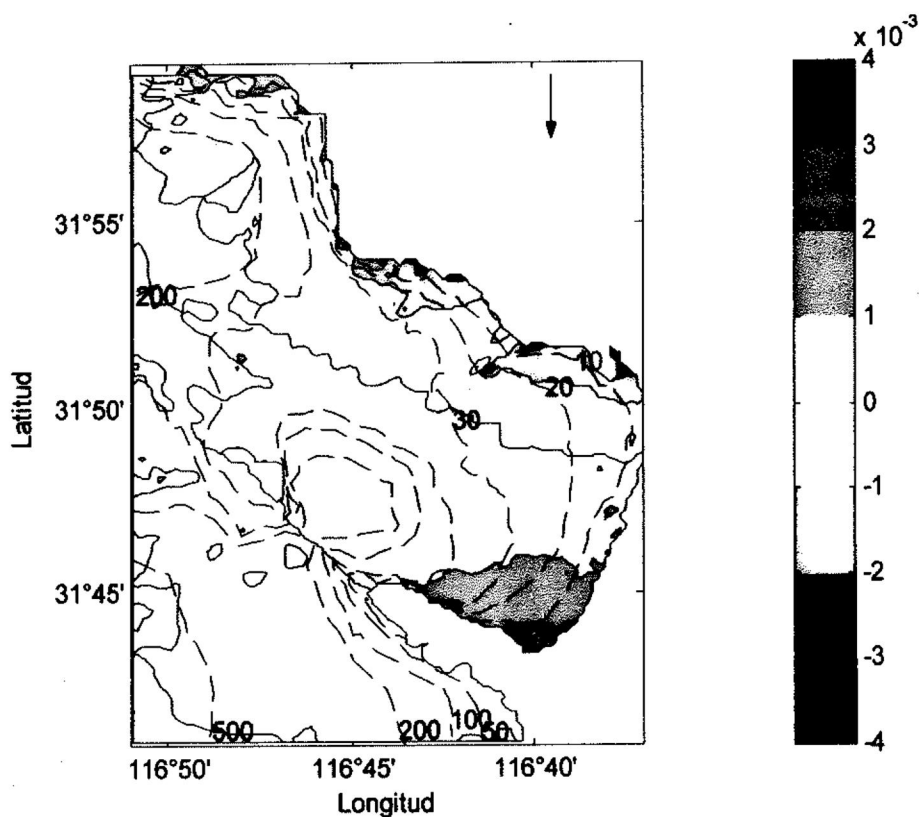




UNIVERSIDAD AUTONOMA
DE
BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

"ANÁLISIS NUMÉRICO Y DESCRIPCIÓN DE LA CIRCULACIÓN BAROTRÓPICA
EN LA BAHÍA DE TODOS SANTOS, B. C."



TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
OCEANOLOGO
PRESENTA

OMAR QUETZALCÓATL GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, JUNIO DE 1999.

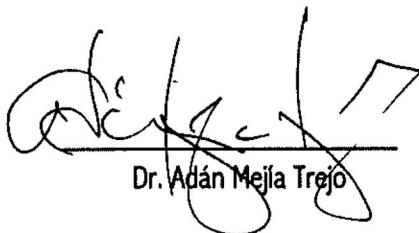
ANÁLISIS NUMÉRICO Y DESCRIPCIÓN DE LA CIRCULACIÓN
BAROTRÓPICA EN LA BAHÍA DE TODOS SANTOS, B.C.

TESIS

QUE PRESENTA:

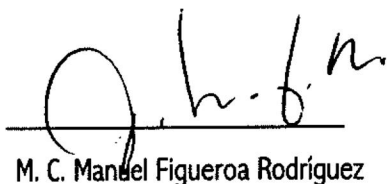
OMAR QUETZALCÓATL GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ

APROBADA POR:



Dr. Adán Mejía Trejo

PRESIDENTE DEL JURADO



M. C. Manuel Figueroa Rodríguez

SINODAL PROPIETARIO



M. C. Rubén Castro Valdés

SINODAL PROPIETARIO

Resumen.

En el presente estudio se simuló la circulación residual en la Bahía de Todos Santos, inducida por viento constante a 5 m/s proveniente de las direcciones predominantes en verano e invierno, además de la condición santana, por medio del modelo numérico oceanográfico de Princeton (POM), que resuelve las ecuaciones de continuidad y momentum integradas en la coordenada vertical. También se realizaron simulaciones con la componente semidiurna de la marea. Se analizaron los campos de elevación del nivel del mar, corrientes residuales y los campos de vorticidad y divergencia. A partir de los campos de velocidades eulerianas residuales, se calcularon trayectorias de arreglos de partículas en distintas zonas del dominio, y se realizaron simulaciones de la dispersión de partículas en zonas de aporte de material al dominio, como el puerto del Sauzal, el arroyo el Gallo, y en la zona sobre el Cañón de Punta Banda. Se discute lo obtenido con datos ya reportados por Alvarez et al., (1988), Argote et al., (1991), y García et al., (1995).

