Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada



CIRCULACION GEOSTROFICA EN LA REGION NORTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA

TESIS MAESTRIA EN CIENCIAS

LAURA ELENA CARRILLO BIBRIEZCA

ENSENADA B.C. MEXICO MAYO DE 1996



TESIS DEFENDIDA POR

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITE

Dr. Miguel Fernando Lavín Peregrina

Director del Comité

Dr. Silvio Guido L. Marinone Moschetto

Miembro del Comité

Dr. Juan Manuel López Mariscal

Miembro del Comité

Dr. Héctor Manuel Escamilla Taylor

Miembro del Comité

Dra. María Luisa Argote Espinoza

Miembro del Comité

Dr. Antoine Badan Dangon Jefe del Departamento de Oceanografía Física

in Clant 11

Dra. Ma. Luisa Argote Espinoza Director de Estudios de Posgrado

24 de mayo de 1996

CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA.

DIVISION DE OCEANOLOGIA DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA FISICA

CIRCULACION GEOSTROFICA EN LA REGION NORTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA.

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de MAESTRA EN CIENCIAS presenta:

LAURA ELENA CARRILLO BIBRIEZCA

Ensenada, Baja California, México. Mayo de 1996.

RESUMEN de la Tesis de Laura Elena Carrillo Bibriezca, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en OCEANOGRAFIA FISICA. Ensenada, Baja California, México. Mayo de 1996.

CIRCULACION GEOSTROFICA EN LA REGION NORTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA

Resumen aprobado por:

Dr Miguel F. Lavin Peregrina Director de Tesis

Se realizan cálculos de velocidad geostrófica en la Región Norte del Golfo de California (RNGC), utilizando información hidrográfica de 1939 a 1995. Los cálculos de velocidad geostrófica se aplican sobre la superficie del área de la RNGC y sobre cortes transversales, utilizando 70m como nivel de no movimiento para los cálculos en el plano horizontal y el fondo en el vertical. La circulación geostrófica encontrada es estacional; en primavera no se distingue ningún patrón de circulación; mientras que en verano, la señal de un giro ciclónico sobre el centro de la RNGC, es fuerte y clara, presentando las mayores velocidades encontradas durante el año (~0.11 m/s). Al iniciar el otoño el patrón de circulación se invierte, observándose un giro anticiclónico sobre la región de Cuenca Delfín, con magnitudes de la velocidad menores a las encontradas en verano (hasta un orden de magnitud menor, ~0.03 m/s). Conforme se avanza a condiciones de invierno, el patrón anticiclónico se muestra débil y no claro, debido a que prevalecen condiciones barotrópicas sobre la capa superficial de esta región. Los eventos El-Niño parecen cambiar el patrón de circulación en la RNGC durante el invierno, sin embargo, la forma en que es afectada la circulación no parece seguir un patrón. Se propone un modelo conceptual de la circulación para la RNGC en base a los resultados encontrados en este trabajo y en las recientes modelaciones numéricas sobre esta región.

ABSTRACT of the Thesis of LAURA ELENA CARRILLO BIBRIEZCA, presented as partial requirement to obtain the MASTER IN SCIENCES grade in PHYSICAL OCEANOGRAPHY. Ensenada, Baja California, Mexico. May 1996.

GEOSTROPHIC CIRCULATION IN THE NORTHERN GULF OF CALIFORNIA

Geostrophic velocity calculations are made in the Northern Gulf of California (NGC), using hydrographic data from 1939 to 1995. These calculations are made over the surface area of the NGC, using 70 m as the level of no motion, and over vertical sections across the NGC, assuming zero velocity at the bottom. The geostrophic circulation presents a seasonal behavior: in spring no clear pattern is found, while in summer there is a strong cyclonic gyre in the center of the NGC, with the strongest currents of the year (~0.11m/s). This circulation pattern reverses at the beginning of autumn, with a much weaker anticyclonic gyre (~0.03 m/s). As winter approaches, the anticyclonic circulation becomes weaker and less well-defined, as the surface layer deepens. El Niño events appear to alter the winter circulation pattern, but not in the same fashion in all the events. A conceptual model of the circulation in the NGC is proposed, based in the results presented here an in recent findings by numerical modelling.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. M.F. Lavin por dirigir esta tesis y por sus siempre atinados comentarios y sugerencias.

Al los miembros de mi comité de tesis: Dr. Manel López, Dr. Guido Marinone, Dra. Ma. Luisa Argote y Dr. Héctor Escamilla, por revisar el trabajo y por sus comentarios y sugerencias que ayudaron a enriquecer esta tesis.

Al CICESE por las facilidades otorgadas durante mi estacia.

Al CONACyT por el apoyo económico brindado en mi periodo como becaria.

A los técnicos: Sr. Salvador Sánchez, Ocean.Victor Godínez, L.C.C. Carlos Cabrera y Ocean. Joaquín García, por la ayuda prestada.

A los estudiantes Emilio Palacios y Emilio Beier por sus sugerencias y consejos durante el desarrollo de la tesis. A Manuel López Bojórquez por ayudarme con programas y conceptos del análisis objetivo.

A la Dra. Nan Bray por sus comentarios y ayuda en la obtención de datos y de programas para análisis objetivo.

Al Dr. Edgar Pavía y M.C. Oscar Delgado por creer en mí.

Este trabajo es parte del proyecto CONACyT "El Sistema de Circulación en la Región Norte del Golfo de California" (No. 3209-T) y del proyecto SIMAC "Circulación en la Parte Norte del Golfo de California: Observaciones Lagrangeanas" (No. SIMAC/94/CM-08).

CONTENIDO

I INTRODUCCION	1
II OBSERVACIONES HIDROGRAFICAS	8
III EL CALCULO GEOSTROFICO DE LAS VELOCIDADES EN LA	
LA REGION NORTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA	13
III.1 Topografía dinámica en la superficie	14
III.2 Estructura vertical del campo de velocidad	18
III.3 Mapeo objetivo sobre los campos	18
IVRESULTADOS: Evolución estacional de las velocidades geostróficas	20
IV.1 Primavera	21
IV.2 Verano	27
IV.3 Otoño	33
IV.4 Invierno	38
V DISCUSION	42
V.1Estacionalidad de la circulación en la RNGC	42
V.2Hacia un modelo conceptual de circulación en la RNGC	44
V.2.1 Verano	45
V.2.2 Invierno	46
V.2.3 Estaciones de transición: primavera y otoño	47
V.3Eventos El-Niño y la circulación en la RNGC	53
V.4El método geostrófico y mediciones directas sobre la RNGC	54
VI CONCLUSIONES	57
LITERATURA CITADA	58
APENDICE 1	63

LISTA DE FIGURAS

Figura

Página

- 1 Región Norte del Golfo de California.
- 2 Circulación sugerida por Lepley, et al. (1978), en verano: a)
 2 Circulación en superficie, b) Circulación en el fondo de la cuenca,
 c) Transecto norte-sur y d) Transecto este-oeste. Para invierno sugiere el mismo patrón, pero invertido.
- Bray (1988a y 1988b) sugiere una circulación ciclónica en verano y anticiclónica el resto del año. Aquí se muestra la circulación, con forma de giro anticiclónico, encontrada por Bray (1988b) en el crucero de marzo de 1985. a) Altura dinámica a 10m relativa a 100m, y b) El campo de velocidades obtenido. (Tomado de Bray, 1988b).
- 4 Modelos numéricos de circulación en la RNGC; a) Circulación obtenida por Beier (1996) en invierno utilizando como forzantes: viento y el forzado de la estructura de una onda de Kelvin en la boca del golfo. b) Idem a) pero para verano. c) Circulación obtenida en invierno por Argote *et al.* (1996), utilizando el viento como forzante, la flecha indica la dirección del viento, y d) Idem c) pero para verano.
- 5 Posiciones de las estaciones hidrográficas. Las líneas contínuas unen los lances utilizados en los cortes transversales.
- 6 Altura dinámica para 8612 a 10m relativa a: a) 70m y b) 100m. Se muestra la isóbata de los 70m.
- 7 Altura dinámica para 8612 a 10m relativa a 70m y su campo de velocidades geostróficas asociado; se muestra la isóbata de los 70m.
 a) y b) 8504, c) y d) 8405, e) y f) 8206.
- 8 Campo de densidad (kg/m^3) y de velocidad (m/s) de los cortes transversales correspondientes al mes de abril. Los contornos de líneas contínuas representan agua que entra a la página, y los contornos de líneas discontínuas agua que sale de la página. a) 5604, b) 7004 y c) 8504; la posición de los transectos se observa en las figuras 5f, 5g y 5h respectivamente.

