## CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA

# EFECTOS DE LAS CONDICIONES ATMOSFERICAS DE OTONO E INVIERNO SOBRE LA FORMACION DE MASAS DE AGUA EN EL GOLFO DE CALIFORNIA

### TESIS

MAESTRIA EN CIENCIAS

AUSTREBERTO CRISTOBAL REYES HERNANDEZ ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO. JUNIO DE 1993. <u>RESUMEN</u> de la Tesis de Austreberto Cristóbal Reyes Hernández, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de <u>MAESTRO EN CIENCIAS en OCEANOLOGIA</u> con opción en <u>OCEANOGRAFIA</u> <u>FISICA.</u> Ensenada, Baja California, México. Enero de 1993.

#### EFECTOS DE LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE OTOÑO E INVIERNO SOBRE LA FORMACIÓN DE MASAS DE AGUA EN EL GOLFO DE CALIFORNIA.

Resumen aprobado por:

aur

Dr. Miguel F. Lavín Peregrina Director de Tesis

La respuesta de las aguas de la región Norte del Golfo de California (NGC), a las condiciones atmosféricas de otoño e es investigada analizando las variables invierno, meteorológicas de esa temporada observadas en San Felipe B. Cfa. de 1982/83 a 1986/87, y mediante dos modelos: El primero predice la evolución de la temperatura, la salinidad y los flujos de calor y flotabilidad en columnas de agua homogénea segundo, con profundidad constante; el un modelo unidimensional de balance de energía cinética turbulenta, predice la evolución de la estructura termohalina en la columna de agua. Los resultados indican que el NGC experimenta pérdidas de calor durante eventos atmosféricos de viento intenso del NO (~8 m/s) y baja humedad relativa (~57%), los están relacionados con la actividad atmosférica cuales sinóptica extratropical. El calor perdido en estos episodios representa hasta el 87% del total que se pierde de otoño a invierno y está compuesto en más de 2/3 por el flujo de calor latente. Pérdidas de calor con duración cercana a 20 días, pueden producir cambios hasta de -2.3 °C y 0.12 ppm, en una columna de agua homogénea con profundidad de 75 m y mezclar completamente una columna inicialmente estratificada. El efecto acumulativo de los eventos generalmente no mezcla más los primeros 125 m de la columna. allá de La máxima profundidad de la capa mezclada y el momento en que se alcanza dependen de las condiciones atmosféricas que caracterizan cada período. De los períodos analizados, el otoño e invierno de 1982/83 y el de 1986/87 presentan el mayor contraste en las condiciones de humedad relativa, y en consecuencia en el flujo de calor a través de la superficie y en la evolución de la estructura termohalina.

TESIS DEFENDIDA POR: AUSTREBERTO CRISTOBAL REYES HERNANDEZ Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITE:

ann

DR. MIGUEL FERNANDO LAVIN PEREGRINA.- Director del Comité

Suis anoti

DRA. MA. LUISA ARGOTE ESPINOZA.- Miembro de Comité

DR. ENRIQUE GOMEZ TREVIÑO .- Miembro del Comité

DR. ANTONIO BADAN DANGON .- Miembro del Comité

austavo awara-

M.C. LUIS GUSTAVO ALVAREZ SANCHEZ.- Jefe Depto. Oceanografía Física

DR. LUIS EDUARDO CALDERON AGUILERA.- Director de Estudios de Posgrado

29 DE ENERO DE 1993

#### AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Miguel F.Lavín P. por dirigir esta tesis con paciencia e interés constantes.

Al Dr. Antoine Badan Dangon, a la Dra. Ma Luisa Argote y al Dr. Enrique Gómez Treviño, miembros del comité de tesis, por sus comentarios, sugerencias y disposición para leer y corregir este documento.

A la Secretaría de Marina, Dirección General de Oceanografía Naval (DGON) por el apoyo brindado. En especial al Vicealmirante Gilberto López Lira y al Contralmirante Alberto Vázquez de la Cerda.

Al Contralmirante Gustavo Calderón Riveroll; su apoyo ha sido determinante para la realización de esta Maestría.

Al CONACyT por su apoyo a través del programa de becas de posgrado, de fortalecimiento al posgrado nacional y el tiempo de barco en el B/O El Puma.

Al CICESE por todas las facilidades otorgadas durante mi, estancia y a todo su personal; en especial a Julieta Castro, Victor Godínez y Salvador Sánchez por su constante ayuda.

Al personal del Observatorio Meteorológico de San Felipe B. Cfa., de la Secretaría de Recursos Hidraulicos, por facilitar la información atmosférica; en especial al Meteorólogo Ramón Arozamena.

Al Dr. Clive E. Dorman por la información sinóptica y por sus ilustrativos comentarios.

A la tripulación de los buques oceanográficos De Steiguer y El Puma.

A todos mis compañeros por su apoyo intelectual y moral; ha sido muy grato convivir cercanamente con Angélica, Rafael, Hugo, Ernesto, Roberto, Marco, Manolo, Alejandro, Pedro, Luis, Rigo y Sonia.

A Dolores, por todo lo que ha significado su presencia.

#### CONTENIDO

#### pag.

I	INTRODUCCIÓN	1					
II	USO DE LOS DATOS METEOROLÓGICOS	5					
III	LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE OTOÑO E INVIERNO EN LA REGIÓN NORTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA	8					
	III.1 Actividad ciclónica y anticiclónica.	. 8					
	III.2 Fluctuaciones diurnas	13					
	III.3 Fluctuaciones mayores a un día.	16					
	III.4 Fluctuación mensual.	20					
	III.5 Variabilidad interanual entre meses.	22					
	III.6 Variabilidad interanual otoño-invierno.	23					
	III.7 Variabilidad espacial.	25					
	III.7.1 Comparación con datos de Puerto Peñasco.	25					
	III.7.2 Comparación con datos de campañas oceanográficas.	29 <i>i</i>					
	III.8 Resumen.	33					
IV	MODELO HOMOGÉNEO	34					
	IV.1 Descripción del modelo	33					
	IV.2 Resultados						
	IV.3 Resumen.	55					
V	MODELO UNIDIMENSIONAL DE ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA	56					
	V.1 Descripción del modelo	56					
	V.2 Resultados	60					
	V.2.1 Perfil de temperatura y salinidad inicialmente homogéneo.	61					
	V.2.2 Perfil inicial estratificado.	63					
	V.3 Resumen.	76					
VI	DISCUSIONES	78					
VII	CONCLUSIONES	87 '					
LITERATURA CITADA 88							

#### LISTA DE FIGURAS

#### <u>Figura</u>

- 1. La región Norte del Golfo de California (NGC).
- Cartas de análisis superficial del 19 al 25 de febrero de 1985 (a)-(g) (National Weather Service), ejemplificando la alternancia de centros de alta y baja presión en la vecindad al NGC.
- 3. Datos atmosféricos horarios del 19 al 25 de febrero de 1985 de San Felipe B. Cfa. correspondientes a la posición de los sistemas de alta y baja presión respecto del NGC.
- Espectros de frecuencia de la temperatura del aire 4. (a), humedad relativa (b), nubosidad (c), presión atmosférica (d), y componentes de viento y transversal longitudinal (e) (f) al Golfo, correspondientes a los períodos otoño-invierno de 1982/83, 1983/84, 1984/85, 1986/87 e invierno de 1988. No. de datos 4096 (excepto 1988, 2048); No. de (excepto 1988, 256); intervalo bandas 512 de frecuencia 4/170 (excepto 1988, 4/5). La barra indica los límites de confianza del espectro (intervalo de confianza del 95%).
- 5. Datos atmosféricos diarios de San Felipe B. Cfa. (Temperatura del aire, Humedad relativa, Presión atmosférica, Nubosidad y Componentes del viento longitudinal y transversal al Golfo), en los períodos de otoño e invierno de 1982/83 (a), 1983/84 (b), 1984/85 (c) y 1985/86 (d).
- 5. (continuación) Datos atmosféricos diarios de San Felipe B. Cfa. (Temperatura del aire, Humedad relativa, Presión atmosférica, Nubosidad y Componentes del viento longitudinal y transversal al Golfo), en los períodos de otoño e invierno de 1986/87 (e), 1987/88 (f), 1988/89 (g) y 1989/90 (h).
- 5. (continuación) Vectores de viento diario correspondientes a los períodos de otoño e invierno de 1982/83 (i), 1983/84 (j), 1984/85 (k), 1985/86 (l) y 1986/87 (m).
- 6. Media mensual y desviación estandar de las variables meteorológicas observadas en San Felipe B. Cfa. (temperatura, humedad relativa, presión, nubosidad y componentes longitudinal y transversal al Golfo) durante el otoño e invierno de 1982/83, 1983/84, 1984/85, 1986/87, 1988/89 y 1989/90.

2

10

11

14

1

17

19

1

21

- 7. Datos atmosféricos diarios de San Felipe B. Cfa. (línea delgada) y Puerto Peñasco Son. (línea segmentada) en los períodos de octubre-diciembre de 1983 (a) y enero-marzo de 1983 (b). También se presenta la diferencia de la componente geostrófica longitudinal al Golfo de California respecto de su promedio en ambas temporadas (línea gruesa).
- 8. Datos atmosféricos horarios de las campañas oceanográficas EP8612 (a), DS8803 (b), EP9001 (c) (puntos) y las correspondientes de San Felipe B. Cfa. (línea continua).
- 9. Resultados del modelo homogéneo. Temperatura diaria de la columna de agua de 5, 30 y 75 m de profundidad (línea continua, punteada y segmentada), durante el otoño e invierno de 1982/83 (a), 1983/84 (b), 1984/85 (c), 1985/86 (d) y 1986/87 (e). También se muestra la temperatura mensual media de cada columna (f): 5, 30 y 75 m y el intervalo de temperatura superficial en cada mes en la región norte del Golfo de California de acuerdo a Robinson (1973).
- 10. Resultados del modelo homogéneo. Salinidad diaria de la columna de agua de 5, 30 y 75 m de profundidad (línea continua, punteada y segmentada), durante el otoño e invierno de 1982/83 (a), 1983/84 (b), 1984/85 (c), 1985/86 (d) y 1986/87 (e). También se muestra la salinidad media mensual de cada columna (f): 5, 30 y 75 m.
- 11. Resultados del modelo homogéneo. Flujo total de calor diario a través de la superficie en la columna de agua de 5, 30 y 75 m de profundidad (línea continua, punteada y segmentada), durante el otoño e invierno de 1982/83 (a), 1983/84 (b), 1984/85 (c), 1985/86 (d) y 1986/87 (e). También se muestra el flujo total mensual medio de cada columna (f): 5, 30 y 75 m.
- 12. Composición del flujo negativo de calor (Ql=Qe+Qb+Qh) en columnas de agua de 5, 30 y 75 m: mensual (a) y debido a eventos de invasión de aire frío y seco en cada mes (b), de acuerdo al modelo homogéneo. Promedio de todos los años.
- 13. Flujo de calor de onda corta (Qs), total (Qf), onda larga (Qb), latente (Qe), y sensible (Qh), en promedio para cada período otoño-invierno.

26

30

41

1

42

44

46

48

,

- 14. Resultados del modelo homogéneo. Flujo de flotabilidad diario en la columna de agua de 5, 30 y 75 m de profundidad (línea continua, punteada y segmentada), durante el otoño e invierno de 1982/83 (a), 1983/84 (b), 1984/85 (c), 1985/86 (d) y 1986/87 (e). También se muestra el flujo total mensual medio de cada columna (f): 5, 30 y 75 m.
- 15. Resultados del modelo homogéneo. Incremento de temperatura (a) y salinidad (b) en la columna de agua de 5 m de profundidad producidos durante los eventos en que el flujo total de calor es negativo, en cada período de otoño e invierno.
- 16. Resultados del modelo homogéneo. Incremento de temperatura (a) y salinidad (b) en la columna de agua de 30 m de profundidad producidos durante los eventos en que el flujo total de calor es negativo, en cada período de otoño e invierno.
- 17. Resultados del modelo homogéneo. Incremento de temperatura (a) y salinidad (b) en la columna de agua de 75 m de profundidad producidos durante los eventos en que el flujo total de calor es negativo, en cada período de otoño e invierno.
- 18. Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil homogéneo en una columna de 30 m de profundidad, otoño-invierno 1982/83.
- 19. Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 30 m de profundidad, otoño-invierno 1982/83.
- 20. Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 70 m de profundidad, otoño-invierno 1982/83.

53

62

64

65

50

51

52

1

- 21. Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 70 m de profundidad, otoño-invierno 1985/86.
- 22. Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 70 m de profundidad, otoño-invierno 1986/87.
- 23. Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 100 m de profundidad, otoño-invierno 1982/83.
- 24. Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 100 m de profundidad, otoño-invierno 1985/86.
- 25. Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 100 m de profundidad, otoño-invierno 1986/87.
- 26. Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 200 m de profundidad, otoño-invierno 1982/83.
- 27. Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 200 m de profundidad, otoño-invierno 1985/86.

66

67

1

70

1

71

72

73

1

- 28. Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 200 m de profundidad, otoño-invierno 1986/87.
- 29. Evolución diaria de la densidad de superficie en la columna de 75 m (línea continua); 100 m (línea punteada) y 200 m (línea segmentada); durante los períodos otoño-invierno de (1982/83) y (1986/87).