DEDICATORIA

A mis padres Jesús y Carmen, lo logramos

A Eduardo mi hermano, a quien aprecio, estimo y que es mi gran amigo.

A mi abuela Esperanza, porque quisiera pasar mas tiempo contigo.

Y a la memoria de mi abuela Elvira que hasta el ultimo momento me enseñaste que lo más importante es estar con los tuyos, descansa en paz abue...

Por todos estrechado alzó la copa
frente a la alegre tropa
desbordante de risa y de contento.
Los inundo en la luz de una mirada,
sacudió su melena alborotada
y dijo así, con inspirado acento:

Brindo por la mujer, mas no por esa
en la que halláis consuelo en la tristeza
rescodo del placer ¡desventurados!;
no por esa que os brinda sus hechizos,
cuando besáis sus rizos
artificialmente perfumados.

Yo no brindo por ella, compañeros,
siento por esta vez no complaceros,
brindo por la mujer pero por una,
por la que me brindo sus embelesos
y me envolvió en sus besos;
por la mujer que me arrullo en la cuna.

por la mujer que me enseñó de niño
lo que vale el cariño
exquisito, profundo y verdadero,
por la mujer que me arrullo en sus
brazos
y que me dio en pedazos,
uno por uno, el corazón entero.
¡Por mí madre! bohemios, por la anciana

que piensa en el mañana
como en algo muy dulce y muy deseado
porque sueña tal vez que mi destino
me señala el camino
por el que pronto volveré a su lado.

por la anciana adorada y bendecida,
por la que con su sangre me dio vida
y ternura, y cariño;
por la que fue la luz del alma mía
y lloro de alegría, sintiendo mi cabeza
en su corpiño

Por eso brindo yo
dejad que llore, y en lagrimas desflöre
esta pena letal que me asesina,
dejad que brinde por mi madre ausente,
por la que llora y siente
que mi ausencia es un fuego que calcina.

Por la anciana infeliz que gime y llora
y que del cielo implora,
que vuelva yo muy pronto para estar con
ella
por mi Madre, bohemios,
que es dulzura vertida en mi amargura
y en esta noche de mi vida,
estrella...

(Fragmento. Aguirre y Fierro)

AGRADECIMIENTOS

A mi director de Tesis, Dr. Adán Mejía Trejo, por su apoyo y su gran ayuda en todo momento.

A los miembros del comité de Tesis M.C. Manuel Figueroa y M.C. Rubén Castro, por su importante ayuda y consejos, sin los cuales no habría sido posible la realización de esta tesis.

A Marco Julio Ulloa y Cuauhtemoc Nava, por facilitarnos la batimetría de la BTS, a Eduardo Gil, por prestarnos los datos de viento, al grupo de estudiantes de Adán, a M.I. Sergio Jiménez, y M.C. Antonio Sánchez Devora, por sus consejos, y aportaciones a la realización de este trabajo.

A los investigadores y técnicos del departamento de Oceanografía Física del Instituto de Investigaciones Oceanológicas, y maestros de la Facultad de Ciencias Marinas, por su ayuda y sugerencias en mi formación y para la mejor realización de la presente tesis.

A mis padres, que siempre me han apoyado y han estado conmigo aun en momentos difíciles, y por todo lo que han hecho por mí en mi vida, jamás terminaría de agradecerles; A mi hermano, que siempre ha sido un gran hermano, que lo aprecio, y que sé siempre estaremos uno para con el otro.

A mi familia que siempre ha sido parte importante en mi vida: a mi tío Mario y su familia, que siempre nos han ayudado, a mi tía Almita y su familia, gracias por todo, A toda mi familia en general, tía Chela, tío Jesús; y por ultimo (pero no en importancia) a mis amadisimas primas Ariadna y Janet y a su familia. A mis ahijados Ionatan y Mario.

A mis amigos Alberto (REX), Manrique (loco), Rinah, Camilo, Vanesa, Norma, Juan, Nancy, los Alfredos, Chacon, Katia, Roberto, Pedro, Gerardo, Julio, Dahren, y a Grecia por ayudarme a todo ese tramite burocrático que odio hacer y todos aquellos que se escapan a mi memoria en este momento, pero que no dejan de ser importantes.

A mis amigos de toda la vida Gabriel, Jorge, Charles y Edgar. A la raza de Funda, allá en Saltillo, Felix, Luis, Eduardo, Alejandro, Erick, Alejandro y a todos en general, en especial a Sandra, por haber sido tan importante en mi vida.