3

4

6

10

16

22

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura

9

El campo de densidad (kg / m^3) y de velocidades (m/s) de los cortes transversales correspondientes a mayo. Los contornos de líneas contínuas representan agua que entra a la página, y los contornos de líneas discontínuas agua que sale de la página. a) 5905, b) 8405 corte más al norte y c) 8405 corte más al sur; la posición de los transectos se observan en las Figuras 5i y 5j, para 5905 y 8405 respectivamente.

- 10 Campo de densidad (kg/m^3) y de velocidad geostrófica (m/s) de los cortes transversales para el mes de junio. Los contornos de líneas contínuas representan agua que entra a la página, y los contornos de líneas discontínuas agua que sale de la página. a) y b) 5706, y c) y d) 8206; la posición de los transectos se observa en las Figuras 5k y 51.
- 11 Altura dinámica a 10m relativa a 70m y su campo de velocidades geostróficas asociado. Se muestra la isóbata de los 70m. a) y b) 9008, c) y d) 7109, e) y f) 8609, y g) y h) 9509.
- 12 Campo de densidad (kg / m³) y de velocidades geostróficas (m/s) de los cortes transversales para a) y b) 9008, c) y d) 7109 corte más al norte, e) y f) 7109 corte más al sur, g) y h) 8609 corte más al norte, I) y j) 8609 corte más al sur. Los contornos de líneas contínuas representan agua que entra a la página, y los contornos de líneas discontínuas agua que sale de la página. La posición de los transectos se observan en las Figuras 5m, 5o y 5p..
- 13 Altura dinámica a 10m relativa a 70m y su campo de velocidades asociado, para a) y b) 7410, c) y d) 7911, e) y f) 8411, y g) y h) 8612. Se muestra la isóbata de los 70m.
- 14 El campo de densidad (kg/m^3) y de velocidades geostróficas (m/s) de los cortes transversales para a) y b) 7410, c) y d) 8411, e) y f) 8612 corte más al norte, y g) y h) 8612 corte más al sur. Los contornos de líneas contínuas representan agua que entra a la página, y los contornos de líneas discontínuas agua que sale de la página. Las posiciones de estos transectos se observan en las figuras 5r, 5t y 5u.

25

26

28

30

34

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura

Página

39

15 Altura dinámica a 10m relativa a 70m y su campo de velocidades geostróficas asociado. Se muestra la isóbata de los 70m. a) y b) 7702, c) y d) 8803, y años post-Niños: e) y f) 7303, y g) y h)

- 16 Campo de densidad (kg / m^3) y de velocidades geostróficas (m/s) de los cortes transversales para: a) y b) 3903, y c) y d) 8403. Los contornos de líneas contínuas representan agua que entra a la página, y los contornos de líneas discontínuas agua que sale de la página. La posición de los transectos se observa en las Figuras 5b y 5d.
- 17 Modelo conceptual de circulación sugerido. a) verano y b) invierno.
- 18 Velocidad geostrófica a 10m relativa a 100m para el crucero de septiembre de 1995, y b) velocidades obtenidas mediante seguimiento de boyas ARGOS, durante septiembre-octubre de 1995, (figura facilitada por Lavín *et al.*, 1996).

55

41

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Banco de datos hidrográficos.	9
П	Coeficiente de correlación compleja, y razón promedio de las velocidades a 10m calculadas con 70m y 100m como nivel de referencia.	17
Ш	Rapidez promedio y máximo de las velocidades geostróficas a 10m relativo a 70m para cada crucero.	32

CIRCULACION GEOSTROFICA EN LA REGION NORTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA

I INTRODUCCION

La Región Norte del Golfo de California (RNGC) es la zona localizada entre la península de Baja California y el estado de Sonora, y limitada al sur por el umbral de Cuenca Salsipuedes-Canal de Ballenas y por las Islas Angel de la Guarda y Tiburón (figura 1). Se diferencía de las otras regiones del golfo principalmente por ser una cuenca somera, con profundidades generalmente menores a 200m (destacando 2 cuencas: Wagner y Delfín, de hasta 200m y 800m de profundidad, respectivamente) y por su clima continental, observándose grandes cambios anuales (~ 20 °C) y diurnos (hasta 10 °C) en la temperatura del aire, lo cual es típico de regiones desérticas. Esto es debido a que el efecto climático del Océano Pacífico sobre esta región es interrumpido por la presencia de la cadena montañosa de Baja California (Roden y Emilsson, 1979).

Se ha sugerido que la circulación superficial en la RNGC es un gran giro cuyo sentido es ciclónico en verano y anticiclónico el resto del año y que responde estacionalmente al comportamiento monzónico de los vientos (Lepley *et al.*, 1978; Bray 1988a y 1988b) (figuras 2 y 3). Pero este esquema aún no ha sido apoyado mediante mediciones directas ni con las suficientes observaciones hidrográficas. Aunque una circulación superficial ciclónica es esperada durante el verano para cuencas semicerradas como lo es la RNGC, de acuerdo con las observaciones realizadas por Emery y Csanady



Figura 1. Región Norte del Golfo de California.



Figura 2. Circulación sugerida por Lepley, *et al.* (1978), a) circulación en superficie en verano, b) circulación en verano en el fondo de la cuenca, c) transecto norte-sur en verano y d) transecto este-oeste en verano. Para invierno sugiere el mismo patrón, pero invertido.



Figura 3. Bray (1988a y 1988b) sugiere una circulación ciclónica en verano y anticiclónica el resto del año. Aquí se muestra la circulación, con forma de giro anticiclónico, encontrada por Bray (1988b) en el crucero de marzo de 1985. a) Altura Dinámica a 10m relativa a 100m, y b) el campo de velocidades obtenido (tomado de Bray, 1988b).

(1973) sobre más de 40 lagos y mares marginales. Por otro lado, se ha observado sobre la RNGC la presencia de un frente en verano, que separa aguas mezcladas de estratificadas, producto de la mezcla vertical por corrientes de marea y el calentamiento solar en superficie (Durazo, 1989; Argote *et al.*, 1985 y 1995). Este tipo de frente puede conducir a una circulación superficial ciclónica en el verano, como ya ha sido observado sobre el mar de Irlanda (Hill *et al.*, 1994), debido a que este frente de fondo genera un domo de agua más densa y fría sobre el fondo de la cuenca (Lavín, 1984), el cual se ha observado conduce a una circulación superficial ciclónica (Hill, 1993).

Sin embargo, la RNGC se encuentra sometida a otros forzantes, cuyo efecto sobre la circulación ha sido estudiado mediante modelos numéricos, ya que a falta de observaciones, éstos han sido una de las herramientas más usadas para explicar la circulación en esta región. Se han utilizado como agentes forzantes al viento, la marea, al calentamiento por la superficie y el forzamiento baroclínico en la boca del golfo, reproduciendo la circulación estacional mencionada (Beier, 1996; y Argote *et al.*, 1996) (figura 4). Pero aún no ha sido posible determinar el peso que cada agente forzante tiene sobre la circulación, concebida por primera vez por Lepley *et al.* (1978) al observar patrones de turbidez en fotografías tomadas por los astronautas en los años 60's y 70's.