84

75

#### LISTA DE TABLAS

#### <u>Tabla</u>

Pagina

5

1

- I. Datos meteorológicos utilizados en este trabajo: 1. Temperatura del aire (°C), 2. Humedad relativa (%), 3. Presión atmosférica (mb), 4. Nubosidad (octas), 5. Viento (m/s). Todas las observaciones son horarias excepto el viento, muestreado cada 15 minutos, y las marcadas con un asterisco las cuales son medias diarias.
- II. Parámetros empleados en el análisis espectral: N es el número de datos (horas) en la serie,  $\Delta t$  es el intervalo de muestreo (días), T la longitud de la serie (días),  $\Delta f$  el intervalo de frecuencia (días<sup>-1</sup>), gl los grados de libertad y nb el número de bandas que compone al espectro.
- III. Fecha de las campañas ocenaográficas en la región Norte del Golfo de California, de las que se obtuvo información meteorológica: EP8612, DS8803 y EP9001.
- IV. Valor medio de cada variable atmosférica observada en San Felipe B. Cfa. de otoño a invierno, en condiciones con viento : i) del NW >2.0 m/s, ii) del NW o SE <2.0 m/s, iii) del SE de cualquier magnitud.
- V. Media y desviación estandar de cada período de otoño e invierno de las variables meteorológicas San Felipe B. Cfa.
- VI. Coeficientes de correlación a desface cero de las medias meteorológicas diarias de San Felipe B. Cfa. y Puerto Peñasco Son. correspondientes al otoño de 1983 e invierno de 1983.
- VII. Media mensual (cuadro superior) y desviación estandar (cuadro inferior) de las variables meteorológicas observadas en San Felipe B. Cfa. (SF) y Puerto Peñasco Son. (PP) durante el otoño e invierno de 1983.
- VIII. Valores iniciales de temperatura y salinidad del agua empleados en el modelo de capa homogénea (MH) de acuerdo a la profundidad de cada columna de agua.
- IX. Flujo neto mensual de calor a través de la superficie de acuerdo a la profundidad de la columna. Modelo homogéneo.

7

6

20

24

1

27

28

39

CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE OTOÑO E INVIERNO EN LA REGIÓN NORTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA Y SU EFECTO SOBRE LA FORMACIÓN DE MASAS DE AGUA

#### I INTRODUCCIÓN

La ubicación geográfica de la región Norte del Golfo de California (NGC) (fig. 1), entre 31.6° N y 29.2° N, y su morfología, la definen como una cuenca evaporativa que experimenta una pérdida neta de calor a través de la superficie durante el invierno. Ésto puede provocar que el agua de salinidad relativamente alta, formada durante el verano, se hunda (Sverdrup, 1941; Roden, 1964; Lavín y Organista, 1988), y dé lugar a estructuras termohalinas como las observadas en marzo de 1973 (Villaseñor-Casales, 1974; Alvarez Borrego y Schwartzlose, 1979) y febrero-marzo de 1988 (Lavín et al., 1989) modificando el mecanismo de circulación termohalina de verano (Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Bray, 1988a; Lavín y Organista, 1988).

Durante el invierno la intensificación de la actividad anticiclónica y ciclónica extratropical del Pacífico Oriental (Zishka y Smith, 1980) afecta al NGC al modificar los campos de viento, humedad relativa y temperatura (Paden, 1990; Badan *et al.*, 1991), lo cual genera condiciones propicias para que ocurran procesos de convección como los observados en la porción occidental del Mar Mediterráneo (MEDOC GROUP, 1969;





Bunker, 1972; Ovchinnikov *et al.*, 1987; Leaman y Schoot, 1991) o en el Mar Adriático (Ovchinnikov *et al.*, 1983), ambos producidos por la invasión de aire frío y seco de origen continental.

De acuerdo Organista (1987), las a regiones de profundidad menor de 50 m se mantienen mezcladas durante el año, pero aquellas de profundidad mayor a 100 m permanecen estratificadas aún durante el invierno, por 10 que la convección, podría implicar deslizamientos por el fondo de agua relativamente salina de zonas someras bien mezcladas a zonas profundas estratificadas (Roden, 1964; Lavín et al., 1991). Sin embargo, el mismo autor aplicó el modelo de estratificación y mezcla verticalmente integrado de Simpson y Bowers (1981) para demostrar que la región con 100 m de profundidad podría alcanzar la mezcla total, debido a la convección de invierno. Bray (1988b), identifica celdas de subsuperficial con alta salinidad (34.8 - 35.3)agua y °C) frías (~12 relativamente que supone originadas específicamente en la Cuenca de Wagner, debido a la convección las tormentas típicas de invierno. causada por De las discusiones anteriores no queda aún claro si la mezcla en la zona costera o la convección en la región profunda son posibles. conoce si variación igualmente Tampoco se la forzamiento atmosférico en cada interanual del otoño e invierno se manifiesta en las condiciones hidrográficas del NGC.

Los objetivos de este trabajo son: a) Establecer si las condiciones atmosféricas de invierno, caracterizadas por invasiones de aire frío y seco, son capaces de modificar la temperatura y la salinidad de las aguas del NGC al grado suficiente para inducir la formación de una masa de agua de fondo, fría y salina. En particular, se desea evaluar la posibilidad de formación de agua de fondo en regiones con profundidad mayor a 100 m (Cuenca de Wagner). b) Establecer si existe alguna diferencia interanual de las condiciones atmosféricas que se refleje en variaciones, en la misma escala, de las condiciones termohalinas de la región Norte del Golfo.

Con este propósito, las condiciones atmosféricas durante los meses de octubre a marzo se emplean como forzamiento en a) un modelo homogéneo (MH), que estima los flujos de calor y flotabilidad a través de la superficie y predice la evolución temporal de la temperatura y de la salinidad en una columna de aqua homogénea con profundidad constante y b) un modelo unidimensional de balance de energía cinética turbulenta (M1), (Simpson y Bowers, 1984; Lavín, 1984), que además de la información anterior, predice el espesor de las capas mezcladas. El modelo ha sido modificado para considerar a la densidad del agua en función de su temperatura y salinidad.

II. USO DE LOS DATOS METEOROLÓGICOS.

Con la información del Observatorio Meteorológico de la SARH de San Felipe B. Cfa. (fig. 1), de octubre a marzo de 1982 a 1990 (Tabla I), se formaron 8 series de tiempo de otoño-invierno, considerando al otoño como los meses de octubre a diciembre y al invierno como los meses de enero a marzo.

Tabla I. Datos meteorológicos utilizados en este trabajo:
1. Temperatura del aire (°C), 2. Humedad relativa (%)
3. Presión atmosférica (mb), 4. Nubosidad (octas)
5. Viento (m/s). Todas las observaciones son horarias excepto el viento, registrado cada 15 minutos, y las marcadas con un asterisco las cuales son medias diarias.

	And the second se			and shaded in some state of the same state of th		
		отой	0	IN	VIER	NO
	oct	nov	dic	ene	feb	mzo
1982	12345	12345	12345			
1983	12345	12345	12345	12345	12345	1234-
1984	12345	12345	12345	12345	12345	12345
1985	12345	12345	12345	12345	12345	12345
1986	12345	12345	12345	12345	12345	12345
1987	1234-	1234-	1234-	12345	12345	1234-
1988	1234-	1234-	1234-	12345	12345	12345
1989	1234-	1234-	1234-	1234-	1234-	1234-
1990				1234-	1234-	

Sólo se contó con datos de viento para los períodos del 82/83 al 86/87, en consecuencia las estadísticas de esta

variable y los resultados obtenidos por los modelos corresponde sólo a esos períodos. Las componentes positivas de viento longitudinal y transversal al Golfo, apuntan hacia los 325° y hacia los 55° respectivamente.

Los espectros energéticos de cada una de las series horarias otoño-invierno en los que se contó con información de todas las varibles atmosféricas se calcularon considerando un intervalo de confianza del 95%; los párametros empleados en el cálculo se resumen en la Tabla II.

Tabla II. Parametros empleados en el análisis espectral: N es el número de datos (horas) en la serie,  $\Delta t$  es el intervalo de muestreo (días), T la longitud de la serie (días),  $\Delta f$  el intervalo de frecuencia (días<sup>-1</sup>), gl los grados de libertad y nb el número de bandas que compone al espectro.

serie	N	Δt	т	Δf	gl	nb
82-83	4096	1/24	85	1/85	8	256
83-84	4096	1/24	170	1/170	8	512
84-85	4096	1/24	170	1/170	8	512
85-86	4096	1/24	170	1/170	8	512
86-87	4096	1/24	85	1/85	8	256
88	2048	1/24	85	1/85	8	256

Con el propósito de evaluar la homogeneidad de las observaciones meteorológicas del NGC, se compararon los datos observados en San Felipe B. Cfa. con los datos observados en a) Puerto Peñasco (fig. 1), de octubre-diciembre y enero-marzo

de 1983 y b) con los datos de tres campañas oceanográficas (Tabla III). En la comparación se empleó correlación cruzada para las variables escalares y correlación compleja para el vector velocidad del viento.

Tabla III. Fechas de las campañas oceanográficas en la región Norte del Golfo de California, de las que se obtuvo información meteorológica.

campaña	fecha inicial	fecha final
EP8612	12/dic/1986	14/dic/1986
DS8803	25/feb/1988	03/mzo/1988
EP9001	08/ene/1990	29/ene/1990

Las diferencias entre los valores medios mensuales dentro de cada período y las diferencias interanuales entre los valores medios mensuales y otoño-invierno, fueron evaluadas a través de un análisis de varianza simple (F-máxima de Hartley; Till, 1974).

Finalmente las series meteorológicas diarias fueron empleadas como forzamiento atmosférico en los modelos que se' describen más adelante.

III. LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE OTOÑO E INVIERNO EN LA REGIÓN NORTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA.

En capítulo describen aspectos este se los más sobresalientes de la meteorología de San Felipe B. Cfa. durante otoño e invierno, que conforman el ambiente durante el cual el NGC cede calor a la atmósfera. Se resaltan sus diferencias interanuales y finalmente se comparan con datos de Puerto Peñasco y de tres campañas oceanográficas, para estimar, su representatividad como condiciones atmosféricas del NGC en general.

III.1 Actividad ciclónica y anticiclónica.

Las condiciones atmosféricas locales de la región Norte del Golfo de California de otoño a invierno, dependen de la interacción del anticiclón situado sobre la región occidental de los E.U. con las celdas ciclónicas que se desplazan de O a E sobre el perímetro sur del anticiclón (Sorkina, 1963; Bailey, 1975). Los centros de baja presión invaden con frecuencia al continente por la frontera Norte de México, donde la influencia cálida de la atmósfera del Golfo de el movimiento California, debe favorecer de esas perturbaciones.

La ubicación del NGC, en la frontera entre las circulaciones atmosféricas tropical y subtropical, y su orientación longitudinal hacia el NNO, permite que se

establezcan dos posibles condiciones atmosféricas, que dependen de la posición relativa de las celdas de circulación (Roden, 1958; Ives, 1962; Bailey, 1975): i) viento del SE, con alta humedad relativa y alta nubosidad cuando el centro de' baja presión se encuentra al Oeste del NGC el anticiclón situado al N o al NE), ii) viento del NO, con baja humedad relativa y poca nubosidad, cuando el centro de baja presión se encuentra al Este del NGC (el anticiclón situado al O o NO). Las cartas de presión superficial del 19 al 25 de febrero de 1985 (fig. 2), ejemplifican la alternancia de los sistemas de alta y baja presión en la cercanía del NGC y su efecto sobre las condiciones atmosféricas locales en San Felipe (fig. 3). Estas observaciones coinciden en tiempo con las realizadas por Merrifield et al. (1987) en Puerto Peñasco, Isla Piojo, Santa Rosalía e Isla Tortuga, lo que permite tener un cuadro general, de la circulación.

El día 19 (fig. 2a), un sistema de alta presión situado sobre Utah y un sistema de baja presión en el Pacífico, frente a Oregon (no visible en la gráfica), favorecen que en San Felipe y Puerto Peñasco el viento sople del E-SE acarreando aire humedo que incrementa la nubosidad y la humedad relativa (fig. 3). En Isla Piojo, Santa Rosalía e Isla Tortuga el viento es del O-N (Merrifield *et al.*, 1987), y sugiere una circulación ciclónica.



Figura 2 Cartas de análisis superficial del 19 al 25 de febrero de 1985 (a)-(g) (National Weather Service), ejemplificando la alternancia de centros de alta y baja presión en la vecindad al Alto Golfo de California.



Figura 3 Datos atmosféricos horarios del 19 al 25 de febrero de 1985 de San Felipe B. Cfa. correspondientes a la posición de los sistemas de alta y baja presión respecto al NGC.

El día 20 (fig. 2b), el centro de baja presión ha desplazado de Utah al anticiclón, el viento en San Felipe (fig. 3) y Puerto Peñasco aumentan de magnitud y soplan en la mitad del día del E-SE primera Y despues del SE-S, consecuentemente la nubosidad y la humedad relativa disminuyen y después aumentan. En Isla Piojo, Santa Rosalía e Isla Tortuga el viento sopla principalmente del O (Merrifield et al., 1987), conservando aún las características de circulación, ciclónica.

El día 21 (fig. 2c) el frente frío cruza al NGC, provocando que el viento en San Felipe sople del NO con magnitud ~5 m/s (fig. 3), en Puerto Peñasco el viento es del S con magnitud ~1 m/s en la mayor parte del día; la nubosidad se incrementa notablemente (característica del frente) pero hay un descenso de la humedad relativa. En el resto de las estaciones, el viento es del O con ~10 m/s (Merrifield *et al.*, 1987).