Al Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California por facilitarme el equipo de cómputo necesario para desarrollar este trabajo

Al CONACyT por el apoyo económico brindado dentro del proyecto "Estudio Numérico de la dinámica de la circulación en la Bahía de Todos Santos" (clave No. 4344P-T).

A todos los que creyeron en mí, gracias; y a los que no creyeron también, porque cuando dudan de ti te vuelves mas fuerte, y ahora puedo decirles: "lo logre".

Indice

1. INTRODUCCION:	1
1.1. ZONA DE ESTUDIO	2
1.2. ANTECEDENTES.....	5
1.3. OBJETIVO	7
1.4. MÉTODOS	7
1.4.1. MODELO.....	7
1.4.2. CIRCULACIÓN RESIDUAL.....	9
1.4.3. VORTICIDAD	10
1.4.4. DIVERGENCIA	16
1.4.5. TRAYECTORIAS LAGRANGEANAS.....	16
2. RESULTADOS:	18
2.1. VIENTO:.....	18
2.1.1. CONDICIONES DE VERANO:.....	19
2.1.2. CONDICIONES DE INVIERNO	26
2.1.3. CONDICIÓN SANTANA	31
2.2. TRAYECTORIAS LAGRANGEANAS.....	34
2.2.1. VERANO	35
2.2.2. INVIERNO	40
2.2.3. SANTANA.....	43
2.3. MAREA	43

3.	DISCUSIONES.....	45
3.1.	RESIDUALES DE VIENTO.....	45
3.1.1.	CONDICIONES DE VERANO.....	50
3.1.2.	CONDICIONES DE INVIERNO.....	52
3.1.3.	CONDICIÓN SANTANA.....	53
3.2.	TRAYECTORIAS LAGRANGEANAS.....	54
3.3.	RESIDUALES DE MAREA.....	57
4.	CONCLUSIONES.....	59
5.	LECTURA CITADA.....	61

Lista de Figuras

FIG. 1.- ZONA DE ESTUDIO, SE INDICA LA UBICACION DE LOS CORRENTOMETROS.....	3
FIG. 2.- MECANISMOS POSIBLES EN LA GENERACION DE REMOLINOS DE PENINSULA.....	12
FIG. 3. - REMOLINOS RESIDUALES EN UNA ISLA, POR FLUJOS DE MAREA.....	12
FIG. 4. - MECANISMO GENERADOR DE VORTICIDAD DEBIDO AL EFECTO DEL CAMBIO DE LA PROFUNDIDAD SOBRE LA COLUMNA DE AGUA... ..	13
FIG. 5. - GENERACIÓN DE VORTICIDAD POR FRICCIÓN OBLICUA SOBRE UNA BARRA.. ..	14
FIG. 6. - GENERACIÓN DE REMOLINOS EN UNA CUENCA SEMICERRADA.....	15
FIG. 7.- EXPERIMENTO FORZADO CON VIENTO DEL NORTE. ARRIBA, CAMPO DE ELEVACION EN m. ABAJO, CIRCULACION RESIDUAL, EN ($m s^{-1}$).....	20
FIG. 8.- EXPERIMENTO FORZADO CON VIENTO DEL NORTE. ARRIBA, CAMPO DE VORTICIDAD EN (ms^{-1}). ABAJO, CAMPO DE DIVERGENCIA EN (ms^{-1}).....	21
FIG. 9.-EXPERIMENTO FORZADO CON VIENTO DEL NOROESTE. ARRIBA, CONTORNOS DE ELEVACION DEL NIVEL DEL MAR (m). ABAJO, CORRIENTES RESIDUALES ($m s^{-1}$).....	22
FIG. 10.-EXPERIMENTO FORZADO CON VIENTO DEL NOROESTE. ARRIBA, CAMPO DE VORTICIDAD (ms^{-1}). ABAJO CAMPO DE DIVERGENCIA (ms^{-1}).....	23
FIG. 11.-EXPERIMENTO FORZADO CON VIENTO DEL OESTE. ARRIBA, CONTORNOS DE ELEVACION DEL NIVEL DEL MAR (m). ABAJO, CORRIENTES RESIDUALES ($m s^{-1}$).....	24
FIG. 12.- EXPERIMENTO FORZADO CON VIENTO DEL OESTE. ARRIBA, CAMPO DE VORTICIDAD (ms^{-1}). ABAJO, CAMPO DE DIVERGENCIA (ms^{-1}).....	25
FIG. 13.- EXPERIMENTO FORZADO CON VIENTOS DEL SUR. ARRIBA, ELEVACION DEL NIVEL DEL MAR, (m). ABAJO, CORRIENTES RESIDUALES EN ($m s^{-1}$).....	27
FIG. 14.- EXPERIMENTO FORZADO CON VIENTOS DEL SUR. ARRIBA, CAMPO DE VORTICIDAD EN (ms^{-1}). ABAJO, CAMPO DE DIVERGENCIA EN (ms^{-1}).....	28
FIG. 15. - EXPERIMENTO FORZADO CON VIENTOS DEL SUROESTE. ARRIBA, CONTORNOS DE ELEVACION DEL NIVEL DEL MAR (m). ABAJO, CORRIENTES RESIDUALES ($m s^{-1}$).....	29