En este trabajo se utilizará el método geostrófico para generar mapas de alturas dinámicas y del campo de velocidad para la RNGC, además de trabajar sobre secciones transversales, para de esta forma abarcar el análisis en el plano horizontal y vertical. En la RNGC ya ha sido utilizado el método geostrófico sobre secciones transversales (Bray, 1988a),

5



Figura 4. Modelos numéricos de circulación en la RNGC; a) circulación obtenida por Beier (1996) en invierno utilizando como forzantes: viento y el forzado de la estructura de una onda de Kelvin en la boca del golfo. b) Idem a) pero para verano. c) circulación obtenida en invierno por Argote *et al.* (1996), utilizando el viento como forzante, la flecha indica la dirección del viento, y d) Idem c) pero para verano.

aplicando además sobre estas secciones un análisis de funciones empíricas ortogonales sugiriendo una señal estacional en la circulación. La información con la que se cuenta, presentada en la siguiente sección, abarca un ciclo casi anual, con lo cual se puede observar una evolución de la velocidad y confirmar la existencia de una señal estacional en la circulación. Señales estacionales también han sido observadas en los flujos de calor horizontales y verticales (Castro *et al.*, 1994), en la profundidad de la capa mezclada (Martínez-Sepúlveda, 1994) y sobre el transporte en los primeros 100 metros, en una sección transversal al sur de la RNGC que une a Guaymas y Santa Rosalía (Marinone y Ripa, 1988).

Aún cuando se han realizado múltiples estudios en la RNGC, el conocimiento acerca de su circulación no es suficiente para permitir construir un modelo conceptual de la dinámica, así como para definir su variabilidad estacional. Esto es debido principalmente a la carencia de observaciones. El objetivo del presente trabajo es conocer la circulación generada por el campo de densidad empleando un banco de datos hidrográficos históricos y recientes, más completo que el usado en trabajos anteriores (Bray, 1988a y 1988b) utilizando el método geostrófico para el cálculo de velocidades, y establecer si los datos recientes apoyan la existencia de un giro estacional. Por otro lado, en base a los resultados encontrados en este trabajo y a las recientes modelaciones numéricas sobre la RNGC, y apoyándose en la teorías sobre los mecanismos que pueden conducir a la circulación geostrófica observada, se sugiere un modelo conceptual de la circulación en la RNGC.

II OBSERVACIONES HIDROGRAFICAS

Los datos utilizados en este trabajo son parte del banco de observaciones hidrográficas del Golfo de California del Departamento de Oceanografía Física de CICESE, constituído por información de cruceros oceanográficos históricos y recientes, los cuales abarcan desde 1939 a 1995 (tabla I). Como muestra la tabla I, se utilizan también los datos del crucero oceanográfico de marzo de 1985, utilizados por Bray (1988b), con el fin de realizar comparaciones con los resultados obtenidos en este trabajo. Las posiciones de los lances de cada crucero se observan en la figura 5. La forma de denominar a cada crucero en este trabajo, es mediante el año y el número de mes, de esta forma el crucero 8609 corresponde al mes de septiembre del año 1986.

Debido a que los datos hidrográficos en los cruceros utilizados abarcan desde 1939 hasta 1995, existen diferencias en el sistema de unidades, siendo el más notorio el caso de la salinidad. Anteriormente se utilizaban ppm (partes por mil), pero a partir de 1978 se instituyen las nuevas unidades para salinidad, UPS o unidades prácticas de salinidad. Esta nueva escala fue diseñada para que coincida con la anterior alrededor de los 35 (Unesco, 1981 y 1984). Para propósitos prácticos, los valores históricos pueden ser preservados bajo la nueva escala (Lewis y Perkin, 1981), ya que mediante análisis realizados en laboratorio sobre muestras de botellas se encuentran diferencias muy pequeñas entre la antigua escala y la nueva, existiendo un error del orden de 0.01 entre UPS y ppm, semejante al error de los instrumentos (Lewis y Perkin, 1981).

Crucero	Año	Mes			
PRIMAVERA					
5604	1956	Abril			
7004	1970	Abril			
8504*	1985	Abril			
5905	1959	Mayo			
8405*	1984	Mayo			
5706	1957	Junio			
8206*	1982	Junio			
VERANO					
5708	1957	Agosto			
9008*	1990	Agosto			
7109*	1971	Septiembre			
8609*	1986	Septiembre			
9509*	1995	Septiembre			
ΟΤΟÑΟ					
7410*	1974	Octubre			
7911*	1979	Noviembre			
8411*	1984	Noviembre			
8612*	1986	Diciembre			
INVIERNO					
7702*	1977	Febrero			
3903	1939	Marzo			
7303*	1973	Marzo			
8403*	1984	Marzo			
8503*	1985	Marzo			
8803*	1988	Marzo			

Tabla I. Banco de datos hidrográficos.

• • •

* Cruceros utilizados en los cálculos de Topografía Dinámica de la superficie.



Figura 5. Posiciones de las estaciones hidrogáficas. Las líneas contínuas unen los lances utilizados en los cortes transversales.





La cantidad de información utilizada en este trabajo es mayor a la utilizada por Bray (1988a), ya que se utilizan observaciones hidrográficas de cruceros históricos y recientes. Para estudiar la circulación en el plano horizontal se utilizarán los cruceros cuyos lances se encuentran distribuídos sobre toda la RNGC. Sin embargo, los cruceros 9008 y el 8803 presentan los lances principalmente en un transecto longitudinal al golfo, por lo que los resultados de los cálculos sobre la RNGC sólo pueden ser tomados como sugerencia del posible patrón de circulación para estos cruceros. Para observar el campo de velocidades en el plano vertical se usan transectos transversales al golfo, la posición de los transectos se muestran como líneas contínuas uniendo a las estaciones en la figura 5.

III EL CALCULO GEOSTROFICO DE LAS VELOCIDADES EN LA REGION NORTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA

En este capítulo se describe la metodología utilizada para el cálculo de las alturas dinámicas y las velocidades geostróficas. Los resultados se presentan en el siguiente capítulo.

Una manera indirecta de estimar las velocidades de las corrientes es mediante el método geostrófico, el cual consiste en el cálculo de velocidades a partir del campo de densidad, suponiendo que el fluido se encuentra en estado estacionario y las únicas fuerzas actuantes son el gradiente de presión y la rotación terrestre (Gill, 1982).

Las corrientes son calculadas a partir de la integración en la vertical de las ecuaciones de viento térmico (ver Apéndice 1), usando el campo de datos hidrográficos para determinar el campo de densidad. Sin embargo, la constante de integración no puede ser obtenida sin el conocimiento de la velocidad absoluta en algún nivel específico (Pond y Pickard, 1978; Gill, 1982; Smedstad y Weber, 1985). Al no conocer la velocidad en alguna profundidad, se asume una profundidad en la cual la velocidad es cero, llamado nivel de referencia; sin embargo, no existe un criterio óptimo con el cual seleccionar el nivel de referencia adecuado (Pond y Pickard, 1978; Smedstad y Weber, 1985).

El nivel de referencia es una superficie isobárica horizontal a la cual se referencían otras superficies isobáricas que pueden estar inclinadas debido a la variación de la densidad a lo largo de éstas (Gill, 1982). De esta manera los gradientes horizontales de densidad implican la inclinación de superficies isobáricas con respecto a un nivel de referencia dado; el mapa generado con estas superficies de nivel, es llamado carta de topografía dinámica o altura dinámica, y puede representar la corriente o flujo geostrófico de las aguas sobre una superficie isobárica (Gill, 1982).

La aplicación de geostrofía en mares someros es discutible debido a la existencia de fricción en el fondo. Sin embargo, ésta ha sido utilizada en cuencas someras como una primera aproximación al campo de velocidades real, un ejemplo de aplicación de geostrofía en mares relativamente someros es el trabajo de Hill *et al.* (1994), el cual realiza cálculos geostróficos en el Mar de Irlanda y obtiene resultados complarables con mediciones directas.

En este trabajo se utiliza el método geostrófico para el cálculo de las velocidades en el plano horizontal analizando la topografía dinámica de la superficie, mientras que en el plano vertical se analizan los campos de velocidad sobre cortes transversales al golfo. Los detalles de estos cálculos se describen a continuación.

III.1 Topografía dinámica de la superficie

Los cálculos geostróficos de velocidad superficiales se presentan a 10m de profundidad y se realizan tomando 70m como nivel de no movimiento, para 16 de los 21 cruceros utilizados (cruceros señalados con un asterisco de la tabla I). Se usa 70m como nivel de no movimiento con el fin de obtener la mayor cobertura espacial posible sobre la RNGC. Para comparar los resultados entre el nivel de 70m y uno más profundo y observar qué problemas podría causar la profundidad de la capa mezclada sobre el campo de velocidades obtenido, se repitieron los cálculos usando 100m como nivel de no movimiento

en los cruceros con mayor cobertura (8403, 8504, 8609, 9509 y 8612). Con un nivel de referencia mayor que 100m la cantidad de lances disminuye, al grado de perder la confiabilidad en el campo resultante.

