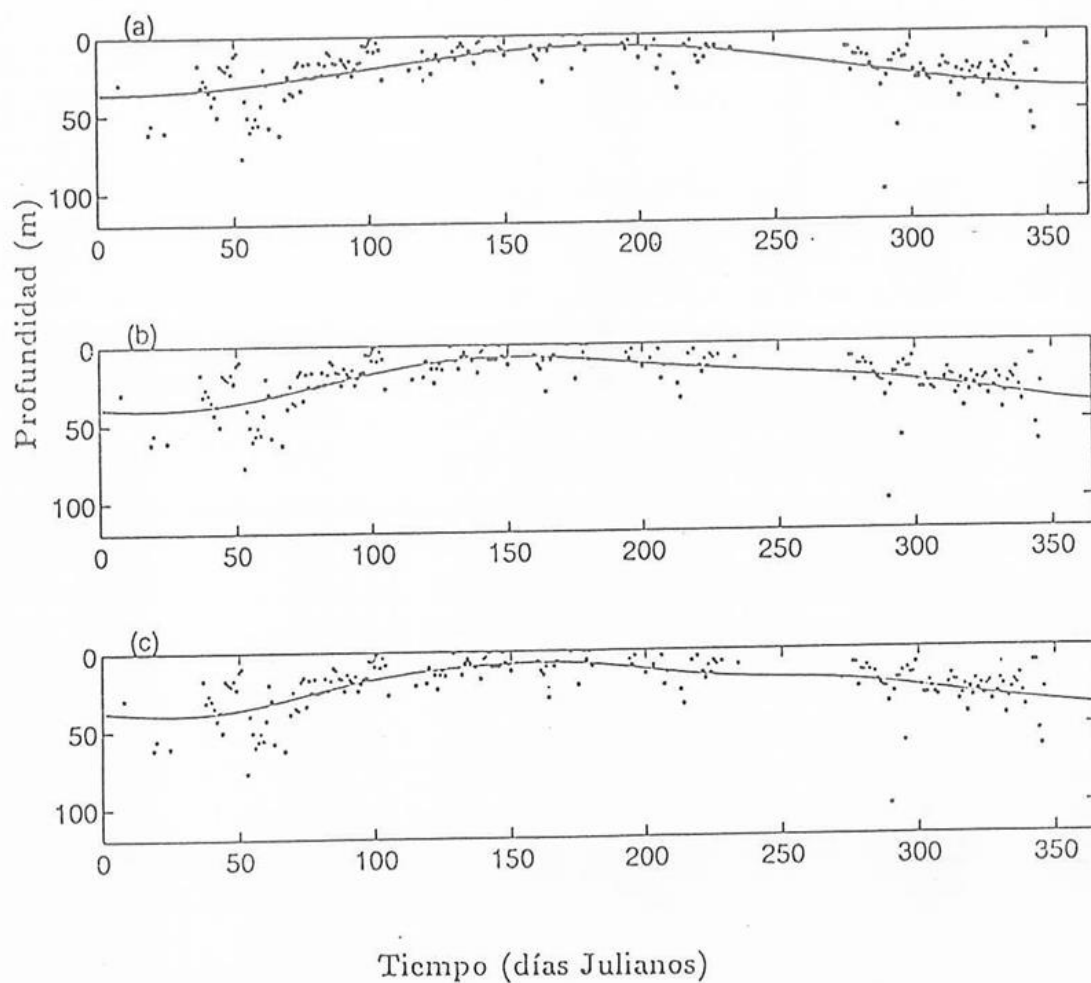


Figura 8. Señales estacionales de la PCM (m) en el Golfo Sur: a) Ajuste anual, b) ajuste anual mas el semianual, c) ajuste anual mas semianual mas trimestral. Los puntos son los promedios diarios de la PCM a los que se ajustaron las curvas.

Hay un ligero desfase al inicio de los eventos en cada zona. El régimen de invierno alcanza su mayor intensidad en los primeros días del año en la zona Sur, entre enero y febrero, ocurre lo mismo en el norte y entre las islas. Este desfase, que no es muy grande, parece estar relacionado con la transición de primavera la cual dura un poco más en el Golfo Sur. También los cambios meteorológicos son más abruptos en el Golfo Norte y por tanto hay un mayor contraste entre invierno y verano en el Golfo Norte.