El día 22 (fig. 2d), la baja presión se encuentra entre Nuevo México y Texas y el centro de alta presión empieza a influir en el NO de los E.U. En San Felipe (fig. 3) y Pto. Peñasco el viento es del SE, pero la nubosidad es baja. En Isla Tortuga el viento es del NO (Merrifield *et al.*, 1987).

El día 23 (fig. 2e), la baja presión se ha alejado hacia el SE del NGC predominando la influencia de la alta presión. El viento en San Felipe es del NO y el cielo se mantiene totalmente despejado (fig. 3).

El día 24 (fig. 2f) la alta presión se ha desplazado al S, de Utah y el viento superficial en San Felipe varía del NO al NE; el cielo permanece despejado y la humedad relativa ha disminuido notablemente (fig. 3).

El día 25 (fig. 2g), el centro de alta presión se ha desplazado hacia el Pacífico y en el Golfo de California las isobaras muestran la incipiente influencia de aire cálido tropical. El viento en San Felipe (fig. 3) y Pto. Peñasco es del O, con intensidad ~3 m/s y la humedad relativa y nubosidad se mantienen relativamente bajas. En las demás estaciones el viento es ~10 m/s y sopla del N-NO (Merrifield *et al.*, 1987).

El efecto de los sistemas de alta y baja presión, se manifiesta claramente en los espectros energéticos de cada variable atmosférica (fig. 4), donde la mayor cantidad de energía se concentra en períodos de 3 a 10 días, además de las marcadas fluctuaciones diurnas y semidiurnas.

#### III.2 Fluctuaciones diurnas.

La temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y la componente del viento tranversal al Golfo muestran fluctuaciones diurnas y semidiurnas (fig. 4), que sugieren el efecto de un régimen de brisas. El máximo y mínimo de temperatura ocurren aproximadamente a las 14:00 y 05:00 hrs. respectivamente; La humedad relativa alcanza el máximo entre las 22:00 y 03:00 hrs. y el mínimo cerca de las 12:00 hrs.; la presión máxima y mínima ocurren alrededor de las 10:00 y 16:00



Figura 4 Espectros de potencia de temperatura del aire (a), humedad relativa (b), nubosidad (c), presión atmosfèrica (d), y componentes de viento longitudinal (e) y transaversal (f) al Golfo, correspondientes a los períodos de 1982/83, 1983/84, 1984/85, 1985/86, 1986/87, e invierno de 1988. No. de datos 4096; No. de bandas 512; intervalo de frecuencia 1/170, excepto 1988: No. de datos 2048; No. de bandas 256; intervalo de frecuencia 1/85. La barra indica los limites de confianza del espectro (intervalo de confianza del 95%).

hrs. respectivamente; la componente de viento transversal al Golfo, alcanza la máxima magnitud de tierra a mar aproximadamente a las 05:00 hrs. y la máxima en dirección opuesta alrededor de las 14:00 hrs.

El valor máximo y mínimo de cada variable se modifica de, octubre a marzo, en general la temperatura máxima ~36 °C, ocurre en octubre, la mínima ~3 °C, puede presentarse de diciembre a febrero. El máximo de humedad relativa ~95 %, se presenta en cualquier día de otoño o invierno, pero el mínimo ~12%, sólo ocurre en marzo. De octubre a diciembre, la magnitud de la componente transversal fluctúa entre 0 y 1.5 m/s en ambas direcciones, soplando durante intervalos de tiempo semejantes; a partir de enero el viento de mar a tierra se vuelve predominante y presenta las magnitudes máximas ~3 m/s.

En condiciones de baja presión, hay un notable aumento en, la amplitud de las fluctuaciones diurnas de temperatura, humedad relativa y de la componente de viento transversal al Golfo, en contraste los sistemas de alta presión suprimen la fluctuación diurna. Este efecto puede ser explicado por la rapidez del viento: en condiciones de baja presión, el movimiento lento del aire da tiempo a que se establezca el ciclo diurno de temperatura y humedad relativa. Por el contrario la mayor rapidez del viento en condiciones de alta presión no permite procesos de calentamiento y/o enfriamiento y no se desarrolla un sistema de brisas.

III.3 Fluctuaciones mayores a un día.

En la figura 5 se presentan las medias diarias de los datos meteorológicos de San Felipe de otoño e invierno: La presión atmosférica tiene el valor máximo en enero y los mínimos en octubre y marzo; está compuesta por fluctuaciones diarias o de mayor duración, asociadas con la actividad ciclónica y anticiclónica de esta temporada, como se describió en la sección III.1. A partir de noviembre la fluctuación en la presión atmosférica se incrementa y consecuentemente su desviación estandar, la cual puede ser usada como un indicador de la frecuencia e intensidad de los eventos ciclónicos y anticiclónicos. En base a ella los meses con mayor actividad atmosférica son enero y diciembre.

El viento durante otoño e invierno es dominantemente del NO, varía con periodicidad semejante a la presión atmosférica; la mayor rapidez (>2.0 m/s) la alcanza en condiciones de presión atmosférica alta (>1014 mb). En condiciones con baja presión, el viento se debilita y puede invertir su dirección, soplando del SE con rapidez que en algunos casos puede ser comparable a la máxima del NO. El viento asociado con la, transporta actividad anticiclónica frecuentemente aire continental frío y seco que disminuye la temperatura, la humedad relativa y la nubosidad; en contraste viento de cualquier dirección pero magnitud menor a 2.0 m/s o viento del de cualquier magnitud, eleva la humedad relativa, SE la nubosidad y la temperatura del aire (Tabla IV.)



Figura 5 Datos atmosféricos diarios de San Felipe B. Cfa. en los períodos otoño-invierno de 1982/83 (a); 1983/84 (b); 1984/85 (c) y 1985/86 (d).



Figura 5 (continuación). Datos atmosféricos diarios de San Felipe B. Cfa. en los períodos otoñoinvierno de 1986/87 (e); 1987/88 (f); 1988/89 (g) y 1989/90 (h).



Figura 5 (continuación) Vectores de viento diario correspondientes a los períodos otoñoinvierno de 1982/83 (i); 1983/84 (j); 1984/85 (k); 1985/86 (l) y 1986/87 (m).

Tabla IV. Valor medio de cada variable atmosférica observada en San Felipe B. Cfa de otoño a invierno, en condiciones con viento: i) del NO > 2.0 m/s, ii) del NO o SE < 2.0 m/s, iii) del SE de cualquier magnitud

caso	Та	Hr	Pa	Nb	long	trans	W
i	18.2	44.6	1017.5	1.0	-3.1	0.2	3.3
ii	18.4	57.8	1014.0	1.5	0.5	-0.1	1.4
iii	18.6	62.7	1012.7	1.5	0.4	-0.6	1.6

En general los eventos con viento del NO de magnitud >2.0 m/s aumentan en duración de diciembre a febrero. Su duración más frecuente es aproximadamente de 3 días.

III.4 Fluctuación mensual.

En la figura 6 se presentan la media mensual y la desviación estandar ( $\sigma$ ) de cada variable atmosférica. Existe un claro comportamiento estacional a lo largo del otoño e invierno de cada variable, excepto en la humedad relativa y en la nubosidad. Los períodos 85/86, 86/87 y 89/90, presentaron, una marcada fluctuación mensual y en consecuencia, diferencias mensuales medias poco significativas de la nubosidad, la humedad relativa, y la magnitud del viento.

Octubre es el mes más calido (~25.2 °C), más húmedo (~58.4 %), con menor presión atmosférica (~1011.8 mb), menor nubosidad (~1.1 octas) y menor magnitud del viento (~1.3 m/s).



Figura 6 Media mensual y desviación estandar de las variables meteorológicas observadas en San Felipe B. Cfa. durante el otoño e invierno de 1982/83 (2); 1983/84 (=); 1984/85 (6); 1985/86 (0); 1986/87 (4); 1987/88 (\*); 1988/89 (+) y 1989/90 (\*).

En contraste en enero se presenta la mayor presión atmosférica' (~1017.5 mb), la mayor nubosidad (~1.7 octas) y la mayor magnitud de viento (~2.3 m/s). La componente de viento longitudinal al Golfo (~1.7 m/s) supera a la componente transversal (~0.1 m/s). Diciembre es el mes más frío (~15.1 °C) y marzo el mes con menor humedad relativa (~46.8 %).

La fluctuación de la temperatura es semejante en todos los meses ( $\sigma \sim 2.5$  °C). Octubre es el mes con mayor uniformidad en la presión atmosférica ( $\sigma$  ~2.5 mb), humedad relativa ( $\sigma$ ~11.3 %), nubosidad ( $\sigma$  ~1.6 octas) y rapidez de viento ( $\sigma$ ~0.75 m/s). En contraste, en enero se dan las mayores fluctuaciones de esas mismas variables: presión atmosférica (ov ~4.0 mb), humedad relativa ( $\sigma$  ~14.7%), nubosidad ( $\sigma$  ~2.1 octas) y rapidez de viento ( $\sigma$  ~1.3 m/s). La componente del viento longitudinal al Golfo es más variable en enero ( $\sigma$  ~1.6 m/s), y la componente de viento transversal al Golfo tiene la mayor variación en marzo ( $\sigma$  ~0.7 m/s). La mayor desviación estandar en enero es indicativa de un mayor contraste entre las condiciones atmosféricas, es decir, enero es un mes en que la actividad sinóptica favorece que la influencia de masas de aire marítima y continental o de latitudes medias y bajas, se alternen con mayor frecuencia.

III.5 Variabilidad interanual entre meses.

Cada variable atmosférica mensual media es significativamente diferente de año en año, excepto en algunos

meses: la presión atmosférica en noviembre y febrero; la nubosidad en diciembre y enero; la humedad relativa en marzo; magnitud del viento en diciembre la V la componente longitudinal del viento en octubre y enero. La temperatura y viento transversal al Golfo son significativamente el diferentes en cada período. Son notables (a) el alto valor de la humedad relativa en enero y febrero de 1983 y su bajo valor en el período 86/87; (b) la relativamente baja magnitud del viento en octubre de 1982 y la alta magnitud en enero de 1983.

III.6 Variabilidad interanual otoño-invierno.

El análisis de varianza de los 8 períodos otoño-invierno, indica que sólo la humedad relativa y el viento (la componente longitudinal y la rapidez) tuvieron diferencias interanuales significativas. En la Tabla V se presentan la media y la desviación estándar de cada período; el valor medio de la humedad relativa en 82-83 y 86-87 es extrema. La exclusión de estos dos períodos del análisis de varianza elimina las diferencias interanuales.

La mayor magnitud media del viento corresponde al 82/83, y la menor magnitud al 85/86. El análisis de varianza sin incluir a cualquiera de estos períodos y excluyendo a ambos, igualmente indica que existen diferencias interanuales significativas. En el 86/87 la componente longitudinal al Golfo es mayor que en 82/83, pero el valor más pequeño en este período es más bien debido a que hubo vientos de magnitud

	[	1	I	ſ	1	1	1	1
<b>.</b>	82/83	83/84	84/85	85/86	86/87	87/88	88/89	89/90
Ta (°C)	17.9	19.3	17.2	19.6	18.5	19.2	19.2	18.8
Hr (%)	63.1	52.5	56.4	54.2	45.8	57.7	51.4	53.1
Pa (mb-1000)	14.0	14.4	15.2	14.7	14.4	15.8	15.5	15.8
Nb (octas)	1.4	1.2	1.5	1.6	1.4	1.4	1.0	1.3
W (m/s)	2.3	1.9	1.6	1.5	1.8	2.5		
long. (m/s)	-1.0	-1.2	-0.8	-0.8	-1.4	-1.9		
trans. (m/s)	0.2	0.0	0.0	0.0	-0.3	-0.3		

Tabla V. Media (cuadro superior) y desviación estandar (cuadro inferior) de cada período de otoño e invierno de las variables meteorológicas de San Felipe B. Cfa.

	82/83	83/84	84/85	85/86	86/87	87/88	88/89	89/90
Ta (°C)	3.3	3.2	3.4	2.7	3.0	4.3	4.5	4.0
Hr (%)	3.3	7.9	6.7	3.7	1.9	4.7	6.1	3.9
Pa (mb~1000)	1.2	1.9	2.1	3.0	1.5	1.9	2.6	1.9
Nb (octas)	0.5	0.3	0.7	0.1	0.2	0.9	0.5	0.2
W (n/s)	0.7	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1		
lang. (m/s)	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2		
trans. (m/s)	0.2 0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0		

comparable tanto hacia el NO como hacia el SE, en consecuencia el valor medio es menor.

El período otoño-invierno más frío fué 84-85 con 17.2 °C, y el más cálido 85-86 con 19.6 °C. La presión atmosférica más alta fué en 89-90 con valor de 1015.8 mb, la más baja en 83-84 y 86-87 con 1014.4 mb. El período de mayor nubosidad es el 85-86 con 1.55 octas, el de menor nubosidad el 83-84 con 1.25 octas.

III.7 Variación espacial.

Con el fin de evaluar la supuesta homogeneidad de las condiciones atmosféricas en el NGC (Merrifield y Winant, 1989; Badan *et al.*, 1991; Paden, 1990), las observaciones meteorológicas de San Felipe son comparadas con observaciones realizadas en Puerto Peñasco (fig. 1) y durante tres campañas oceanográficas: EP8612, DS8803 y EP9001.

III.7.1 Comparación con datos de Puerto Peñasco.