Para cuantificar las diferencias entre las velocidades obtenidas con el nivel de referencia de 70m y 100m, se calculó el coeficiente de correlación complejo (Kundu, 1976), que da el valor de la medición de la correlación y el ángulo de fase. Este último es un buen estimador del desplazamiento angular promedio entre un par de series de vectores bidimensionales, es independiente del sistema coordenado y está dado por el ángulo promedio contra-reloj del segundo vector con respecto al primero. Adicional a esto, se calculó un promedio de la razón entre la magnitud de las velocidades superficiales (10m) relativa a 100m sobre la magnitud de las velocidades relativas a 70m, para conocer las diferencias en magnitud entre ambas profundidades de referencia.

En la figura 6 se muestran las alturas dinámicas a 10m relativas a 70m y a 100m para el crucero 8612; los cruceros restantes mostraron el mismo comportamiento. Al comparar los campos obtenidos entre un nivel de referencia relativamente somero y otro más profundo, se observa que en general el patrón de circulación observado usando el nivel de referencia 70m se conserva cuando se usa 100m como nivel de referencia. Los resultados de la correlación vectorial usando niveles de referencia 70m y 100m se muestran en la tabla II, así como el promedio de las razones de la velocidad 100m/70m; los 5 cruceros presentaron cero grados de desplazamiento angular entre los vectores de velocidad de ambas profundidades.



Figura 6. Altura dinámica para 8612 a 10m relativa a a) 70m y b) 100m. Se muestra la isóbata de los 70m.

Tabla II.Coeficiente de correlación compleja, y razón
promedio de las magnitudes de la velocidad
a 10m calculadas con 70m y 100m como
nivel de referencia.

Crucoro	Coeficiente de	Razón Promedio
CIUCEIO	Correlación Compleja	(100m/70m)
8403	0.92	2.21
8504	0.95	0.90
8609	0.90	1.44
9509	0.91	1.37
8612	0.80	2.15

III.2 Estructura vertical del campo de velocidad

Para analizar la estructura vertical del campo de velocidad geostrófica, se realizan los cálculos sobre cortes transversales al golfo, tomando el fondo como nivel de no movimiento. Pocos cruceros coincidieron en el mismo corte, sin embargo, se buscaron los más cercanos.

III.3 Mapeo objetivo sobre los campos

Con el fin de generar mallas regularmente espaciadas, eliminar subjetividad en la interpretación de los resultados y obtener una mejor presentación de éstos, se utiliza la técnica de "mapeo objetivo" descrita por Roemmich (1983) y usada por Bray (1988a) en los campos espaciales de densidad, temperatura y salinidad. El valor estimado en los puntos de la malla está determinado por el conjunto de datos que tiene alrededor y está pesado en base a la distancia que lo separa de éstos. Se asume que los campos pueden ser descompuestos en dos escalas: una escala grande en la cual las propiedades varían lentamente y que es insensible a detalles; y una pequeña que es sólo resuelta por la hidrografía (Roemmich, 1983). Inicialmente, el valor máximo de la escala utilizada fué el correspondiente a la mínima correlación existente entre observaciones (~80 km), y el valor mínimo fué seleccionado en el punto donde existe un rápido decaimiento exponencial (~20 km). Posteriormente ambos valores fueron ajustados por prueba y error. En el campo horizontal se realiza mapeo sobre el campo de alturas dinámicas, generando una malla de 21x21 elementos, cuyos límites geográficos son: máximos 31°N de latitud y 112.5°W de longitud,

y mínimos 29.5° de latitud y 114.5°W de longitud. El paso de malla es de 0.075° en latitud y 0.1° en longitud. En las secciones verticales transversales, el mapeo se aplica sobre el campo de densidad, generando una malla de 31x31 elementos y los cálculos de velocidad se realizan sobre el campo de densidad estimado.

IV RESULTADOS:

Evolución estacional de las velocidades geostróficas

En el presente capítulo se describen los aspectos más sobresalientes de la circulación geostrófica en la RNGC durante primavera, verano, otoño e invierno. Se presentan gráficas en el plano horizontal del campo de altura dinámica a 10m relativa a 70m y su respectivo campo de velocidades asociado. En el plano vertical se muestran cortes transversales a la RNGC del campo de densidad y de velocidades geostróficas usando el fondo como nivel de no movimiento. Las secciones transversales presentadas corresponden a cortes oeste-este, es decir, la costa de Baja California en el lado izquierdo de la página y la costa de Sonora en el lado derecho. Se presenta además una tabla en la cual se indican el promedio y el máximo de la magnitud de la velocidad geostrófica a 10m relativa a 70m.

IV.1 Primavera

Al inicio y mitad de primavera (abril y mayo) no se presenta un patrón de circulación en forma de giro (figuras 7a, 7b, 7c y 7d); es hasta finales de primavera (junio) cuando se observa un patrón de circulación como un giro ciclónico sobre Cuenca Delfín (figuras 7e y 7f).

En los cortes transversales existen diferencias entre abril y mayo (figuras 8 y 9): en abril las velocidades son sumamente bajas y no se distingue un patrón claro de circulación (figuras 8b, 8d y 8f), mientras que mayo se presenta un campo de velocidades con entradas y salidas de agua (figuras 9b, 9d y 9f), aunque no refleja un patrón ciclónico o anticiclónico de circulación. Este es el resultado de las ondulaciones que se presentan en las isopicnas, principalmente la de σ t=26 (figuras 9a,9c y 9e). En general, durante abril y mayo se observa agua menos densa sobre las plataformas someras que sobre el centro de la cuenca (figuras 8a, 8c, 8e, 9a y 9e). En junio se observa que las isopicnas se inclinan hacia el fondo conforme se acercan a la costa, lo que le da una forma de domo en el fondo y centro de la cuenca (figuras 10a y10c); esto causa la circulación ciclónica que se observa tanto en el plano vertical (figuras 10b y 10d) como en el horizontal (figuras 7e y 7f), lo cual se discutirá más adelante.



Figura 7. Altura dinámica a 10m relativa a 70m y su campo de velocidades geostróficas asociado; se muestra la isóbata de los 70m. a) y b) 8504, c) y d) 8405, y e) y f) 8206.



Figura 7. (Continuación)



Figura 8. Campo de densidad (kg/m^3) y de velocidad (m/s) de los cortes transversales correspondientes al mes de abril. Los contornos de líneas contínuas representan agua que entra a la página, y los contornos de líneas discontínuas agua que sale de la página. a) 5604, b) 7004 y c) 8504; la posición de los transectos se observa en las figuras 5f, 5g y 5h respectivamente.


Figura 8. Campo de densidad (kg/m^3) y de velocidad (m/s) de los cortes transversales correspondientes al mes de abril. Los contornos de líneas contínuas representan agua que entra a la página, y los contornos de líneas discontínuas agua que sale de la página. a) 5604, b) 7004 y c) 8504; la posición de los transectos se observa en las figuras 5f, 5g y 5h respectivamente.



Figura 10. Campo de densidad (kg/m^3) y de velocidad geostrófica (m/s) de los cortes transversales para el mes de junio. Los contornos de líneas contínuas representan agua que entra a la página, y los contornos de líneas discontínuas agua que sale de la página. a) y b) 5706, y c) y d) 8206; la pocición de los transectos se observa en las figuras 5k y 51.

IV.2 Verano

Durante la totalidad del verano se mantiene la presencia de un giro ciclónico perfectamente definido al SE de Cuenca Delfín sobre el centro de la RNGC (figura 11). Durante esta estación se presentan las mayores magnitudes de velocidad observadas del año, con magnitudes de velocidad superficial promedio relativa a 70m de ~ 0.1 m/s (tabla III).

Aunque los datos del crucero 9008 se encuentran principalmente distribuidos en una línea longitudinal al golfo (figura 5n), las isolíneas de altura dinámica indican una depresión casi en el centro de la RNGC, sugiriendo un giro ciclónico (figuras 11a y 11b); la circulación ciclónica en agosto es también apoyada por el corte transversal del crucero 5708 (figura 12b).