No hay mucha diferencia cuantitativa entre los tres ajustes y a partir del tercero el error disminuye tan solo algunas décimas de metro, lo cual es dos órdenes de magnitud menor que el error que posiblemente se introdujo al estimar la PCM (Tabla III). Sin embargo, es claro que un solo armónico no representa el comportamiento temporal de la PCM. Por lo tanto consideramos que el segundo ajuste es necesario y al mismo tiempo suficiente ya que su estructura pone de manifiesto el peculiar ciclo estacional de la PCM.

La diferencia cuantitativa entre los promedios anuales (Tablas IV y V) de las señales en el Norte e Islas y la señal en el Sur es una manifestación de la eficiencia relativa de los mecanismos de mezcla de cada zona. Como ya se dijo, la mezcla por marea sobre la plataforma en el Golfo Norte, sobre los umbrales y en el canal de Ballenas además de la intensa convección en las cuencas del norte son causa directa de que aparezcan estos promedios anuales relativamente altos. Por el contrario, los mecanismos de estratificación tienen mas o menos igual efecto en todo el Golfo.

El comportamiento asimétrico de la PCM en el Golfo puede explicarse a través de los mecanismos que controlan la interacción entre un fluido turbulento sobre otro

Tabla III. Coeficientes de las componentes de las series trigonométricas ajustadas a cada juego de datos. En A corresponden al ajuste anual, B al anual mas el semianual, en C al anual, semianual y trimestral. D contiene el promedio de los datos y C muestra los errores cuadráticos medios para cada ajuste en cada zona.

		NORTE	ISLAS	SUR
A	x1	30.7280	30.2549	21.5119
	x2	6.9027	12.1918	1.1285
	x3	21.1358	14.7080	14.4889
.....				
B	x1	30.1970	30.5655	22.5168
	x2	5.6695	10.1371	0.2457
	x3	20.7215	14.1307	14.5697
	x4	12.2215	9.9705	4.0473
	x5	2.7103	0.0760	1.9313
.....				
C	x1	29.7466	30.3335	22.3526
	x2	5.0725	10.4473	0.2860
	x3	21.4369	13.7769	14.3904
	x4	11.9050	9.9615	4.0834
	x5	2.4160	-0.7480	1.5963
	x6	-4.4571	-0.5762	0.1499
	x7	-1.2295	-2.6542	-0.8230
.....				
D	h	30.7661	31.7290	22.4733
.....				
E	e1	17.3929	19.3403	12.6497
	e2	15.4781	18.0411	12.2579
	e3	15.2596	17.9409	12.2454

Tabla IV. Parámetros del ajuste anual en cada zona: promedios (a), amplitudes (A), fases , PCM máxima y mínima, tiempos en que ocurren los máximos y mínimos y tiempo en que ocurre el desfase.

$$h(t) = a + A \sin(\omega t + \phi)$$

	NORTE	ISLAS	SUR
a	30.7280	30.2549	21.5119
A	22.2344	19.1046	14.5328
O	1.2551	0.8787	1.4931
PCMmax	52.9620	49.3594	36.0442
PCMmin	8.4937	11.1505	6.9791
t (PCMmax)	18.2276	40.2056	4.5154
t (PCMmin)	200.8376	222.7056	187.0154
to	72.9123	51.0444	86.7346

Tabla V. Parámetros del ajuste anual mas el semianual, se muestran separadamente para cada armónico: promedio (a), valor máximo y mínimo de la PCM, amplitudes (A y B), fases , tiempos en que ocurren máximos y mínimos y tiempo del desfase.

$$h(t) = a + A \sin(\omega t_1 + \phi_1) + B \sin(2\omega t_2 + \phi_2)$$

	NORTE	ISLAS	SUR
a	30.1970	30.5655	22.5168
PCMmax	62.9475	57.7721	40.3904
PCMmin	5.8322	14.3899	7.4826
.....			
A	21.4831	17.3907	14.5717
ϕ_1	1.3037	0.9485	1.5539
t1 (PCMmax)	15.5143	36.1502	0.9796
t1 (PCMmin)	198.0143	218.6502	183.4796
t0	75.7357	55.0998	90.2704
.....			
B	12.5184	9.9708	4.4845
ϕ_2	0.2182	0.0076	0.4452
t2 (PCMmax)	39.2862	45.4037	32.6932
t2 (PCMmin)	130.5362	136.6537	123.9432
t0	12.6775	0.4425	25.8636

no turbulento (Kraus, 1979). El esfuerzo del viento sobre la superficie marina genera un "frente de mezcla" que se introduce, por difusión turbulenta, dentro de la columna de agua. Bajo la capa turbulenta se forma una termoclina y una picnoclina asociadas a la diferencia de densidades entre ambos fluidos. La energía turbulenta debe proceder contra esa diferencia de densidades para generar mezcla en la columna de agua. Por esta razón, entre más estratificada y estable esté la columna de agua, con más lentitud avanza la mezcla.