Las secuencias diarias de datos atmosféricos de San Felipe y Puerto Peñasco (fig. 7) son similares entre sí, con mayor semejanza en el otoño que en el invierno, como lo indican los coeficientes de correlación cruzada a desfase cero para cada variable escalar y de correlación compleja (Kundu, 1975) para el viento (Tabla VI).  $\theta$  es el ángulo medio que forma el viento de Puerto Peñasco respecto de San Felipe, está<sup>'</sup> expresado en grados y es positivo en sentido dextrógiro.


Figura 7 Datos atmosféricos diarios de San Felipe B. Cfa. (línea delgada) y Puerto Peñasco Sonora (línea segmentada) en los períodos de oct-dic 1983 (a) y ene-mzo 1983 (b). También se presenta la diferencia de la componente geostrófica longitudinal al Golfo de California respecto de su promedio, en ambas temporadas (línea gruesa)

Tabla VI. Coeficientes de correlación a desface cero, de las medias meteorológicas diarias de San Felipe B. Cfa y Puerto Peñasco Son. correspondientes al otoño de 1983 e invierno de 1983.

	Та	Hr	Pa	Nb	W	θ
otoño	0.95	0.78	0.96	0.88	0.51	-9
invierno	0.80	0.49	0.94	0.68	0.46	-18

En ambas temporadas la temperatura y la presión más altas corresponden a San Felipe, pero la humedad relativa la nubosidad y el viento más altos corresponden a Puerto Peñasco (Tabla VII). La diferencia entre las temperaturas diarias de ambas estaciones se deben a que las máximas diurnas de San' Felipe son de mayor magnitud que las de Puerto Peñasco, pero las mínimas son semejantes. Sólo cuando la humedad relativa en San Felipe es máxima, se tienen condiciones semejantes en ambas estaciones. En los mínimos, la humeda. Elativa de San Felipe es aproximadamente 3 veces menor a la de Puerto Peñasco, por lo que la humedad relativa en esta estación es 1.3 veces mayor en otoño y 1.2 veces mayor en invierno.

El gradiente de presión hacia San Felipe, durante la mayor parte de los dos trimestres, concuerda con el comportamiento estacional del viento. La diferencia de presión entre estaciones es de 1.3 mb en otoño y 1.8 mb en invierno. Cuando el gradiente de presión entre las dos estaciones desaparece, o se invierte, el viento se debilita o invierte la

	Ta Hr (*C) (%)		r %)	Pa (mb-1000)		N (1/8)		W (m/s)		Comp. long. (m/s)		Comp. transv. (m/s)		
1983	SF	PP	SF	PP	SF	PP	SF	PP	SF	рр	SF	PP	SF	PP
oct	24.9	24.8	65.2	80.8	11.6	10.0	0.9	1.8	1.8	3.6	-0.92	-0.21	0.08	0.20
nov	19.5	18.8	53.5	74.9	13.8	12.7	0.9	1.5	1.9	4.4	-1.05	-0.97	0.00	-0.50
dic	15.6	16.0	59.8	82.3	14.6	14.0	1.7	2.2	1.5	4.0	-1.00	-0.34	0.25	-0.65
ene	16.7	14.9	62.5	78.7	15.6	13.5	1.7	1.7	3.3	3.6	-1.66	-1.29	0.98	-0.90
feb	16.5	16.1	66.0	79.9	13.6	12.0	1.9	2.6	2.6	3.8	-1.11	-1.05	0.14	-0.86
ดzo		18.1		79.3		09.5		1.9	2.9	4.4	-0.32	0.32	-1.00	0.37

Tabla VII. Media mensual (cuadro superior) y desviación estandar (cuadro inferior) de las variables meteorológicas observadas en San Felipe B. Cfa. (SF) y Puerto Peñasco Son. (PP) durante el otoño e invierno de 1983.

	Ta (*C)		Hr (%)		Pa N (mb-1000) (1/8)		W Comp. (n/s) (n/		long. Comp. transv 's) (m/s)		transv. s)			
oct	1.7	1.3	12.4	6.2	2.6	2.4	1.4	2.1	0.7	1.0	1.1	1.8	0.4	1.5
nov	3.4	3.7	16.1	6.6	3.2	3.0	1.5	1.9	0.6	1.3	1.1	2.6	0.5	1.6
dic	1.3	1.3	19.9	7.4	4.2	3.4	2.2	2.3	0.7	1.4	0.9	3.2	0.4	1.7
ene	2.6	1.9	12.8	5.9	4.2	3.8	1.9	2.0	1.6	1.3	2.0	2.2	0.9	1.2
feb	2.5	1.8	12.4	9.8	3.7	3.3	2.0	1.9	1.4	1.1	1.7	2.6	1.1	1.1
nzo		1.2		6.9		4.6		2.0	1.0	1.6	1.8	3.2	1.2	1.1

dirección, como se muestra también en la figura 7, donde se presenta el residuo que resulta de sustraer a cada valor de velocidad geostrófica (componente del viento longitudinal al Golfo) la media de toda la serie. La correlación entre el' viento geostrófico y las estaciones San Felipe y Puerto Peñasco en otoño es de 0.49 y de 0.54 y en invierno de 0.38 y 0.51 respectivamente. En otoño el viento longitudinal al Golfo es 7.6 veces mayor al observado en San Felipe y 4 veces mayor que el correspondiente a Pto. Peñasco. En enero es 6.2 veces mayor que el observado en San Felipe y 4.7 veces mayor que el de Pto. Peñasco. Por otro lado el viento en Puerto Peñasco resultó más intenso que en San Felipe: 1.8 y 1.7 veces en otoño e invierno respectivamente.

III.7.2 Comparación con datos de campañas oceanográficas.

En la figura 8 se presentan los datos horarios de temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, nubosidad y viento tomados en cada una de las campañas oceanográficas EP8612 (fig. 8a), DS8803 (fig. 8b), EP9001 (8c) y los correspondientes de tierra. Cada par de series tiene una correlación baja, con excepción de la presión atmosférica.

La discrepancia entre datos de temperatura (correlación. entre 0.33 y 0.46), es debida a la amplitud de los ciclos diurnos en ambos medios, en San Felipe es de ~10.3 °C y en el interior del Golfo de ~3.4 °C. La diferencia de temperatura es mayor en los valores mínimos, ~5.2 °C, que en valores máximos,





~1.6 °C; en consecuencia la temperatura media del aire en el interior del Golfo es ~1.5 °C mayor.

Los valores máximos de humedad relativa en San Felipe, igualan al valor de la humedad relativa observada mar adentro (correlación entre 0.56 y 0.21), pero debe notarse que las condiciones con baja humedad relativa en San Felipe no siempre implican el mismo tipo de condiciones mar adentro, vease por ejemplo del 22 al 27 de enero de 1990. En promedio la humedad relativa observada en las embarcaciones es aproximadamente 1.25 veces mayor que la de San Felipe.

En los tres casos la presión atmosférica observada en los barcos resultó mayor a la de San Felipe (~1.31 veces), diferencia que puede adjudicarse principalmente a una discrepancia entre la calibración de los barómetros. La magnitud de la diferencia y un Al=200 Km, produciría vientos de al menos 25 m/s, (la máxima rapidez registrada en barco es ~20 m/s), pero el valor observado de la presión entre San Felipe y las embarcaciones, correspondería a un gradiente de presión medio hacia el interior del Golfo, que no es consecuente ni con las observaciones, ni con el régimen estacional de viento, ni con los datos observados entre San Felipe y Puerto Peñasco. Sin embargo el comportamiento de esta variable es similar a la observada en San Felipe, con una correlación de 0.99.

Los extremos máximos de nubosidad observados en San Felipe coinciden con los correspondientes en el interior del

Golfo, pero las condiciones de nubosidad mar adentro son más persistentes (correlación entre 0.20 y 0.32), de forma que la media es 1.5 veces mayor al observado en tierra.

El viento observado en las embarcaciones (media horaria de datos semihorarios), tiene una fluctuación mayor a la observada en tierra (media horaria de datos a cada 15 minutos) y la magnitud media es 3.2 veces mayor a la de San Felipe. La correlación es mayor para el viento transversal al Golfo (correlación de 0.04 y -0.30 respectivamente).

La comparación de los datos meteorológicos de San Felipe con datos de Puerto Peñasco y de las campañas oceanográficas indican que en San Felipe existe una subestimación en la magnitud del viento, la humedad relativa y la nubosidad. Como consecuencia se puede pensar que el flujo de calor a través de la superficie, estimado con los datos meteorológicos de San Felipe, produzca resultados que difieran significativamente de los valores esperados para el interior del Golfo en una relación lineal con el viento, y casi lineal con la humedad relativa dentro del intervalo de 58 al 75%. Con el propósito de mejorar la estimación del flujo de calor a través de la superficie con datos meteorológicos de San Felipe, se emplean como factores de corrección para la humedad relativa el valor de 1.28, y para la magnitud del viento 2.55. Estos valores son la media de las razones de humedad relativa y magnitud de viento encontradas entre datos de Puerto Peñasco y San Felipe, y datos de barco y San Felipe.

III.8 Resumen.

Se ha mostrado que las condiciones meteorológicas del NGC son reguladas por la interacción de celdas de circulacion ciclónica y anticiclónica extratropical, que en función de sus posiciones relativas al Golfo permiten el predominio de masas de aire contrastantes. En terminos gruesos, frías y secas o cálidas y humedas que determinan el comportamiento estacional de las variables atmosféricas observadas. Los datos, meteorológicos de Puerto Peñasco Son. y los correspondientes a campañas oceanográficas, muestran un acuerdo cualitativo con los datos de San Felipe, por lo que éstos pueden considerarse representativos de las condiciones del NGC sólo en términos generales, pues las características locales de San Felipe producen una subestimación en la magnitud del viento, humedad propósito de relativa y nubosidad. Con el mejorar la estimación del flujo de calor aplican se factores de corrección a la magnitud del viento (2.55) y a la humedad relativa (1.28). invasión de aire frío y seco La se caracteriza por viento intenso del NO y baja humedad relativa. otoño-invierno 82/83 Los períodos de V 86/87 fueron estadísticamente diferentes al resto de los períodos. E1 primero presentó condiciones de humedad relativa y de magnitud de viento singularmente altas y el segundo humedad relativa anómalamente baja.

## IV. MODELO HOMOGÉNEO.

En este capítulo se examina el efecto de las condiciones atmosféricas diarias observadas en San Felipe B. Cfa. sobre la evolución temporal de los flujos de calor a través de la superficie, y la temperatura, salinidad y flotabilidad de cuatro columnas de agua homogéneas con diferente temperatura inicial y profundidad. La profundidad de cada columna se eligió considerando la batimetría del NGC, las regiones identificadas por Organista (1987) como mezcladas y/o estratificadas y la profundidad media de la capa mezclada durante el invierno en las zonas profundas.

## IV.1 Descripción del modelo.

El modelo se basa en las ecuaciones de continuidad, de conservación de calor y de conservación de sal, bajo la suposición de que es posible considerar la capa superior del océano como estadísticamente homogénea a lo largo de la horizontal (Niiler y Kraus, 1977). En el caso del NGC, se, consideran bandas de igual profundidad, paralelas a la costa, las cuales son homogéneas en invierno.

El cambio local de la densidad, expresado en kg/m<sup>3</sup>s es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \alpha \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_0 \beta \frac{\partial S}{\partial t}, \qquad (1)$$

donde  $\rho_0 = \rho(35, 24, 0)$  es una densidad de referencia y  $\alpha$  (°C<sup>-1</sup>)

y  $\beta$  (ppm<sup>-1</sup>) son los coeficientes de expansión térmica y contracción halina definidos como

$$\alpha = -\frac{1}{\rho_{\circ}} \frac{\partial \rho}{\partial T},$$
  
$$\beta = \frac{1}{\rho_{\circ}} \frac{\partial \rho}{\partial S}.$$

Bajo consideraciones semejantes a las de la acuación (1), la ecuación de conservación de calor expresada en °C/s es

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial Z} \left( \overline{W'T'} \right) = \frac{1}{\rho \circ C_{P}} \frac{\partial I}{\partial Z}, \qquad (2)$$

donde I es la fracción penetrativa de la radiación solar total, I<sub>0</sub>, que llega a la superficie del agua y que decae exponencialmente en función de la profundidad (z) de acuerdo a la expresión

$$I = I_0 e^{\gamma z}.$$
 (3)

El factor de decaimiento ( $\gamma$ ) varía entre 3 y 10 m<sup>-1</sup> (Lavín, 1984). El término  $\overline{W'T'}$  representa el promedio del flujo vertical turbulento de la temperatura.

La ecuación de conservación de sal, expresada en ppm/s, es

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial Z} \left( \overline{W'S'} \right) = 0$$
(4)

el término  $\overline{W'S'}$  representan el promedio del flujo turbulento de la salinidad.