En los cortes transversales se observa un domo de agua densa en el centro de la cuenca (figuras 12a,12c, 12g y 12i), semejante al del mes de junio (figuras 10a y 10c). Además, existe agua ligeramente menos densa en la costa de Sonora que sobre Baja California (~ $\Delta \sigma = 0.05$) (figuras 12a, 12c, 12e y 12g).



Figura 11. Altura dinámica a 10m relativa a 70m y su campo de velocidades geostróficas asociado. Se muestra la isóbata de los 70m. a) y b) 9008, c) y d) 7109, e) y f) 8609, y g) y h) 9509.









Distancia (km)

Campo de densidad (kg/m^3) y de velocidades geostróficas (m/s) de los Figura 12. cortes transversales para a) y b) 9008, c) y d) 7109 corte más al norte, e) y f) 7109 corte más al sur, g) y h) 8609 corte más al norte, I) y j) 8609 corte más al sur. Los contornos de líneas contínuas representan agua que entra a la página, y los contornos de líneas discontínuas agua que sale de la página. La posición de los transectos se observan en las figuras 5m, 5o y 5p.







Fabla III.	Rapidez	promedio	у	máximo	de	las
	velocidades geostróficas a 10m relativo a					
	70m para	cada cruce	ro.			

Crucero	Rapidez	Máximo					
12	Promedio (m/s)	(m/s)					
	PRIMAVERA						
8504	0.01	0.05					
8405	0.03	0.28					
8206	0.04	0.15					
80	VERANO						
9008	0.10	0.44					
7109	0.12	0.72					
8609	0.12	0.46					
9509	0.11	0.51					
*	OTOÑO						
7410	0.04	0.13					
8110	0.02	0.24					
7911	0.06	0.22					
8411	0.03	0.17					
8612	0.03	0.16					
INVIERNO							
7702	0.02	0.04					
7303	0.02	0.08					
8403	0.02	0.14					
8803	0.01	0.05					

IV.3 Otoño

El patrón de un giro ciclónico en la anterior estación del año, cambia a uno anticiclónico durante el otoño, aunque con magnitudes de velocidad de hasta un orden de magnitud menor a las presentadas durante el verano (ver tabla III). Aún cuando se tienen pocos lances en el crucero correspondiente al mes de octubre (7410), los cálculos sugieren un giro anticiclónico sobre Cuenca Wagner (figuras 13a y 13b). Sin embargo, esta circulación con forma de un giro anticiclónico, se observa más claramente en los meses de noviembre y diciembre, pero con el giro centrado sobre Cuenca Delfín (figuras 13c-13h), probablemente por los pocos lances en 7410. En el crucero 8612 se observa lo que parece ser un pequeño giro centrado sobre la porción sureste de la RNGC (figuras 13g y 13h).

Los cortes transversales también muestran una circulación anticiclónica (figuras 14b, 14d y 14h), aunque la figura 14f muestra un patrón un poco más complicado. El campo de densidad ha perdido el domo observado durante el verano en las isopicnas, ahora tiende a mostrar una depresión en las isopicnas aproximadamente en el centro de la cuenca. Existe agua más densa sobre la costa de Sonora que sobre la de Baja California ($\sim\Delta\sigma = 0.05$), el caso contrario a verano (figuras 14a, 14c, 14e y 14g).



Figura 13. Altura dinámica a 10m relativa a 70m y su campo de velocidades asociado, para a) y b) 7410, c) y d) 7911, e) y f) 8411, y g) y h) 8612. Se muestra la isóbata de los 70m.













Figura 14. El campo de densidad (kg/m^3) y de velocidades geostróficas (m/s) de los cortes transversales para a) y b) 7410, c) y d) 8411, e) y f) 8612 corte más al norte, y g) y h) 8612 corte más al sur. Los contornos de líneas contínuas representan agua que entra a la página, y los contornos de líneas discontínuas agua que sale de la página. Las posiciones de estos transectos se observan en las figuras 5r, 5t y 5u.





IV.4 Invierno

El crucero de febrero de 1977 muestra un giro anticiclónico cuyo centro se encuentra en la posición sureste de la RNGC con dimensiones menores al observado en el centro de la región norte durante otoño (figuras 15a y15b).

En los cruceros correspondientes a marzo, se presentan situaciones distintas entre ellos. En el crucero 8803, se tienen pocos datos sobre Cuenca Delfín, pero se observa la presencia de un giro débilmente anticiclónico (~ 0.009 m/s ver tabla III) aproximadamente al norte de Cuenca Delfín (figuras 15c y 15d). Este giro es más claro en las alturas dinámicas, cuyas isolíneas reflejan un domo; hay que observar que las mínimas velocidades son encontradas en este crucero (ver tabla III). En cruceros para este mismo mes en años post-Niños (7303 y 8403), el patrón se presenta distinto. En el caso de 7303, se presenta un giro débilmente ciclónico (~0.02 m/s) en esta misma zona (figura 15e y 15f). Pero estas características no se repiten en el 8403, donde no se observa patrón alguno de circulación, excepto por un pequeño giro anticiclónico al sureste de la RNGC (figuras 15g y 15h), casi en la misma posición que el giro de febrero (figuras 15a y 15b).

No se observa patrón de circulación en las secciones transversales al golfo, y las isopicnas se mantienen casi horizontales en 3903 y 8403 (figura 16); en estos campos de densidad se observa además que la isopicna de σ t=26 se mantiene aproximadamente a 50m de profundidad y arriba de ésta se encuentra una capa superficial homogénea.



Figura 15. Altura dinámica a 10m relativa a 70m y su campo de velocidades geostróficas asociado. Se muestra la isóbata de los 70m. a) y b) 7702, c) y d) 8803, y años post-Niños: e) y f) 7303, y g) y h) 8403.





40

-112

-112



Figura 16. Campo de densidad (kg / m^3) y de velocidades geostróficas (m/s) de los cortes transversales para: a) y b) 3903, y c) y d) 8403. Los contornos de líneas contínuas representan agua que entra a la página, y los contornos de líneas discontínuas agua que sale de la página. La posición de los transectos se observa en las figuras 5b y 5d.

V DISCUSION

En el presente capítulo se discuten la estacionalidad de la circulación encontrada, la influencia de eventos El-Niño durante invierno y un posible modelo conceptual de la circulación en la RNGC, en base a los resultados encontrados en este trabajo y recientes modelaciones numéricas, así como las nuevas teorías acerca de los mecanismos que pueden conducir a la circulación observada. Además, se discuten las limitaciones de este trabajo dado el método utilizado.

V.1 Estacionalidad de la Circulación en la RNGC

Aunque la construcción del ciclo anual de la circulación en la RNGC está basada en datos de diferentes años, es indudable que tiene una señal estacional, la cual es más clara y fuerte durante el verano que durante el invierno. Así, la circulación de la RNGC se añade a la lista de procesos estacionales del Golfo de California. Esta estacionalidad en la circulación de la RNGC ya había sido sugerida por Bray(1988a) a través de un análisis de funciones empíricas ortogonales sobre secciones transversales al golfo, pero fueron pocos los cruceros utilizados. Por otro lado la estacionalidad fue también observada sobre el transporte en la capa superficial en una sección al sur de la RNGC, que une a Guaymas-Santa Rosalía (Marinone y Ripa, 1988). Es de esperarse que la circulación tenga una señal estacional debido que existen forzantes sobre la RNGC que son de carácter estacional (flujos de calor, viento) (Lavín y Organista, 1988; Badan *et al.*, 1991). El mes de máxima ganancia de calor (junio), coincide con la aparición del giro ciclónico y el mes de máxima

pérdida de calor (noviembre) coincide con la aparición del giro anticiclónico (Lavín y Organista, 1988), lo que puede indicar que el carácter estacional de la circulación termohalina observada, está estrechamente relacionado con los flujos de calor en esa región. Pero por otro lado, está la participación de los otros forzantes. Los modelos numéricos sugieren que la circulación en la RNGC responde estacionalmente a forzamientos como el viento, forzamientos baroclínicos y barotrópicos de la marea y calentamiento en superficie (Beier, 1996; Argote *et al.*, 1996). Esto, aunado a que, en escalas de tiempo estacional, el golfo se encuentra en fase con sus forzantes (Ripa, 1990), hace difícil determinar la contribución que cada forzante tiene sobre la circulación estacional observada, así como el discernir cual de los agentes forzantes es el responsable principal de la variabilidad estacional observada en la circulación. Esta dificultad en conocer el agente forzante responsable de la variabilidad estacional existe también en los flujos advectivos y superficiales de calor, y en la profundidad de la capa mezclada (Castro *et al.*, 1994; Martínez-Sepúlveda, 1994).