Por otro lado, el proceso de estratificación es más simple. Debido a calentamiento intermitente de la superficie se forman diferentes niveles de capas mezcladas cuyas interfases son independientes una de la otra. Esto ocurre durante el período de creciente absorción de calor por la superficie marina. La profundidad de la interfase entre la capa mezclada y la estratificada y estable (termoclina) detiene su ascenso a la superficie cuando la razón de absorción de calor empieza a disminuir. Entonces es cuando se observan los valores mínimos de la PCM aunque la temperatura superficial siga aumentando.

En nuestro caso, los valores mínimos ocurren a fines de mayo o principios de junio seguidos por dos o tres meses en que la capa mezclada se profundiza ligeramente. Estos mínimos ocurren al mismo tiempo que la razón máxima de calentamiento del Golfo reportada por varios autores (Castro et.al. 1994; Ripa y Marinone, 1989; Lavín y Organista, 1988), (Figura 9). Los meses que siguen corresponden a una disminución de la razón de calentamiento del Golfo lo que permite un leve incremento de la PCM en algunas zonas aunque es probable que su temperatura promedio continúe aumentando debido a que la superficie marina sigue almacenando calor.

Entre finales de agosto y principios de octubre, la razón de calentamiento cambia de signo en cada zona del Golfo y entonces se establece el período de "enfriamiento", que es cuando la superficie empieza a ceder calor a la atmósfera. En la primera mitad de este período de "enfriamiento", que corresponde propiamente al otoño, los mecanismos de mezcla han ido erosionando una por una las diversas interfases preexistentes en la columna de agua. Una vez que la mezcla ha sobrepasado esa barrera de transientes, la PCM se incrementa con mayor rapidez durante el invierno hasta alcanzar su máxima profundidad al término de la estación. La profundidad máxima depende, como ya se dijo antes, de los mecanismos de mezcla que existen en cada zona.

Turner and Kraus (1967) muestran cualitativamente este comportamiento en un modelo de laboratorio y encuentran que "las características de la elevación de la interfase durante la estación de calentamiento, seguido primero por un lento y después por un acelerado incremento de la profundidad después que el calentamiento ha alcanzado su máximo", aparecen en los resultados tanto de los experimentos de laboratorio (Figura 10), como en los teóricos y en los observacionales.

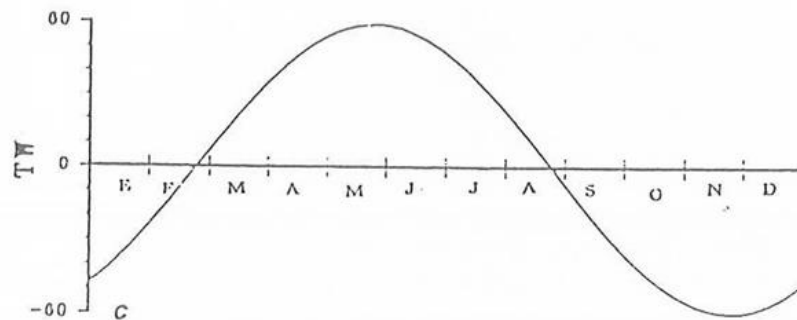


Figura 9. Razón de calentamiento del Golfo de California (Castro et al., 1994)