La suposición de que la distribución vertical de la temperatura y salinidad es uniforme dentro de la columna de agua, permite integrar las ecuaciones (2) y (4) desde el fondoz = -h hasta la superficie z=0, dejando su evolución temporal en función de los flujos turbulentos a través de la superficie y el fondo:

$$\frac{\partial T_{o}}{\partial t}h + \overline{W'T'_{z=0}} - \overline{W'T'_{z=-h}} \frac{1_{o}}{\rho_{o}C_{p}} (1 - \bar{e}^{\gamma h}) = 0$$
(5)

$$\frac{\partial S_0}{\partial t} h + \overline{W'S'}_{z=0} - \overline{W'S'}_{z=-h} = 0$$
(6)

Los flujos turbulentos en la superficie pueden ser expresados en función de los flujos de calor a través de la superficie  $(W/m^2)$ , para la temperatura:

$$\overline{W'T'}_{z=0} = \frac{1}{\rho_0 C_P} (I_0 - Qe - Qb - Qh)$$
(7)

y de la precipitación y evaporación (kg/m<sup>2</sup>s), para la salinidad:

$$\overline{W'S'_{z=0}} = \frac{1}{\rho} \quad (E-P)S_{0} \tag{8}$$

 $Q_{\circ}$ ,  $Q_{b}$  y  $Q_{h}$  son los flujos de calor latente, onda larga y sensible respectivamente, los cuales se consideran negativos del mar a la atmósfera. P y E son flujos de masa por precipitación y evaporación.

Si se considera que no habrá avance de la capa mezclada, es decir que h permanece constante, las condiciones de flujo, turbulento en el fondo de la capa son cero, es decir (5) y (6) se reducen a:

$$\frac{\partial T_{o}}{\partial t} h + \frac{1}{\rho_{o}C_{p}} (I_{o}-Q_{o}-Q_{b}-Q_{h}) - \frac{I_{o}}{\rho_{o}C_{p}} (1-e^{-\gamma h}) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial S_{o}}{\partial t} h + \frac{1}{\rho_{o}} (E-P)S_{o} = 0 \quad (10)$$

En este caso (modelo homogéneo) se considerará que la radiación que llega a la superficie del océano se reparte en toda la columna, es decir,  $-\gamma h = 0$ , y que el valor de la precipitación P es despreciable, por lo que los cambios de' temperatura (9) y salinidad (10) finalmente quedan:

$$\frac{\partial T_{o}}{\partial t} = \frac{Q_{f}}{\rho_{o}C_{p}h},$$
(11)

$$\frac{\partial S_{\circ}}{\partial t} = \frac{ES_{\circ}}{\rho \circ h}, \qquad (12)$$

donde Qf es el flujo neto a través de la superficie, definido como

$$Q_{f} = I_{o} - Q_{\ell} \equiv I_{o} - Q_{e} - Q_{b} - Q_{h}.$$
(13)

El cambio local de la densidad, ecuacion (1), se expresa como:,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\alpha \frac{Qf}{C_{\rm ph}} + \beta \frac{ES}{h}$$
(14)

La flotabilidad definida por ejemplo por Gill (1982) como: b =  $-\rho g$ , i.e. peso por unidad de volúmen (kgm/s<sup>2</sup>)(1/m<sup>3</sup>), es entonces:

$$-g \frac{\partial \rho}{\partial t} = g \left( \alpha \frac{Qf}{C_{ph}} + \beta \frac{ES}{h} \right)$$
(15)

y el flujo de flotabilidad por unidad de superficie

$$B = -gh \frac{\partial \rho}{\partial t} = g\alpha \frac{Qf}{C_P} + g\beta ES$$
(16)

es decir peso por unidad de superficie por unidad de tiempo  $(kgm/s^2)(1/m^2s)$ .

A partir de condiciones iniciales de temperatura y salinidad del agua, y la media diaria de datos meteorológicos, se hace una predicción del flujo superficial de calor total Qf, ecuación (13), y del flujo de flotabilidad B, ecuación (16). Las expresiones para calcular cada uno de los flujos de calor son las empleadas por Lavín y Organista (1988). Con las ecuaciones que describen la evolución de los cambios de temperatura y salinidad (11) y (12) discretizadas, se hace la predicción de la temperatura y salinidad del día siguiente.

La temperatura y salinidad iniciales de acuerdo a la profundidad de cada columna (Tabla VIII) son los valores típicos de la región Norte del Golfo de California en octubre de acuerdo a cada profundidad (Lavín, comunicación personal).

Tabla VIII. Valores iniciales de temperatura y salinidad del agua empleados en el modelo de capa homogénea (MH) de acuerdo a la profundidad de cada columna de agua.

h (m)	T₀(°C)	S∘(ups)			
5	23	35.5			
30	24	35.5			
75	28	35.5			

IV.2 Resultados.

Los resultados que enseguida se presentan, utilizan la secuencia diaria de datos meteorológicos de cada uno de los períodos otoño-invierno de 1982 a 1987 empleando como factores de corrección para la humedad relativa y magnitud de viento las razones encontradas en el capítulo anterior, 1.28 y 2.55, respectivamente.

La evolución temporal de la temperatura y de la salinidad dependen inversamente de la profundidad de la columna de agua, ecuaciones (11) y (12), por lo que las regiones más someras se

ajustan más rápidamente a la fluctuación de la temperatura del aire y muestran en consecuencia mayores fluctuaciones (fig. 9). Este mejor ajuste a las condiciones atmosféricas implica un menor contraste térmico mar-aire y consecuentemente una menor magnitud de los flujos de calor latente, sensible y de flotabilidad.

En octubre la temperatura del agua indica que el ciclo de calentamiento de la columna de agua aún no ha terminado (fig. 9), es a partir de noviembre cuando la temperatura del agua disminuye, alcanzando el valor más bajo en enero en la columna de 5 m (~ 15  $^{\circ}$ C), y un mes más tarde en las columnas de 30 (~ 18 °C) y 75 m (~ 22 °C); es claro también que el ciclo de enfriamiento debe terminar despues de marzo. La evolución temporal es semejante en cada período, pero en 82/83 (fig. 9a) el decremento medio fué menor y en el 86/87 (fig. 9e) fué mayor, debido primordialmente a la alta y baja humedad relativa experimentadas en elrespectivo período. La temperatura media mensual en la columna de 5 m (fig. 9f), concuerda satisfactoriamente con los valores de temperatura, superficial publicados por Robinson (1973).

Debido a que el modelo no contempla la ganancia de agua dulce, la salinidad siempre se mantiene constante o se incrementa (fig. 10) y en consecuencia su valor al final del período es alto respecto de los valores característicos de marzo (35.73 a 35.25 ppm; E. Torres, comunicación personal) pero es claro que estos incrementos muestran el efecto de



Figura 9 Resultados del modelo homogéneo. Temperatura diaria de la columna de agua de 5, 30 y 75 m de profundidad (línea continua, punteada y segmentada), durante el otoño e invierno de 1982/83 (a), 1983/84 (b), 1984/85 (c), 1985/86 (d) y 1986/87 (e). También se muestra la temperatura mensual media de cada columna (f): 5\*, 30 " y 75 ° m y el intervalo de temperatura superficial en cada mes en la región norte del Golfo de California de acuerdo a Robinson (1973)\*.



Figura 10 Resultados del modelo homogéneo. Salinidad diaria de la columna de agua de 5, 30 y 75 m de profundidad (linea continua, punteada y segmentada), durante el otoño e invierno de 1982/83 (a), 1983/84 (b), 1984/85 (c), 1985/86 (d) y 1986/87 (e). También se muestra la salinidad media mensual de cada columna (f): 5<sup>\*</sup>, 30<sup>°</sup> y 75 ° m.

episodios con baja humedad relativa y viento intenso, en los que la evaporación media es de  $7\times10^{-4}$ ,  $8\times10^{-4}$  y  $1\times10^{-3}$  kg/m<sup>2</sup>s. El mayor incremento de la salinidad corresponde a los volúmenes de agua más pequeños; de otoño a invierno el incremento neto de la salinidad es de 3.5, 0.75 y 0.30 ppm en las columnas de 5, 30 y 75 m respectivamente. Nuevamente a pesar que la evolución de la salinidad es similar en cada período, es notable que los mayores incrementos corresponden al 86/87 y 83/84 (fig. 10b y 10e), que son los períodos con menor humedad relativa.

El flujo neto de calor diario Qf (fig. 11), el balance entre la ganancia de calor por onda corta (QB=IO) y la pérdida de calor (Ql), generalmente es positivo en octubre y en marzo, cuando QB tiene sus máximos relativos en este período y supera con facilidad a Ql (=QO+QD+QD). A partir de noviembre, el valor de Qf se vuelve eventualmente negativo cuando la magnitud del flujo de onda corta, cerca de su mínimo estacional, es superada por el incremento conjunto de los flujos de calor latente y sensible, que en promedio superan<sup>2</sup> los -219 (h=5 m), -243 (h=30 m) y -319 (h=75 m) W/m<sup>2</sup>.

El contraste térmico entre la atmósfera y las aguas del NGC, además del valor de la temperatura inicial, producen que la magnitud del flujo neto de calor negativo sea sustancialmente mayor en las regiones profundas, y menor cuando Q<sub>f</sub> es positivo. El flujo neto de calor mensual medio (Tabla IX) es positivo en octubre, febrero y marzo en las



Figura 11 Resultados del modelo homogeneo. Flujo total de calor diario a través de la superficie en la columna de 5, 30 y 75 m de profundidad (línea continua, punteada y segmentada), durante el otoño e invierno de 1982/83 (a), 1983/84 (b) 1984/85 (c), 1985/86 (d) y 1986/87 (f). También se muestra el flujo total mensual medio de cada columna (f): 5<sup>^</sup>, 30<sup>ª</sup> y 75<sup>e</sup> m.

regiones con profundidad de 5 y 30 m, mientras en la región de 75 m, el NGC pierde calor de octubre a febrero (fig. 11f).

Tabla IX Flujo neto mensual de calor a través de la superficie de acuerdo a la profundidad de la columna. Modelo homogéneo.

	oct	nov	dic	ene	feb	mzo
h=5 m	25.6	-67.7	-13.4	0.5	21.9	30.0
h=30 m	52.3	-12.0	-95.6	-98.1	-85.3	78.7
h=75 m	-15.7	-183.2	-164.8	-224.4	-93.3	13.9

Q<sub>0</sub> generalmente es máximo en noviembre en la columna de 5 y 30 m y en enero en la columna más profunda, Q<sub>h</sub> es máximo de noviembre a enero y Q<sub>b</sub>, que no depende de los gradientes de temperatura entre el mar y la atmósfera, varía poco durante todo el período (fig. 12a)

El signo negativo que adquiere el flujo neto de calor de noviembre a febrero y que se refleja en la media mensual, es resultado de la frecuencia y duración de condiciones con viento del NO y baja humedad relativa, pues sólo bajo éstas condiciones  $Q\ell$  supera a  $Q_8$ . El número de días en que se presentan condiciones con flujo negativo de calor es de 64, 86 y 111 días, en ellos se libera aproximadamente el 65, 77 y 87% del calor total cedido por el NGC ( $Q\ell$ ) a la atmósfera de otoño a invierno, el cual es de 4.39X10<sup>7</sup>, 5.84X10<sup>8</sup> y 1.79X10<sup>9</sup> J/m<sup>2</sup> en h= 5, 30 y 75 m respectivamente. Bunker (1972) ha reportado



Figura 12 Composición del flujo negativo de calor (Ql= Qe+Qb+Qh) en columnas de agua de 5, 30 y 75 m: mensual (a) y debido a eventos de invasión de aire frío y seco en cada mes (b), de acuerdo al modelo homogéneo. Promedio de todos los años.

que eventos atmosféricos similares en el Mar Mediterráneo pueden producir que una columna de agua de 200 m de profundidad ceda a la atmósfera  $1.67 \times 10^9 \text{ J/m}^2$  de octubre a enero.

Las figuras 12 a y b permiten comparar el promedio interanual de la magnitud y composición de Ql mensual y la debida a condiciones atmosféricas en que Qf es exclusivamente Mensualmente negativo. Qe v Qь son los principales contribuyentes a Ql; su participación es del 55 al 66% y del 15 al 47% respectivamente mientras que Qh contribuye entre el 3 y 29% del total (fig. 12a). Los días en que Qf es negativo se relacionan con un incremento sustancial de los flujos de calor latente y sensible, cuya contribución varía del 59 al 79% y 0.5 al 28% respectivamente, mientra la contribución de  $Q_b$  es del 14 al 29% del total (fig. 12b).

En los períodos 82/83 y 86/87 la magnitud media del flujo de onda corta fué ~155 W/m<sup>2</sup>, pero en general la magnitud media del flujo neto de calor contrasta entre ellos, y son los valores extremos de todos los períodos (fig. 13): En 82/83 (86/87) los flujos de calor latente y de onda larga tienen la menor (mayor) magnitud y el flujo de calor sensible la mayor (menor) magnitud, en consecuencia el flujo neto de calor es el menor y mayor respectivamente. La alta humedad relativa del 82/83 tuvo un efecto moderador sobre el flujo de calor latente, el viento más bien propició un incremento en el flujo de calor sensible y en contraste la baja humedad relativa del



Figura 13 Flujo de calor de onda corta (Qs); total (Qf); onda larga (Qb); latente (Qe); y sensible (Qh), en promedio para cada período otoño-invierno.

86/87 favoreció la evaporación y la mayor magnitud de Q. En 83/84 la humedad relativa fué inferior al 82/83 y mayor a la de 86/87, pero la magnitud del viento fué mayor a la de 86/87, de forma que las pérdidas por Q. y Qf fueron camparables a las de este período.

El flujo diario de flotabilidad tiene una distribución temporal semejante a Qf (fig. 14), en la que los extremos positivos indican la razón del incremento en el peso de la columna de agua por unidad de superficie y corresponden a las condiciones en que Qf es negativo. Nótese que durante 82/83 (fig. 14a), se tiene la menor pérdida de flotabilidad y en' contraste en 83/84 (fig. 14b) y 86/87 (fig. 14e) la mayor, es decir, de acuerdo a este resultado las condiciones atmosféricas del 82/83 provocaron poca inestabilidad en la columna de agua.