V.2 Hacia un modelo conceptual de circulación en la RNGC V.2.1 Verano

La circulación encontrada durante el verano es consistente con la que sugiere Bray (1988a), y a la obtenida mediante modelación numérica (Beier, 1996; Argote, *et al.*, 1996) y a diferencia de invierno, esta señal es fuerte y clara, lo cual se discutirá más adelante.

En esta estación del año los vientos son del sureste (Roden y Emilisson, 1979; Badan *et al.*, 1991), por lo tanto es de esperarse que la inclinación de las isopicnas sea hacia abajo en la costa de Sonora; este balance producido por la inclinación de las isopicnas también favorece la circulación observada. Aún cuando la participación del viento es a favor del patrón de circulación observado (de acuerdo con los modelos numéricos de Beier, 1995 y Argote *et al.* 1996) como también por el balance geostrófico producido por la inclinación de las isopicnas, se espera que la influencia del viento en verano sea menor que en invierno, ya que los vientos son de menor magnitud. Sin embargo, las mayores magnitudes de la velocidad geostrófica son encontradas en esta estación (ver tabla III), ya que los gradientes de densidad son los más fuertes del año, e indican una circulación principalmente baroclínica, que puede ser la combinación de un viento débil y una fuerte estratificación.

La observación de esta fuerte baroclinicidad se debe a la presencia de un domo de agua densa en el centro de la cuenca, como ya había sido observado por Bray (1988a) en la RNGC y en mares similares como el Mar de Irlanda (Lavín, 1984; Hill, 1993; Hill *et al.*, 1994). Durante el verano, la profundidad de la capa mezclada es mínima en la RNGC (Martínez-Sepúlveda, 1994), debido a la fuerte estratificación de la columna de agua, pero en las plataformas someras la columna se encuentra completamente mezclada por las fuertes corrientes de marea. En la zona frontal las isopicnas están inclinadas hacia el fondo formando un domo que atrapa el agua más densa en el fondo de la cuenca (Lavín, 1984). Los gradientes de densidad más fuertes del año ocurren en verano, por lo que es en esta estación cuando el giro es más fuerte como lo muestran las magnitudes de la velocidad (ver tabla III).

Los gradientes de densidad entre las regiones someras más calientes y otras relativamente más profundas en la RNGC, es consecuencia de la acción homogeneizante de la mezcla vertical inducida por corrientes de marea en las plataformas someras, generando frentes (Argote *et al.*, 1985; Durazo, 1989; Argote *et al.*, 1995). Por lo tanto, la marea es un mecanismo importante en la circulación de la RNGC, aún cuando su participación no sea a través de corrientes inducidas por ésta, ya que las corrientes residuales producidas por la marea son un orden de magnitud menor a las generadas por el viento y por los gradientes de densidad (Argote *et al.*, 1996).

Recientemente se ha sugerido como forzante una onda baroclínica de Kelvin de período anual forzada en la boca del golfo (Ripa, 1996), y modelos numéricos demuestran que este mecanismo también puede generar una circulación ciclónica para verano (Beier, 1996). Sin embargo, resulta difícil comprobar esta teoría por medio de la hidrografía. Es posible que la circulación observada sea debida a una combinación de todos los forzantes sobre la RNGC.

V.2.2 Invierno

A diferencia de lo encontrado por Bray (1988a y 1988b) y en los modelos numéricos (Beier, 1996; Argote *et al.*, 1996), los resultados mostrados en este trabajo indican que la circulación baroclínica durante el invierno no presenta un patrón claro de circulación anticiclónica.

Durante el invierno se observó un gradiente débil entre las aguas siempre mezcladas de la plataforma somera y el resto de la región. Esto es de esperarse por la forma diferencial en que pierden calor las aguas someras y las más profundas. Por consiguiente ocurre una rápida profundización de la capa mezclada debido a los fuertes vientos (Martínez-Sepúlveda, 1994), y la fuerte homogenización de la columna de agua disminuyendo o desapareciendo los gradientes de densidad que conducen a la circulación geostrófica. Esto sugiere que las condiciones en los primeros 70-100m de profundidad son principalmente barotrópicas.

El hecho de que el crucero de febrero de 1977 (figura 15b) muestre solamente un giro centrado al sureste de la RNGC, con dimensiones menores al observado en el centro de la región, puede deberse a que la profundidad de la capa mezclada ha alcanzado su máximo en este mes sobre Cuenca Delfín (Martínez-Sepúlveda, 1994), lo que podría explicar la ausencia de giro sobre esta región.

La existencia de diferencias de densidad entre la costa de Baja California y la de Sonora, puede deberse al efecto del viento, que al soplar del noroeste inclina ligeramente hacia abajo las isopicnas en la costa de Baja California, y produce surgencia de agua más densa en las costas de Sonora. Esta inclinación de las isopicnas favorece la circulación anticiclónica, pero el gradiente entre ambas costas no es suficientemente fuerte para reflejarse en las velocidades geostróficas. El hecho de que los vientos sean más intensos en invierno que durante verano (Roden y Emilsson, 1979; Badan *et al.*, 1991) y la ausencia de fuertes gradientes de densidad, podría apoyar la sugerencia de Argote *et al.* (1996) de que la circulación en invierno es en parte barotrópica e inducida por el viento. Por otro lado, existe la posibilidad que la circulación sea además debida al forzamiento en la boca del golfo por una onda baroclínica de Kelvin (Beier, 1996). Sin embargo, hacen falta observaciones hidrográficas y mediciones directas de corrientes que cubran la mayor parte de la RNGC durante invierno, y mejorar las modelaciones numéricas para aclarar satisfactoriamente esta hipótesis.

V.2.3 Estaciones de transición: primavera y otoño

Las estaciones de transición sobre la RNGC están caracterizadas por cambios estacionales de los agentes forzantes. La forma en que la circulación responde a estos cambios es diferente en cada estación, como se discutirá a continuación.

La ausencia de un patrón claro de circulación al inicio de la primavera, puede deberse a que las condiciones que prevalecen son de relajación, después del fuerte forzamiento de invierno, como lo indican la pérdida de calor por evaporación, vientos intensos y el forzamiento debido a la marea, que provoca mezcla intensa en las plataformas someras (Roden y Emilsson, 1979; Badan *et al.*, 1991; Lavín y Organista, 1988; Durazo,

1989; Argote *et al.*, 1995). Al iniciar la primavera empieza un calentamiento progresivo, tendiendo hacia la homogenización de la temperatura del agua entre la plataforma somera, anteriormente más fría, y el resto del área; pero las zonas someras son calentadas más rápidamente que las profundas, de ahí que exista menor densidad sobre éstas que en el centro de la cuenca. El proceso de calentamiento se acelera en mayo (Castro *et al.* 1994), llegando a una máxima ganancia de calor en junio (Lavín y Organista, 1988), y la profundidad de la capa mezclada es mínima (Martínez-Sepúlveda, 1994), coincidiendo con la aparición de un giro ciclónico, que al parecer se encuentra en formación.

La transición de verano a otoño es caracterizada por una disminución notable de la radiación solar sobre la RNGC y una pérdida de calor por evaporación (Lavín y Organista, 1988); esto, aunado a la mezcla por marea, por convección y por mezcla debida al viento, hace de la plataforma somera la zona más fría, ya que pierde calor más rápidamente que el agua profunda, cambiando de sentido los gradientes de densidad y por lo tanto el patrón de circulación de un giro ciclónico a uno anticiclónico centrado sobre Cuenca Delfín. Pero, al contrario del giro ciclónico, el anticiclónico es al parecer producido por una depresión de las isopicnas, aproximadamente en el centro de la cuenca, que producen un domo en las isolíneas de altura dinámica. Este cambio abrupto de patrón de circulación parece tener lugar en octubre, ya que el agua ha comenzado a enfriarse no obstante que el calor ganado por la superficie es todavía positivo (Castro *et al.*, 1994). Por lo tanto, el período en el cual se produce el cambio del giro es corto, tal vez debido a la rápida pérdida de

calor principalmente en las plataformas someras (Durazo, 1989; Castro *et al.*, 1994) y al rápido crecimiento de la capa mezclada superficial (Martínez-Sepúlveda, 1994).