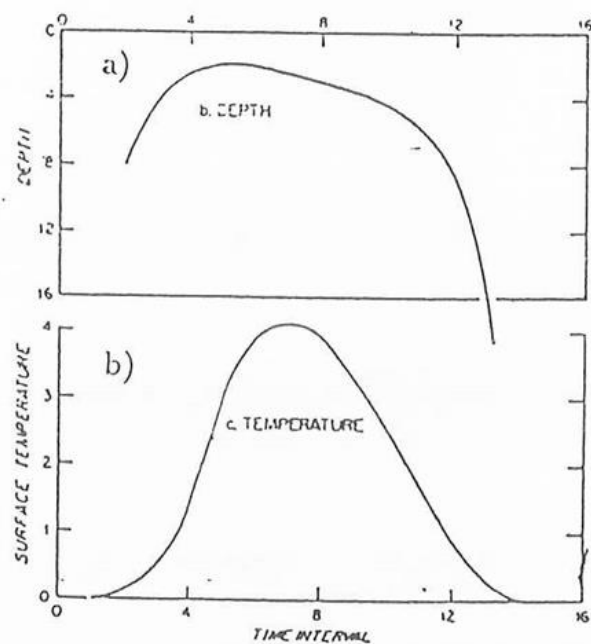


Figura 10. Resultados del modelo experimental de Turner y Krauss (1965). a) Ciclo de la capa mezclada, b) Calentamiento de la superficie del modelo.

5. CONCLUSIONES.

1. La profundidad de la capa mezclada en el Golfo de California tiene una señal estacional con una transición de primavera que dura dos meses en el norte e islas y tres meses en el sur. En verano las PCM son espacialmente uniformes, con valores de cerca de 10 m en el sur e islas y 20 en el norte. Desde fines del verano y todo el otoño, la PCM se incrementa gradualmente en todo el Golfo haciendo la transición de otoño mucho mas lenta que la de primavera. El invierno está caracterizado por una mayor rapidez de profundización de la capa mezclada.

2. Existe un desfase entre las señales anuales de las tres zonas, presentándose primero en el Golfo Sur, luego en la parte Norte y finalmente en la zona entre las islas con diferencias de dos a tres semanas entre ellas.

3. El promedio anual del ajuste de la PCM en el Golfo Norte y entre las islas es de 30 m y en el Golfo Sur es de 22 m. El porcentaje de la varianza total explicada del armónico anual es de 75 por ciento y del semianual es de 25 en el Golfo Norte y en la región entre las islas. En el Golfo Sur el armónico anual explica el 91 por ciento de la varianza total y el armónico semianual el 9 por ciento de la varianza.

4. Los patrones de distribución espacial definen claramente las tres zonas del Golfo, las características principales son:

a) Un máximo bien definido sobre la cuenca Delfín en el Golfo Norte que aparece desde octubre a marzo.

b) Patrones menos claros y con fuertes gradientes horizontales en la zona entre las Islas durante todo el año.

c) Un centro profundo en la Cuenca de Guaymas desde fines de otoño hasta principios de la primavera y

d) un gradiente transversal al Golfo con PCM mas profundas en la costa de Baja California. Este gradiente ocurre de octubre a marzo y desaparece o se cambia de signo durante el verano.

5. La presencia del evento interanual de El Niño no es clara en estos resultados pero parece haber PCM anómalas en los muestreos post-niño de marzo de 1973 y marzo de 1984.

6. LITERATURA CITADA

- Akima, H., 1978. A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points. *ACM Transactions on Mathematical Software*, vol 4, No. 2, 148-159.
- Argote, M.L., A. Amador, M.F. Lavín and J. R. Hunter, 1994. Tidal Dissipation and Stratification in the Gulf of California. Enviado a JGR-Oceans.
- Badan-Dangon, A., C.J. Koblinsky and T. Baumgartner, 1985. Spring and summer in the Gulf of California: observations of surface thermal patterns. *Oceanologica Acta*, vol.8, No.1, 13-22.
- Baumgartner, T.R. and N. Christensen, Jr. 1985. Coupling of the Gulf of California to large-scale interannual climatic variability. *Journal of Marine Research*, vol 43, 825-848.
- Bray, N.A, 1988. Thermohaline circulation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, vol.93 ,No.5, 4993-5020.
- Caperon, J., Schipmolder, B. and W. Harwood, 1968. Three-line analysis of bathythermographs. *NATO, Saclant*, Tech. Rep. No. 107, La Spezia, Italy.
- Castro, R., M.F.Lavín and P.Ripa, 1994. Seasonal heat balance in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, vol.99, No.C2, 3249-3261.
- Emilsson, I. y M.A. Alatorre, 1980. Investigaciones recientes sobre la circulación en la parte exterior del Golfo de California. Contribución No. 210 del Centro de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 35p.