En la figura 15 a 17 se muestra el efecto que tienen los eventos atmosféricos con viento intenso y baja humedad relativa sobre la temperatura y salinidad de cada columna de agua (5,30 y 75 m): Cada barra representa un evento, el ancho de la barra indica la duración del evento y la altura de la barra el decremento de la temperatura o el incremento de la salinidad promedios de acuerdo a la duración del evento. Los, mayores cambios de la temperatura y la salinidad, en el caso de la columna de 5 m de profundidad (fig. 15) se concentran en noviembre y en las columnas de 30 y 75 m de noviembre a enero (figs. 15 y 16). Nuevamente se remarca que el 82/83 y el 86/87



Figura 14 Resultados del modelo homogéneo. Flujo de flotabilidad diario en la columna de 5, 30 y 75 m (línea continua, punteada y segmentada) durante el otoño e invierno de 1982/83 (a), 1983/84 (b), 1984/85 (c), 1985/86 (d) y 1986/87 (e). También se muestra el flujo de flotabilidad mensual medio de cada columna (f): 5<sup>°</sup>, 30<sup>°</sup> y 75<sup>°</sup> m.



Figura 15 Resultados del modelo homogéneo. Incremento de temperatura (a) y salinidad (b) en la columna de agua de 5 m de profundidad, producidos durante los eventos en que el flujo total de calor es negativo, en cada período otoño-invierno.



Figura 16 Resultados del modelo homogéneo. Incremento de temperatura (a) y salinidad (b) en la columna de agua de 30 m de profundidad, producidos durante los eventos en que el flujo de calor es negativo, en cada período otoño-invierno.



Figura 17 Resultados del modelo homogéneo. Incremento de temperatura (a) y salinidad (b) en la columna de agua de 75 m de profundidad, producidos durante los eventos en que el flujo de calor es negativo, en cada período otoño-invierno.

presentan los decrementos de temperatura e incrementos de salinidad menores y mayores, respectivamente.

La duración de cada episodio en que Qf es negativo, depende de la profundidad de la columna: dos episodios independientes con Qf negativo en la columna de 5 m de profundidad, son uno solo en la columna más profunda. La duración media de los eventos con Qf negativo para las profundidades 5, 30 y 75 m, es de 2.6, 4 y 5.6 días, y el en promedio número de eventos de 24, 21 y 20 días respectivamente.

Los mayores decrementos de la temperatura (hasta de 6.8 °C) e incrementos de la salinidad (hasta de 0.5 ppm) en la columna de 5 m, ocurren en eventos con duración entre 3 y 10 días; en las columnas de 30 y 75 m los mayores decrementos de la temperatura (hasta de 3.3 y 2.3 °C respectivamente) e incrementos de sal (hasta de 0.20 y 0.12 ppm respectivamente) corresponden en general a eventos con duración superior a 10 días. Bunker (1972) consideró que de octubre a enero el Mar Mediterráneo experimenta en los primeros 200 m decrementos de la temperatura de 2 °C e incrementos de la salinidad de 0.12 ppm, que son suficientes para hacer inestable el agua y permitir la mezcla. Los resultados mostrados en las figuras 15 a 17, indican que el efecto aislado de los eventos atmosféricos en el NGC, propician cambios de la temperatura y la salinidad semejantes a los reportados por Bunker (1972), en las columnas hasta de 75 m de profundidad. El efecto en una

columna más profunda y estratificada es investigado en el siguiente capítulo, donde el forzamiento atmosférico deberá usarse para romper la estratificación.

IV.3 Resumen.

Los resultados del modelo homogéneo indican que el flujo neto de calor negativo está relacionado con condiciones de viento intenso del NO y baja humedad relativa. La rapidéz de la columna para responder al forzamiento atmosférico depende de su profundidad, por lo que en regiones someras el contraste entre el mar y la atmósfera es menor y en consecuencia los flujos de calor latente, sensible y flotabilidad son menores' en magnitud y duración. El calor que pierde el NGC por eventos con viento intenso del NO, representa hasta el 87% del total, del cual el mayor componente es el flujo de calor latente. El efecto de los eventos con flujo de calor negativo con duración cercana a 20 días en una columna homogénea de 75 m puede generar incrementos de la densidad hasta de 0.61 kg/m<sup>3</sup>. Los períodos de otoño e invierno del 82/83 y 86/87, muestran los flujos netos de calor negativos y flujos e incrementos de la densidad más bajos altos respectivamente, y más en correspondencia con las condiciones meteorológicas mencionadas en el capítulo anterior.

## V. MODELO UNIDIMENSIONAL DE ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA.

La respuesta de una columna de agua estratificada al forzamiento atmosférico, es analizado empleando un modelo unidimensional de mezcla vertical de energía cinética turbulenta (Lavín, 1984), que fué desarrollado para las costas del Reino Unido, donde el efecto de la salinidad sobre la densidad de la columna se considera despreciable. El modelo ha sido modificado para incluir el perfil de densidad en función de ambas: la temperatura y la salinidad, debido a que la evaporación en la región Norte del Golfo de California, en principio podría producir incrementos considerables de la salinidad en la capa superior de la columna de agua, dejándola en condiciones propicias para la convección.

## V.1 Descripción del modelo.

 $\overline{\rho} = \frac{1}{h} \int_{-h}^{0} \rho(z) dz$ 

El modelo unidimensional se basa en la definición de la energía potencial de la columna de agua relativa al estado de mezcla (Simpson *et al.*, 1978), la cual es expresada como:

$$\phi = \frac{1}{h} \int_{-h}^{0} gz (\overline{\rho} - \rho(z)) dz \qquad (17)$$

con

ndo 
$$\phi$$
 = 0 la columna de agua está bien mezclada, cuando  $\phi$  >

Cuando  $\phi = 0$  la columna de agua está bien mezclada, cuando  $\phi > 0$  es estable y cuando  $\phi < 0$  es inestable. La evolución

temporal de  $\phi$  es regulada por la ganancia de calor como agente estratificante y por la mezcla debida a la energía cinética turbulenta debida a la convección, el viento en la superficie y la corriente de marea en el fondo mediante la ecuación:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{g\alpha}{2Cp} Q_{f} - \varepsilon C_{D} \rho \langle U \rangle^{3} - \delta \gamma C_{D} \rho_{a} \langle W \rangle^{3}$$
(18)  
dt 2Cp

 $\gamma$  es la razón de corriente superficial inducida por el viento referida a la rapidez del viento medida a 10 m.  $\delta$  y  $\varepsilon$  son fracciones de la energía de viento y de la marea disponible para la mezcla.  $\langle U^3 \rangle$  y  $\langle W^3 \rangle$  son promedios del cubo de la rapidez de la corriente de marea y del viento respectivamente y CD es un coeficiente de arrastre superficial. Lavín (1984), desarrolló ampliamente las bases de este modelo y las parametrizaciones empleadas, por lo que este trabajo sólo se limita a mencionarlas.

condiciones de intercambio turbulento Las en la superficie son las mismas que en el caso del modelo homogéneo, pero en el fondo de la capa mezclada son proporcionales a la disipación de energía cinética razón de turbulenta. Esquemáticamente el perfil inicial de densidad es modificado en cada paso de tiempo por las siguientes condiciones:

1) Ganancia de calor y evaporación: El flujo de calor (ec. 13) es calculado en cada paso de tiempo usando la secuencia diaria de datos atmosféricos y la temperatura superficial predicha en el paso anterior (ec. 11). El 55% de

la radiación solar que llega a la superficie es atrapada en la primera capa (1 m) y el 45% restante penetra en la columna de agua de acuerdo a la ecuacion (3). Sólo la capa superficial es afectada por la evaporación (ec. 12).

2) Mezcla convectiva: Si el flujo neto de flotabilidad es negativo la estructura de densidad es inestable y produce, mezcla por convección. Se emplea convección no penetrativa para mezclar la capa superior con las siguientes, hasta que la inestabilidad desaparece.

3) Mezcla por viento: Se calcula la energía potencial de la columna de agua (ec. 17) y la fracción de energía cinética turbulenta del viento disponible para mezcla (ECT<sub>V</sub> =  $\delta\gamma C_{10}\rho_{a}|W_{10}|^{3}$ ). Las capas bajo la capa mezclada son abordadas una por una, calculandose cada vez la energía potencial de la capa y la diferencia entre la energía potencial de la columna y de la capa, hasta que esta diferencia sea mayor a ECT<sub>V</sub>.

4) Mezcla por marea: Se calcula la energía potencial de la columna de agua (ec. 12) y la fracción de energía cinética turbulenta de la corriente de marea disponible para la mezcla (ECT<sub>m</sub> =  $\epsilon \rho_0 C_D |U|^3$ ). Las capas por encima de la capa mezclada de fondo son abordadas una por una cada vez, calculandose la energía potencial de la capa y la diferencia entre la energía de la columna y la capa, hasta que esta diferencia sea mayor a ECT<sub>m</sub>.

Al final de cada paso se obtiene a) la temperatura, salinidad, densidad y espesor de la capa mezclada superficial

58

y de fondo, y la energía potencial y contenido de calor de la columna de agua y b) el perfil de temperatura, salinidad y densidad a cada 5 m.

Los ensayos se realizaron considerando columnas de agua de 30, 75, 100 y 200 m de profundidad. En todos los casos se emplearon los perfiles de temperatura y salinidad típicos de la región central septiembre de del NGC (E. Torres, comunicación personal). En las columnas de 30 y 75 m se usaron además perfiles iniciales de temperatura y salinidad homogéneos, cuyos valores corresponden a los empleados en el capítulo anterior. La rapidez de la corriente de marea, se basa en valores generados por el modelo numérico bidimensional barotrópico del Golfo de California usado por Argote et al. estimar la variación (1993)para estacional de la estratificación en la región Norte del Golfo de California. Los coeficientes empleados para calcular ECTv y ECTm son los mismos que los empleados por Lavín (1984) para el Mar de' Irlanda, debido a que hasta ahora no existe suficiente información de viento que permita determinar los apropiados para el NGC. En todos los casos la rapidez del viento y la humedad relativa fueron multiplicadas por los factores de 2.55 y 1.28 respectivamente.

V.2 Resultados.

Los resultados del modelo de capa mezclada, permiten que haya decrementos e incrementos de la salinidad y de la temperatura superficial y de fondo respectivamente, debido a los procesos de mezcla. La temperatura de fondo alcanza su máximo como consecuencia de la mezcla total de la columna, por lo que se presenta después de iniciado el enfriamento de la capa superficial, en forma similar a la encontrada por Simpson y Bowers (1984) en el banco Nymphe; una vez mezclada la, columna la temperatura de superficie y fondo decrecen. En los eventos iniciales con pérdida de calor, los perfiles de temperatura y densidad se suavizan mientras el de salinidad se vuelve más agudo como consecuencia de la acumulación de sal en las niveles superiores.

El período con condiciones de estratificación es mayor a medida que aumenta la profundidad de la columna, por lo que la estructura termohalina por debajo de la capa mezclada permanece inalterada por mayor tiempo, con valores de densidad que pueden ser más bajos en relación a las columnas más en consecuencia puede producirse circulación someras, Y termohalina, de predominar los intercambios en la vertical. Este es el caso general que se observará en la columna de 30 m, cuya densidad supera invariablemente la densidad encontrada en el fondo de la columna de 200 m. En las columnas de 75 o 100 m la formación de agua más pesada en relación a la columna más profunda, puede no ocurrir, como se verá para el caso del

otoño e invierno de 1982/83. En general en los períodos 82/83 y 85/86 se tienen los menores incrementos en la densidad y en el 86/87 el mayor.

V.2.1 Perfil de temperatura y salinidad inicialmente homogéneo.

A pesar de partir de un perfil homogéneo (fig. 18) en columnas relativamente someras (30 y 75 m), la estratificación se presenta en octubre y marzo, con  $\phi < 25 \text{ J/m}^2$ , difiriendo con los resultados de observaciones obtenidos por Organista (1987) que indican mezcla total en columnas con menos de 50 m. Lavin (1984), ha indicado que un mejor conocimiento de las mezcla y inclusión eficiencias de la del efecto de intercambios laterales, pueden reducir la sobrestimación de la estratificación en esa clase de modelos, lo cual está fuera del propósito de este trabajo.

Como consecuencia de la estratificación, el intercambio de calor, limitado a una capa mezclada menor a 10 m, sufre los cambios más abruptos de T y S con analogía al caso de la columna homogénea de 5 m. Una vez que Qf es predominantemente negativo y es posible la mezcla de toda la columna, los resultados de ambos modelos (homogéneo y de capas) en columnas de agua de la misma profundidad se asemejan.


Figura 18 Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil homogéneo en una columna de 30 m de profundidad, otoño-invierno 1982/83.

V.2.2 Perfil inicial estratificado.