Un esquema "caricaturizado" del modelo conceptual de la circulación para la RNGC durante verano e invierno se presenta en la figura 17. En este modelo se sugiere que las plataformas someras se encuentran en mezcla vertical constante debido a las corrientes por marea, formando un frente durante el verano, que separa aguas estratificadas de mezcladas (Argote et al., 1985; Durazo, 1989; Argote et al., 1995), y se establece un domo de agua más densa en el fondo de la cuenca, como ocurre en el Mar de Irlanda (Lavín, 1984; Hill et al., 1994), conduciendo a una circulación ciclónica. La participación del viento según los modelos numéricos (Beier, 1996; Argote, et al., 1996) y la inclinación de las isopicnas por surgencias costeras también favorecen la circulación observada (ciclónica en verano, anticiclónica en invierno). El comportamiento estacional de los vientos, y la pérdida y ganancia de calor a través de la superficie es reflejada en los campos de densidad, y un indicador de ello es el cambio estacional de la capa mezclada (Martínez-Sepúlveda, 1994). Durante el invierno la forma diferencial en que pierden calor las aguas someras y las más profundas hace que existan gradientes débiles de densidad, esto aunado a que la profundidad de la capa mezclada llega a su máximo en esta estación del año debido a los fuertes vientos (Martínez-Sepúlveda, 1994), hace que la RNGC presente condiciones barotrópicas en los primeros 70-100m de profundidad. En el verano, la profundización de la capa mezclada es de ~ 25m.

Por otra parte, la respuesta de la circulación por el forzamiento recibido en la boca del golfo, como una onda baroclínica de Kelvin, es también estacional y está en fase con los otros forzantes (Beier, 1996), por lo que el forzamiento baroclínico por la onda de Kelvin también es incluído en este modelo conceptual.





a) Verano

Figura 17. Modelo conceptual de circulación sugerido. a) verano y b) invierno.





SIMBOLOGIA





22

Perdida de calor por Evaporacion



Circulacion

Mezcla por marea





b) Invierno

Figura 17. (Continuación)

V.3 Eventos El-Niño y la circulación en la RNGC

Los eventos El-Niño sí parecen afectar la circulación en esta región durante el invierno, cambiando las condiciones esperadas (circulación débil anticiclónica o completa ausencia de ésta), por una débilmente ciclónica como en el crucero 7303. Pero este patrón no es una norma, ya que estas características no se repiten para el 8403, donde no se observa patrón alguno de circulación. No todos los eventos El-Niño se manifiestan de igual manera sobre la región norte, como también lo observan Martínez-Sepúlveda (1994) en la profundidad de la capa mezclada y Reyes y Lavín (1996) para los flujos de calor. Torres-Orozco (1993) menciona que no se reportan condiciones El-Niño en marzo de 1984 en la parte norte, por lo que no se espera mezcla intensa como ocurrió con 7303, cuando según Martínez-Sepúlveda (1994) ocurrió la máxima profundización de la capa mezclada (130m). Sin embargo, la ausencia del giro anticiclónico al norte de Cuenca Delfín para 8403, puede deberse al evento El-Niño 1982-1983, el cual fue especialmente fuerte, pues modificó las condiciones meses antes de marzo de 1984, y el equilibrio o ajuste natural del golfo posiblemente apenas se iniciaba en este año. Aunque el evento El-Niño afecta la circulación geostrófica durante el invierno, como también se ha observado en la profundización de la capa mezclada (Martínez-Sepúlveda, 1994), el proceso de formación de masa de agua en la RNGC, no es afectado por éste (Lavín et al., 1995), lo que significa que el evento El-Niño no afecta la distribución de densidad en regiones someras (menores a 30m); en éstas, la mezcla por marea es un factor determinante.

V.4 El método geostrófico y mediciones directas sobre la RNGC

Dado que los procesos de enfriamiento y calentamiento en esta región son considerables, los procesos de circulación termohalina y de frentes son procesos dinámicos importantes, como también se ha observado en otras regiones como el Mar de Irlanda (Lavín, 1984; Hill *et al.*, 1994) y el Mar Adriático (Hendershott y Rizzoli, 1976). Por lo tanto, la aplicación de la geostrofía en esta región es una herramienta útil para conocer la circulación en una primera aproximación. Como se observa en la figura 18, los resultados de los cálculos geostróficos de la campaña 9509 son apoyados por observaciones de corrientes mediante boyas (Lavín, *et al.*, 1996). Por lo tanto, no obstante que la RNGC mantiene profundidades en su mayoría menores a 200m, cualitativamente la circulación sobre la RNGC puede ser explicada mediante geostrofía, mientras se mantengan fuertes gradientes de densidad, principalmente durante verano y otoño. En ausencia de fuertes gradientes de densidad, como parece ocurrir en invierno, el método goestrófico no es suficiente para explicar la circulación. Las observaciones de Argote *et al.* (1996) y Lavín *et al.* (1996) indican que la circulación en invierno es en parte barotrópica e inducida por el viento.

El hecho de que los patrones de circulación obtenidos con un nivel de referencia de 70m se conserven a 100m (figura 6), indica que el nivel de referencia de 70m es suficiente para explicar la circulación superficial en la RNGC. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la profundización de la capa mezclada puede reducir el valor de la magnitud de la velocidad, (por ejemplo: tomar 100m como nivel de referencia incrementó en una razón de 2.15 el valor de la velocidad obtenido con 70m en el crucero 8612).



- Figura 18. Velocidad geostrófica a 10m relativa a 100m para el crucero de septiembre de 1995, y b) velocidades obtenidas mediante seguimiento de boyas ARGOS, durante septiembre-octubre de 1995, (figura facilitada por Lavín *et al.*, 1996).
- b)

a)

Aún cuando se han aclarado algunas dudas en el conocimiento de la circulación, la explicación de este tipo de circulación para la RNGC no es de ninguna manera sencilla, debido a la variabilidad propia de esta región, por el forzamiento atmosférico local, presión atmosférica, calentamiento y esfuerzo del viento, aunado a la mezcla vertical de la columna de agua en las regiones del alto golfo ocasionada por la marea (Organista, 1987; Marinone, 1988; Durazo, 1989; Argote *et al.*, 1995). Por lo tanto, quedan abiertas las siguientes interrogantes: ¿cuál o cuáles son los principales agentes forzantes en la circulación estacional observada?, ¿cuál es la participación relativa de cada agente forzante sobre la circulación?, ¿por qué en invierno la circulación geostrófica no presenta una señal fuerte, si se encuentra bajo un fuerte forzamiento? ¿existe la posibilidad que la circulación sea en parte debida al forzamiento en la boca del golfo como una onda baroclínica de Kelvin (Beier, 1996)?

VI CONCLUSIONES

1. Se observa una circulación estacional sobre la Región Norte del Golfo de California con las siguientes características:

(a) A principios y mitad de primavera no se observa un patrón claro de circulación con forma de giro, pero a finales de esta estación se observa un giro ciclónico (con magnitud promedio de 0.01-0.04 m/s a 10m relativa a 70m).

(b) Durante el verano, la señal estacional es fuerte, presentándose un giro ciclónico que cubre la RNGC y ubicado en el centro de ésta (con magnitud promedio de ~0.11 m/s a 10m relativa a 70m).

(c) En otoño, se observa un giro anticiclónico sobre Cuenca Delfín con magnitudes de velocidad menores a las presentadas en verano (0.03 m/s vs. 0.11 m/s, para otoño y verano respectivamente, velocidades a 10m relativas a 70m).

(d) En invierno, la señal de un giro anticiclónico es débil y no es clara en las velocidades geostróficas, debido a las condiciones barotrópicas que prevalecen en la RNGC en los primeros 70-100m de profundidad.