- Esteve, E. and M. Soulas, 1993. A study of the ocean's mixed layer response to wind forcing off the coast of Southern California. CCS, Scripps Inst. of Oceanography, CA, USA.
- Figuerola-R, J.M. y R. Palacios-M, 1991. Flujos de calor superficial y momentum a través de la superficie del Golfo de California. *Ciencias Marinas*, vol.17, No.2, 109-149.
- Garwood, R.W. and D. Adamec, 1982. Model simulations of seventeen years of Mixed layer evolution at ocean station Papa. *Naval postgraduate School*, Tech. Report NPS68-82-006, Dep. of the Navy, Mont. CA. 37p.
- Gilbert, J.Y. and W.E. Allen, 1943. The phytoplankton of the Gulf of California obtained by the "E.W. SCRIPPS" in 1939 and 1940, vol. 5, No. 2, 89-110.
- Krajcar, V. 1993. Seasonal variability of inertial oscillations in the North Adriatic, M.C. Thesis, University of Zagreb, 110.
- Kraus, E.B., 1979. Modelling and Prediction of the Upper Layers of the Ocean. Edit. Pergamon, 325p.
- Laevastu, T. and P.D. Stevens, 1969. Near-surface thermal structure types (By Types) and their Classification Criteria, 21p. *Fleet Numerical Weather Facility*. Technical Note No. 22.
- LaFond, E. 1954. Factors affecting the temperature of the surface layer of the sea. *Soc. Scient. Fennica. Com. Phys-Mathem.*, vol. 25, No. 1, 136.
- Lavín, M.F. and S. Organista, 1988. Surface heat flux in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, vol.93, No.C11, 14, 033-14,038.

- Lawson, C.L., 1977. Software for C1 surface interpolation. *JPL publication*, 77-30.
- Mazeika, P.A., 1960. Prediction of the thermocline depth. U.S. Naval Oceanogr. Office, TR-104, 79 p.
- Organista, S., 1987. Flujos de Calor en el Alto Golfo de California. Tesis de maestría. CICESE, Ensenada, B.C. 142 p.
- Paden, C., M.R. Abbot and C.D. Winant, 1991. Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California, 1. Sea surface temperature variability. *Journal of Geophysical Research*, vol. 96, No. C10, 18, 337-18,359.
- Papadakis, J.E., 1981. Determination of the oceanic wind mixed layer depth by an extension of Newton's method. *Pacific Mar. Sc. Report* 81-9, Inst. of Ocean Sciences, Sidney, B.C. 32 p.
- Reyes-Hernández, C., 1993. Condiciones Atmosféricas de Otoño-Invierno en la Región Norte del Golfo de California y su efecto sobre la Formación de Masas de Agua. Tesis de maestría. CICESE, Ensenada, B.C. 62 p.
- Ripa, P. y S.G. Marinone, 1989. Seasonal variability of temperature, salinity, velocity, vorticity and sea level in the Central Gulf of California, as inferred from Historical Data. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, vol. 115, 887-913.
- Robinson, Margaret K., 1973. Atlas of monthly mean sea surface and subsurface temperature in the Gulf of California, Mexico. San Diego society of Natural History, Memoir 5.

- Robles, J.M and S.G. Marinone, 1987. Seasonal and Interannual thermohaline variability in the Guaymas Basin of the Gulf of California. *Cont. Shelf Research*, vol. 7, No. 7, 715-733.
- Roden, G.I. and G.W. Groves, 1959. Recent oceanographic investigations in the Gulf of California. *J. Mar. Res.*, vol. 18, No. 1, 10-35.
- Rokkam R.R., Robert L. Molinari and John F. Festa, 1989. Evolution of the climatological near-surface thermal structure of the Tropical Indian Ocean, 1. Description of Mean Mixed Layer Depth and Surface Meteorological Fields. *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, No. C8, 10, 801-10, 815.
- Santamaría-del-Angel E., Saul Alvarez-Borrego and Frank E. Muller-Karger, 1994. The El Niño 1982-1984 in the Gulf of California as Seen in the Coastal Zone Color Scanner Imagery. Manuscrito. 21 p.
- Taft, B.A. EL Niño of 82-83 in the Tropical Pacific. El Niño North. A Meeting on El Niño Effects in the Easter Subartic Pacific, 1984. Pac. Mar. Env. Lab., Sand Point Seattle. 1-8.
- Turner, J.S. and E.B. Kraus, 1967. A one-dimensional model of the seasonal thermocline. I. A laboratory experiment and its interpretation. *Tellus*, vol. XIX, 88-97.