Los resultados para una columna de 30 m, (sólo se muestra el período 82/83, fig.19), no difieren substancialmente de los anteriores, excepto por los valores iniciales de temperatura y salinidad. Igualmente se tiene estratificación ligera en octubre ( $\phi < 25 \text{ J/m}^2$ ) cuando Qf es positivo, y una vez que las pérdidas de calor predominan, la columna se mantiene mezclada. La mezcla en esta región se produce fácilmente debido a que la débil estratificación inicial es erosionada rápidamente por el efecto mezclador de la marea. En octubre y marzo, el máximo espesor de la capa mezclada de superficie es ~10 m y el/ espesor de la capa de fondo generalmente alcanza los 20 m de lugar a un sistema profundidad, que da de dos capas, identificado por Ridderinkhof (1991) como una configuración típica de aguas intermedias en las que la estabilidad de la columna depende fuertemente de las condiciones atmosféricas. La temperatura y salinidad al final del período son ~ 27 °C y 37 ppm respectivamente y el incremento máximo de la densidad varía de 4 a 5.2 kg/m<sup>3</sup>.

La columna con 75 m (fig. 20, 21 y 22), se mantiene estratificada generalmente de octubre ( $\phi$  ~ 150 J/m ) a noviembre ( $\phi$  = 0), aún cuando se presentan eventos de pérdida, de calor de magnitud comparable a los de diciembre y enero; es decir, los eventos iniciales son empleados en debilitar la estratificación. Las capas mezcladas de superficie y fondo crecen hasta encontrarse a una profundidad entre 40 y 50 m,



Figura 19 Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 30 m de profundidad, otoño-invierno 1982/83.



Figura 20 Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 70 m de profundidad, otoño-invierno 1982/83.



Figura 21 Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 70 m de profundidad, otoño-invierno 1985/86.



Figura 22 Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 70 m de profundidad, otoño-invierno 1986/87.

forman una estructura de dos capas, en que la diferencia de densidad entre ellas disminuye gradualmente, hasta la mezcla total. El rompimiento de la estratificación ocurre en eventos, de duración cercana a 20 días, cuando un mayor enfriamiento produce la convección. El decremento promedio de la temperatura en los eventos iniciales es ~1.2 °C. Una vez mezclada la columna de agua, los breves eventos con ganancia de calor no logran reestratificar la columna. El contenido de calor perdido desde octubre hasta el momento de ocurrir la mezcla total es cercano a  $8X10^6$  J/m<sup>3</sup>. Al final del período de mezcla la temperatura y salinidad de superficie y fondo alcanzan ~ 20 °C y 36 ppm, y el incremento máximo de la densidad varía entre 2.5 y 3.5 kg/m<sup>3</sup>.

A pesar que en 82/83 la magnitud de Qf negativo es menor al de otros años (fig 13), la duración con condiciones de mezcla total es larga (fig. 20), como resultado de la baja ganacia de calor de onda corta y la pérdida de calor sensible que debió producir el intenso viento al inicio de 1983. En 86/87 (fig. 22) la mezcla total ocurre tempranamente (a partir de noviembre) y permanece en toda la temporada. En este período la pérdida de calor se debe principalmente al flujo de calor latente, como consecuencia de la baja humedad relativa que le caracterizó. En el resto de los períodos la mezcla de interrumpida por esporádicos eventos la columna es de

calentamiento que logran reestratificar débilmente la columna, como en el caso del período 85/86 (fig. 21), pero que es fácilmente eliminada por los siguientes eventos de enfriamiento.

La columna con 100 m (fig. 23, 24 y 25) permanece estratificada generalmente hasta principios de enero. Α diferencia de la columna con 75 m, la mezcla total no ocurre durante un evento de gran duración, más bien la mezcla total es producto de la erosión permanente de los eventos de enfriamiento, de forma que cuando ocurre la mezcla total el enfriamiento en la superficie (~ .8 °C) no es necesariamente mayor al de eventos anteriores. En todos los casos hay una tendencia a formar un sistema de dos capas que antecede a la mezcla total. En 82/83 (fig. 23) la duración con estas condiciones es la más larga ~ 35 días; en los demás períodos dura ~ 20 días. Hasta el momento en que se logra la mezcla total, la columna pierde ~  $10^7 \text{ J/m}^3$ . Al final del período de enfriamiento, la temperatura y salinidad de superficie y fondo alcanzan valores cercanos a 20 °C y 35.9 ppm, mientras que el máximo incremento de la densidad varía entre 2.5 y 3.4 kg/m<sup>3</sup>.

Los períodos 82/83 y 86/87 (fig. 23 y 25) presentan la mezcla total de la columna más tardía y temprana respectivamente; además son los que tienen condiciones de mezcla total más continuos. En contraste, 85/86 (fig. 24) presenta las condiciones de mezcla más breves.

En la columna con 200 m (fig. 26, 27 y 28) la mezcla



Figura 23 Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 100 m de profundidad, otoño-invierno 1982/83.



Figura 24 Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 100 m de profundidad, otoño-invierno 1985/86.



Figura 25 Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 100 m de profundidad, otoño-invierno 1986/87.



Figura 26 Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 200 m de profundidad, otoño-invierno 1982/83.



Figura 27 Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 200 m de profundidad, otoño-invierno 1985/86.



Figura 28 Resultados del modelo unidimensional. Valores diarios de superficie (línea continua) y fondo (línea segmentada): temperatura (a); salinidad (b); densidad (c) y espesor de la capa mezclada (d), a partir de un perfil estratificado en una columna de 200 m de profundidad, otoño-invierno 1986/87.

total no ocurre en ningun período. El espesor de la capa mezclada crece y alcanza valores entre 90 y 125 m; con el mayor espesor de la capa de superficie en 82/83 (fig. 26) y 86/87 (fig. 28) en los que se forma la estructura de dos capas, mientras que en 82/83 la diferencia de densidad entre superficie y fondo es ~1 kg/m<sup>3</sup>, en 86/87 es menor a 0.5 kg/m<sup>3</sup>. Debido a que la mezcla total no se produce, la temperatura, salinidad y densidad del fondo sufren modificaciones muy pequeñas, es decir, el agua por debajo de los 125 m no es suceptible a las condiciones atmosféricas estacionales. El calor perdido por la columna de octubre a marzo es cercano a  $1.4X10^7$  J/m<sup>3</sup>, pero la tendencia en las curvas de energía potencial, densidad, temperatura y espesor de la capa de mezcla, sugiere que el ciclo de enfriamiento en esta columna va más allá del período otoño-invierno.

## V.3 Resumen.

Los resultados indican que las columnas de agua con profundidad de 30, 75 y 100 m son mezcladas completamente por las condiciones atmosféricas de otoño e invierno. El inicio de la mezcla y la magnitud de la pérdida de calor difiere para cada una de ellas. Los períodos con mayor semejanza en la magnitud del flujo de calor a través de la superficie y la evolución de la estructura termohalina son 83/84, 84/85 y 85/86. En general la columna de 30 m se mantiene mezclada de noviembre a febrero, la de 75 m de diciembre a febrero y la

columna de 100 m de enero a febrero. Los primeros eventos de enfriamiento severos y de gran duración mezclan totalmente columnas hasta con 75 m de profundidad, mientras que en regiones con 100 m la mezcla total es consecuencia del efecto acumulado de cada uno de ellos. El efecto de las condiciones atmosféricas no se manifiesta más allá de los primeros 125 m de profundidad. Existe una diferencia en el inicio y duración de las condiciones de mezcla y en la densidad alcanzada por la columna, debida a las condiciones atmosféricas que caracterizan a cada uno de los períodos. En el 82/83 la densidad de la columna de 75 m, difícilmente alcanza la encontrada en la capa de mezcla de la columna de 100 m. En 86/87, la densidad adquirida supera la encontrada en la capa mezclada de la columna de 200 m.

## VI DISCUSIÓN.

La descripción de la actividad atmosférica sinóptica, esquematizada como un movimiento hacia el E de un sistema de desplaza al baia presión que centro de alta presión normalmentes ubicado al SO de los E.U. (sección III.1), explica los contrastes más sobresalientes de la meteorología de otoño e invierno en el NGC: La humedad relativa, y la nubosidad aumentan cuando el ciclón al O y el anticiclón al E del NGC (fig. 2a) propician el acarreo de aire humedo de la región Sur. Una vez que la baja presión se encuentra en el continente (alejada lo suficiente del Golfo), la alta presión que se había desplazado al Norte regrese. La posición relativa de ambos sistemas: la baja presión al E del NGC y la alta presión al O favorecen el flujo de aire frío y seco (fig. 2e). Esta actividad es consecuencia del contraste térmico entre el océano y el continente y entre latitudes medias y bajas en esta época, pero debe ser reforzada por el efecto "tras de montaña" (Bates, 1990) y por la influencia del agua cálida del NGC sobre la capa marina, en forma similar a la región de los Grandes Lagos (Petterssen and Calabrase, 1959), ya que durante el invierno la temperatura del aire cercana a la superficie es de 17 °C en San Felipe, mientras que de acuerdo a Reyes Coca y Vogel (1984), en San Diego, Isla Guadalupe y Tucson es ≤ 15 °C.

La correlación entre las observaciones de San Felipe B. Cfa. y Puerto Peñasco Son. indica que la atmósfera baja actúa uniformemente en el NGC, en términos generales. Las diferencias meteorológicas de mayor importancia por su efecto sobre el flujo de calor, residen en la humedad relativa y la magnitud del viento, subestimadas en San Felipe. La media de la magnitud máxima de viento diario observado en San Felipe es ~7 m/s, con el factor de corrección (2.55) se obtendría una magnitud ~18 m/s, valor cercano al reportado por Merrifield y Winant (1989) de 15 m/s, correspondiente a episodios de viento máximo del NO en Isla Tortuga. La magnitud del factor para viento es también semejante al estimado por Badan et al. (1991) y por otros autores como Franklin y Blanton (1983). Sin embargo este criterio requiere de una mejor evaluación, fundamentada en un mayor número de observaciones en el mar y un cuidadoso control en la toma de datos.

Las humedades relativas del 82/83 y del 86/87 (sección III.6), pueden ser relacionadas con las respectivas condiciones de viento: la magnitud de la componente del viento transversal al Golfo en ambos períodos es relativamente alta (Tabla III) y de signo opuesto, en 82/83 es positiva,, indicando que el viento fué dominantemente del NO (aire polar oceánico), mientras que en 86/87 fué del N (aire polar continental).

El valor de la humedad relativa y del viento durante el 82/83 podría estar relacionado con el evento El Niño (Enfield,

1989), durante el cual hubo una propagación de agua cálida hacia la costa occidental de los E.U. (Herrera, 1992) y hacia los polos (Wyrtki, 1985), la cual se manifestó también en el interior del Golfo de California (Robles y Marinone, 1987). Esta última señal pudo desplazar una capa marina húmeda y caliente hacia el Norte e incrementar el gradiente de temperatura, propiciando vientos intensos hacia el SE.

El flujo neto de calor a través de la superficie en el NGC calculado mediante los 2 modelos, es negativo ante eventos de viento intenso del NW. La composición del flujo negativo de calor generado en ellos, muestra que el enfriamiento de las. aquas del NGC es debida primordialmente al flujo de calor latente, más que por la diferencia de temperatura entre el mar y la atmósfera (flujo de calor sensible). Debido a que los datos meteorológicos horarios de las campañas oceanográficas no muestran una fluctuación diurna tan marcada como los datos de San Felipe, sino que varían muy cerca del valor medio 8), se puede suponer que el efecto diario (fig. del enfriamiento nocturno altera substancialmente no la composición de Ql.

Roden (1964) estimó que aguas costeras de 13°C y 35.5 ppm  $(\rho=1026.781 \text{ Kg/m}^3)$ , podrían hundirse a una profundidad de 100 m, donde la temperatura 14 °C y la salinidad 35.20 ups, producen la misma densidad. Los eventos en una capa homogénea de 30 m de profundidad que disminuyen la temperatura por más de 1 °C, son de duración mayor a 6 días y constituyen menos

del 25% del total de eventos que ocurren en toda la temporada. Bray (1988b) reportó que sobre la cuenca de Wagner es posible encontrar agua de superficie y fondo con la misma salinidad, pero con diferencias de temperatura de 2 a 5 °C; si estas aguas fueran producto de la convección, se requeriría de un intercambio de calor a través de la superficie de -355 W/m<sup>2</sup> durante 20 y 50 días respectivamente, para lograr decrementos de la temperatura semejantes en una columna mezclada de 75 m. La mayor duración con evento con Qf negativo es de 23 días y en todos los casos Qf varía entre -309.1 y -359.4 W/m<sup>2</sup>; esto es, como ya se ha establecido una columna de 75 m puede sufrir enfriamientos hasta ~ 2 °C (fig. 17), pero no hay eventos Qf negativo que puedan modificar individuales con la temperatura por cerca de 5 °C. En columnas de profundidad mayor a 100 m, es el efecto acumulativo de los eventos lo que produce la mezcla de toda la columna de agua, como lo muestran los resultados para la columna de 100 m, donde la mezcla total ocurre en eventos que no son los de mayor duración, ni los que mayor enfriamiento producen.

La magnitud del viento en el desarrollo de la capa mezclada tiene mayor importancia a través de la convección que a través del abordamiento. En el 82/83 el intenso viento' favoreció el flujo de calor sensible, haciéndolo el más alto de todos los períodos (fig. 13). Cuando Qf es negativo la energía cinética convectiva puede ser hasta 25 veces mayor que la energía cinética del viento.

A pesar del gradiente de salinidad que se produce en la columna de agua, su contribución al incremento de la densidad. es pequeño, como lo muestra cualquiera de las gráficas de densidad de superficie, donde se advierte la relación con la temperatura del agua. La mezcla por marea contribuye a reducir la diferencia de propiedades entre la capa superficial y de fondo y acelera la mezcla total, pero su importancia decrece a mayor profundidad de la columna, por lo que la energía cinética superficie disipa de la mayor parte de la estratificación, originándose un retraso en la ocurrencia de la mezcla total en las regiones profundas con respecto a las someras.