2. El tiempo de duración del giro ciclónico es de aproximadamente 4 meses (junioseptiembre), con una transición rápida, del orden de un mes, a un giro anticiclónico (octubre) y que probablemente dure hasta finalizar el invierno (marzo).

3. Los eventos El-Niño afectan el patrón de circulación en invierno en la RNGC, cambiando la distribución de la densidad en las regiones fuera de las plataformas someras, aunque no existe una norma en la forma en que afectan a ésta.

LITERATURA CITADA

- Argote, M.L., A. Amador y C. Morales. 1985. Variación estacional de la estratificación en la región norte del Golfo de California. Memorias de la Reunión Anual 1985, Unión Geofísica Mexicana, 334-338.
- Argote, M.L., A. Amador, M.F. Lavín y J.R. Hunter. 1995. Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. J. Geophys. Res. **100** (C8): 16103-16118.
- Argote, M.L., M.F. Lavín y A. Amador. 1996. Barotropic residual circulation in the Gulf of California due to the M2 tide and wind stress. Sometida a J. Geophys. Res.
- Badan A., C. Dorman, M. Merrifield, y C. Winant. 1991. The lower atmosphere over the Gulf of California. J. Geosphys. Res. 96(C9): 16877-16896.
- Beier, E. 1996. A Numerical Investigation of the Annual Variability in the Gulf of California. Sometida a J. Phys. Ocean.
- Bray, N.A. 1988a. Thermohaline circulation in the Gulf of California. J. Geophys. Res. **93**: 4993-5020.
- Bray, N.A. 1988b. Water mass formation in the Gulf of California. J. Geophys. Res. 93: 9223-9240.
- Castro, R., M.F. Lavín, y P. Ripa. 1994. Seasonal heat balance in the Gulf of California. J. Geophys. Res. **99**: 3249-3261.
- Durazo, R. 1989. Frentes térmicos de verano en el Alto Golfo de California. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (C.I.C.E.S.E.). Tesis de Maestría. Ensenada, México. 66 pp.
- Emery, K.O. y G.T. Csanady. 1973. Surface Circulation of Lakes and Nearly Land-Locked Seas. Proc. Nat. Acad. Sci. **70**(1): 93-97.

Gill, A.E. 1982. Atmosphere-Ocean Dynamics. Academic Press. New York. 662pp.

Hendershott, M.C. y P. Rizzoli. 1976. The winter circulation of the Adriatic Sea. Deep Sea Res. 23: 353-370.

Hill, A.E. 1993. Seasonal gyres in shelf seas. Ann. Geophysicae. 11: 1130-1137.

- Hill, A.E., R. Durazo y D.A.. Smeed. 1994. Observations of a cyclonic gyre in the western Irish Sea. Continental Shelf Research. 14(5): 479-490.
- Kundu, P.K. 1976. Ekman Veering Observed near the Ocean Bottom. J. Phys. Ocean. 6: 238-242.
- Lavín M.F. 1984. The seasonal cycle and variability of stratification in the Western Irish Sea. Tesis de Doctorado, University College of North Wales, England, 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. J. Geophys. Res. **100**(C5): 8587-8605.
- Lavín, M.F. y S. Organista. 1988. Surface heat flux in the northern Gulf of California. J. Geophys. Res. **93**: 14,033-14,038.
- Lavín, M.F. *et al.* 1996. Lagrangian observations of the circulation in the northern Gulf of California. Manuscrito en preparación.

- Lepley, L.K., S.P. Vonder Haar, J.R. Hendrikson y G. Calderón-Riveroll. 1978. Circulation in the nortern Gulf of California from orbital photographs and ship investigations. Ciencias Marinas. 2: 86-93.
- Lewis, E.L. y R.G. Perkin. 1981. The Practical Salinity Scale 1978: conversion of existing data. Deep Sea Res. **28A**(4): 307-328.
- Marinone, S.G. 1988. Una nota sobre la variabilidad no estacional de la región central del Golfo de California. Ciencias Marinas. 14(4): 117-134.
- Marinone, S.G. y P. Ripa. 1988. Geostrophic flow in the Guaymas Basin, central Gulf of California. Continental Shelf Research. 8(2): 159-166.
- Martínez-Sepúlveda, M.. 1994. Descripción de la capa mezclada superficial en el Golfo de California. Universidad Autónoma de Baja California (U.A.B.C.). Tesis de Licenciatura. 48 pp.
- Organista, S. 1987. Flujos de Calor en el Alto Golfo de California. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (C.I.C.E.S.E.). Tesis de Maestría. Ensenada, México. 142 pp.
- Paden, C.A., M.R. Abbott, y C.D. Winant. 1991. Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California, 1, Sea surface temperature variability. J. Geophys. Res. 96: 18,337-18,359.
- Paden, C.A., C.D. Winant, y M.R. Abbott. 1993. Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California, 2, Surface heat flux, J. Geophys. Res. 98: 20,091-20,103.

- Pond, S. y G.L. Pickard. 1978. Introductory Dynamic Oceanography. Pergamon Press. New York. 241 pp.
- Reyes, A.C. y M.F. Lavín. 1996. Auntumn-Winter meteorology and surface heat losses in the Gulf of California. Sometido a Atmósfera.
- Ripa, P. 1990. Seasonal circulation in the Gulf of California. Ann. Geophysicae. 8(7-8): 559-564.
- Ripa, P. 1996. Towards a physical explanation of the seasonal dynamics and thermodynamics of the Gulf of California. Sometido a J. Phys. Ocean.
- Roden, G.I., y I. Emilsson. 1979. Contribution to the Gulf of California Symposium in conmemoration of the 50th. aniversary of the National University of Mexico, UNAM. Contribution 0000 from the Department of Oceanography, University of Washington, Seatle.
- Roemmich, D. 1983. Optimal Estimation of Hydrographic Station Data and Derived Fields.J. Phys. Ocean. 13: 1544-1549.
- Smedstad, O.M. y J.E. Weber. 1985. Geostrophic currents in shelf areas.Pergamon Journal Lid.
- Sverdrup, H.U. 1941. The Gulf of California: Preliminary discussion of the cruise of the E.W. Scripps in February and March 1939. Proc. Pac. Sci. Congr. 6th, 161-166.

Torres-Orozco, E. 1993. Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (C.I.C.E.S.E.). Tesis de Maestría. Ensenada, México. 80 pp. UNESCO. 1981. Background papers and supporting data on the Practical Salinity Scale

1978. UNESCO technical papers in marine science. No. 37. 144 pp.

UNESCO. 1984. La escala de salinidades prácticas de 1978 y la ecuación internacional de estado del agua del mar de 1980. Documentos técnicos de la Unesco sobre ciencias del mar. No.36. 25 pp.

APENDICE 1

Las Ecuaciones de Viento Térmico.

Partiendo de las ecuaciones geostróficas:

$$f\nu = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x},\tag{1}$$

$$-fu = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y},\tag{2}$$

donde: (u, v) = velocidad en (x,y), respectivamente

f = parámetro de Coriolis, P = Presión, y ρ = densidad.

Si $\rho = \rho_0 + \rho'$, donde ρ_0 es un valor medio de referencia (constante) y ρ' = variaciones de densidad causadas por la estratificación y/o movimientos del fluido.

Aplicando la aproximación de Boussinesq $\rho' \ll \rho_0$

Entonces las ecuaciones (1) y (2) quedan:

$$fv = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x},\tag{3}$$

$$-fu = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y},\tag{4}$$

63

Diferenciando (3) con respecto a z

$$f\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial^2 P}{\partial z \partial x} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial^2}{\partial x} \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right).$$

Usando la ecuación de la hidrostática

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g$$

donde; g = aceleración de la gravedad.

La ecuación (5) queda:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{g}{f\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x},\tag{6}$$

Siguiendo el mismo procedimiento para la ecuación (4);

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{g}{f\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y}.$$
(7)

Las ecuaciones (6) y (7) son conocidas como ecuaciones de viento térmico. A partir de ellas se estima la velocidad geostrófica resolviendo la integral en la vertical y a lo ancho de dos estaciones hidrográficas, usando la diferencia de anomalías de volumen específico entre ambas, según los algoritmos presentados por Pond y Pickard (1978).

64

(5)