El crecimiento del espesor de la capa mezclada es detenido por eventos en los que Qr es positivo, de manera que la mezcla depende también de que los eventos con Qf positivo sean poco importantes en relación a los eventos con Qf negativo. En 82/83 un evento con  $Q_f \sim -150 \text{ w/m}^2$  (19 de enero de 1983, fig. 11a), culmina la mezcla total de la columna de 100 m; en contraste, flujos de más de -400 W/m<sup>2</sup> en cualquiera de los otros períodos no logran mezclar la columna. Al evento del 82/83 le anteceden ~ 70 días en que la ganancia de calor casi es nula; pero en cualquiera de los demás períodos inmediatamente antes de los enfriamientos hubo un evento con  $Q_f$  de al menos 25 W/m<sup>2</sup>, por lo que la energía cinética turbulenta debió disiparse en romper la estratificación creada previamente.

La formación de una columna de agua totalmente mezclada en regiones de 75 y 100 m, no siempre sugiere la posibilidad de invadir por el fondo regiones más profundas, como se sigue del valor alcanzado por la densidad en la columna de 75 m durante 82/83 (fig. 29a), donde apenas supera a la densidad de la capa mezclada de 100 m, más bien el agua de la capa mezclada de 200 m invadiría la región de 100 m, y la estructura termohalina mostraría una lengüeta de agua salina cercana a la superficie. En contraste la densidad alcanzada por la columna de agua de 75 m durante 86/87 (fig. 29b), fué alta en relación a la densidad de la capa mezclada de 200 m, y es el caso más general.

La fecha de inicio y duración de las condiciones con mezcla total en las columnas con menos de 100 m, la densidad alcanzada por la columna de agua en cada período y la formación de un sistema de dos capas en la columna de 200 m, son las principales diferencias interanuales encontradas en este trabajo, y dependen primordialmente de la humedad relativa y la magnitud del viento; la importancia de la temperatura del aire en la convección es modesta. Los flujos negativos de calor medios de mayor magnitud no corresponden a los períodos más fríos, por ejemplo: el 84/85 fué 1.5 °C más frío que el promedio global de todos los períodos otoño invierno, pero 2.2 % más húmedo y con magnitud de viento 0.2 m/s menor , tuvo un Qf que varía entre -113 y -132 W/m<sup>2</sup>, en' cambio el 86/87 apenas 0.2°C más frío, pero 8.4% más seco y



Figura 29 Evolución diaria de la densidad de superficie en la columna de agua de 75 m (línea continua); 100 m (línea punteada) y 200 m (línea segmentada), durante los períodos otoño-invierno de 1982/83 y 1986/87.

con viento de magnitud semejante cercana al promedio global, tuvo un Qf medio que varió entre -144 y -207 W/m<sup>2</sup>. Ovchinnikov et al. (1987) han sugerido que la mezcla profunda en el Mar Mediterráneo Oeste no requiere de inviernos anormalmente, severos, sólo necesitan ser 1-2 °C más fríos respecto del promedio. Para el caso que aquí se trata, si la severidad del invierno dependíera, además del efecto mezclador, de la posibilidad que tenga esta agua de invadir regiones de mayor profundidad, este sería el 86/87. En contraste los inviernos de 85/86 y 82/83, serían los menos severos.

E1 resultado para el 1982/83 sugiere que durante condiciones El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la posibildad de formación de masas de aqua de fondo es menor que en cualquier otro período, sin embargo las observaciones hidrográficas de marzo de 1973 (Alvarez-Borrego y Schartwzlose 1979) son opuestas a este resultado. Debe recordarse que como inicial, condición en cada ensayo se usó la misma configuración termohalina, por lo que no se tomó en cuenta la historia de la estructura termohalina, ni se consideró la influencia de las aguas del Golfo Central, que podrían facilitar el deslizamiento de agua más densa de la región norte hacia el sur, dos aspectos importantes señalados por Bray (1988a) como posible causa de la formación de aqua en aquella época. La atmosféra del Golfo de California durante eventos ENOS puede además, experimentar una mayor influencia de características tropicales y consecuentemente un número

mayor de tormentas durante el invierno respecto de otros años, como ocurrió en 1982/83 (Enfield, 1989), lo cual podría producir pérdidas de calor suficientes para la formación de una masa de agua pesada como lo sugirió Bray (1988b). Las limitaciones físicas que implíca el uso de un modelo unidimensional sólo serán superadas cuando se usen modelos que además de los intercambios verticales, consideren el efecto de la advección.

## VII. CONCLUSIONES

Las condiciones atmosféricas locales del NGC de otoño e invierno son reguladas por sistemas de alta y baja presión de latitudes medias, típicos de esta temporada.

Los otoño-invierno de 1982/83 y 1986/87, fueron estadísticamente diferentes al resto de los períodos: En el primero la humedad relativa y la magnitud del viento fueron notablementemente altos y en el segundo la humedad relativa fué notablemente baja.

El flujo neto de calor a través de la superficie es negativo bajo condiciones de viento intenso del NO (~8 m/s) y baja humedad relativa (~57%). En estos eventos se produce hasta el 87% del flujo de calor hacia la atmósfera de toda la temporada, de éste más de 2/3 es debido a la evaporación.

Eventos con duración de ~20 días pueden mezclar completamente columnas de agua hasta de 75 m; pero la mezcla en columnas más profundas es debida al efecto acumulativo de enfriamientos anteriores. La mezcla total en la columna de 100 m, ocurre casi un mes despues que en la de 75 m.

La humedad relativa es el parámetro atmosférico de mayor importancia, variabilidad determina las diferencias su encontradas en la magnitud del flujo de calor cedido a la atmósfera por el NGC, el inicio y duración de las condiciones mezcla total la densidad alcanzada de V en cada otoño-invierno.

## LITERATURA CITADA

- Alvarez-Borrego S., y R. Schwartzlose, 1979. Masas de agua del Golfo de California. Ciencias Marinas, 6(1,2): 43-63.
- Argote M., A. Amador, M. y C. Morales, 1985. Variación estacional de la estratificación en la región Norte del Golfo de California. GEOS boletín, época II. Unión Geofísica Mexicana. Octubre 1985, número 3.
- Badan A., C. Dorman, M. Merrifield, y C. Winant, 1991. The lower atmosphere over the Gulf of California. J. Geophys. Res., 96(C9): 16877-16896.
- Badan A., M. C. Hendershott y Lavín M.F., 1991. Underway Doppler Current Profiles in the Gulf of California. EOS, 72, (19, 209): 217-218.
- Bailey H. P., 1975. Weather of Southern California. University of California Press. 87 pp.
- Bates G.T., 1990. A Case Study of the Effects of Topography on Cyclone Development in the Western United States. Month. Wea. Rev., 118: 1808-1825.
- Bunker A.F., 1972. Wintertime Interactions of the Atmosphere with the Mediterranean Sea. J. Phys. Oceanogr., 2: 225-238.
- Bray N., 1988a. Thermohaline circulation in the Gulf of California. J. Geophys. Res., 93: 4993-5020.
- Bray N., 1988b Water mass formation in the Gulf of California. J. Geophys. Res., 93: 9223-9240.
- Enfield D., 1989. El Niño, Past y Present. Reviews of Geophysics. 27 (2): 159-187
- Franklin B. S. and J. O. Blanton, 1984. The Use of Land and Sea Based Wind Data in a Simple Circulation Model. JPO, 14: 193-197.
- García E. y P. Mosiño, 1966-67. Decenio Hidrológico Internacional. Memoria. UNAM. p. 29-53.
- Gill A.E., 1982. Atmosphere-Ocean Dynamics. Academic Press. 661 pp.
- Herrera H., 1992. Propagación de Señales de Baja Frecuencia en la Temperatura Superficial del Mar Analizadas a Partir de Datos de Satélite en el Pacífico Nor-Oriental. Tesis de Maestría. CICESE.

- Ives R.L., 1962. The "Pestiferous Winds" of the Upper Gulf of California. Weatherwise. 15 (5): 196-201.
- Kundu P., 1975. Ekman veering observed near the Ocean Bottom. J. Phys. Oceanogr. 6: 238-242.
- Lavin M. F., 1984. The seasonal cycle and variability of stratification in the Western Irish Sea. Ph.D. Thesis, University College of North Wales. 154 pp.
- Lavín M. F., G. Gaxiola, J. Ma. Robles y K. Ritcher, 1991. Winter Water-Masses and Nutrients in the Northern Gulf of California. Submitted to J. Geophys. Res.
- Lavín M.F. y S. Organista, 1988. Surface heat flux in the Northern Gulf of California. J. Geophys. Res., 93: 14033-14038.
- Lavín M.F. V. Godínez y S. Sánchez, 1989. El Alto Golfo de California en el invierno de 1987-1988., GEOS 9(4): 347-355.
- Leaman K.D. y F. A Schott, 1991. Hydrographic Structure of the Convection Regime in the Gulf of Lions: Winter 1987. J. Phys. Oceanogr., 21: 575-598.
- MEDOC GROUP, 1969. Observation of Formation of Deep Water in the Mediterranean Sea, 1969. Nature., 227: 1037-1040.
- Merrifield M.A., A. Badan-Dangon y C. Winant, 1987. Comportamiento temporal de variables Físicas en las capas bajas de la atmósfera sobre el Golfo de California. 1983-1985. Un informe de datos. SIO reference series # 87-6
- Merrifield M.A. and C. Winant, 1989. Shelf Circulation in the Gulf of California: A Description of the Variability. J. Geophys. Res., 94(Cl2): 18133-18160.
- Niiler P.P. and E. B. Kraus, 1977. p. 143-172 Modelling and Prediction of the Upper Layers of the Ocean. E.B. Kraus Ed. Pergamon Press. 275 pp.
- Organista S., 1987. Flujos de calor en el Alto Golfo de California. Tesis de Maestría, CICESE. 142 pp.
- Ovchinnikov I.M., G. Krivosheya, I. Zats and M. S. Nemirovsky, 1987. On the formation of deep waters of the Western, Mediterranean. Annales Geophysicae, 5b(1): 37-42.
- Ovchinnikov V.I., I. Zats, G. Krivosheya and I Udodov, 1983. Formation of Deep Eastern Mediterranean Waters in the Adriatic Sea. Oceanology, 25(6):704-707

- Paden C., 1990. Tidal and Atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California. Ph.D. Dissertation. University of California, San Diego. 87 pp.
- Pettersen S. y P. A. Calabrase, 1959. On Some Weather Influences Due to Warming of the air by the Great Lakes in Winter. J. Meteorology. 16: 646-652.
- Reyes C. S. y G. Vogel., 1984. Estudio preliminar de las condiciones meteorológicas y climatológicas alrededor del Golfo de California 2da. Parte: Análisis de los parámetros termodinámicos. Ciencias Marinas, 10(2): 45-64.
- Ridderinkhof H., 1992. On the effects of variability in meteorological forcing on the vertical structure of a stratified watercolumn. Continental Shelf Res. 12(1): 25-36.
- Robinson M., 1973. Atlas of monthly mean seasurface y subsurface temperatures in the Gulf of California, México. San Diego Society of Natural History. Memoir 5. p. 6-15.
- Robles J.M. S. G.Marinone, 1987., Seasonal and interanual termohaline variability in the Guaymas Basin of the Gulf of California. Continental Shelf Res. 7: 715-733.
- Roden G.I. 1958., Oceanographic y Meteorological Aspects of the Gulf of California. Pac. Sci., 12 (1): 21-45.
- Roden G.I. 1964., Oceanographic Aspects of the Gulf of California. In: Tj. H. van Andel y G.G. Shor Jr., (editors), Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem., 3: 30-58.
- Sorkina A.I., 1963. Atmospheric Circulation and the Related Wind Fields Over the North Pacific. Gidrometeorologicheskoe Izdatel'stvo (Otdelenie), Moskva. 218 pp.
- Simpson J.H., C.M. Allen, and N.C.G. Morris, 1978. Fronts on the Continental Shelf. JGR, 83(C9): 4607-4614.
- Simpson J.H. and D. Bowers, 1981. Models of stratification and frontal movements in shelf seas. Deep-Sea Res., 28A(7): 727-738.
- Simpson J.H.and D. Bowers, 1984. The role of tidal stirring in controlling the seasonal heat cycle in shelf seas. Annales, Geophysicae, 2(4): 411-416.
- Sverdrup H.U., 1941. The Gulf of California. Preliminary discussion of the cruise of the E.W. Scripps in february and march. 1939. 6th Proc. Pac. Sci. Congr., 3: 161-166.

- Till R., 1974. Statistical methods for the earth sciences an introduction, MacMillan Press LTD. 154 pp.
- Villaseñor-Casales A., 1974. Hidrología de la parte norte del Golfo de California, Tesis de Licenciatura. Universidad Autonoma de Baja California. 53 pp.
- Wyrtki, K., 1985. Sea Level fluctuations in the Pacific during 1982-1983 El Niño, Geophys. Res. Lett., 12: 125-128.
- Worthington L. V., 1972. Negative Oceanic Heat Flux as a cause of Water-Mass Formation. J. Phys. of Oceanogr., 2,(3): 205-211.
- Zishka K.M. y Smith P.J., 1980. The Climatology of Cyclones and Anticyclones over North America and Surrounding Ocean Environs for January and July, 1950-77. Mon. Wea. Rev., 108(4): 387-401.

1

1