FIG. 16.- EXPERIMENTO FORZADO CON VIENTO DEL SUROESTE. ARRIBA, CAMPO DE VORTICIDAD EN $(ms)^{-1}$. ABAJO, CAMPO DE DIVERGENCIA EN $(ms)^{-1}$	30
FIG. 17.- EXPERIMENTO FORZADO CON VIENTO DEL ESTE. ARRIBA, CONTORNOS DE ELEVACION DEL NIVEL DEL MAR (m). ABAJO, CORRIENTES RESIDUALES $(m s^{-1})$:	32
FIG. 18.- EXPERIMENTO FORZADO CON VIENTOS DEL ESTE. ARRIBA, CAMPO DE VORTICIDAD $(ms)^{-1}$. ABAJO, CAMPO DE DIVERGENCIA EN $(ms)^{-1}$	33
FIG. 19.- EXPERIMENTO CON LAGRANGIANOS (VIENTO NORTE). ARRIBA, TRAYECTORIAS (VER TABLA II PARA DESCRIPCION). ABAJO, DISPERSION DE CONTAMINANTES EN EL P. DEL SAUZAL, ARROYO EL GALLO, Y BAHIA CENTRAL, EN EL RECUADRO SE MUESTRA EL CAMBIO DEL AREA CON EL TIEMPO.....	37
FIG. 20.- EXPERIMENTO CON LAGRANGIANOS (VIENTO NOROESTE). ARRIBA, TRAYECTORIAS (VER TABLA II PARA DESCRIPCION). ABAJO, DISPERSION DE CONTAMINANTES EN EL P. DEL SAUZAL, ARROYO EL GALLO, Y BAHIA CENTRAL, EN EL RECUADRO SE MUESTRA EL CAMBIO DEL AREA CON EL TIEMPO.....	38
FIG. 21.- EXPERIMENTO CON LAGRANGIANOS (VIENTO OESTE). ARRIBA, TRAYECTORIAS (VER TABLA II PARA DESCRIPCION). ABAJO, DISPERSION DE CONTAMINANTES EN EL P. DEL SAUZAL, ARROYO EL GALLO, Y BAHIA CENTRAL, EN EL RECUADRO SE MUESTRA EL CAMBIO DEL AREA CON EL TIEMPO.....	39
FIG. 22.- EXPERIMENTO CON LAGRANGIANOS (VIENTO SUR). ARRIBA, TRAYECTORIAS (VER TABLA II PARA DESCRIPCION). ABAJO, DISPERSION DE CONTAMINANTES EN EL P. DEL SAUZAL, ARROYO EL GALLO, Y BAHIA CENTRAL, EN EL RECUADRO SE MUESTRA EL CAMBIO DEL AREA CON EL TIEMPO.....	41
FIG. 23.- EXPERIMENTO CON LAGRANGIANOS (VIENTO SUROESTE). ARRIBA, TRAYECTORIAS (VER TABLA II PARA DESCRIPCION). ABAJO, DISPERSION DE CONTAMINANTES EN EL P. DEL SAUZAL, ARROYO EL GALLO, Y BAHIA CENTRAL, EN EL RECUADRO SE MUESTRA EL CAMBIO DEL AREA CON EL TIEMPO.....	42
FIG. 24.- EXPERIMENTO CON LAGRANGIANOS (VIENTO ESTE). ARRIBA, TRAYECTORIAS (VER TABLA II PARA DESCRIPCION). ABAJO, DISPERSION DE CONTAMINANTES EN EL P. DEL SAUZAL, ARROYO EL GALLO, Y BAHIA CENTRAL, EN EL RECUADRO SE MUESTRA EL CAMBIO DEL AREA CON EL TIEMPO.....	44
FIG. 25.- EXPERIMENTO FORZADO CON LA COMPONENTE SEMIDIURNA DE LA MAREA (M_2). ARRIBA, CONTORNOS DE ELEVACION DEL NIVEL DEL MAR (m). ABAJO, CORRIENTES RESIDUALES (ms^{-1})	46
FIG. 26.- EXPERIMENTO FORZADO CON LA COMPONENTE SEMIDIURNA DE LA MAREA (M_2).ARRIBA, CAMPO DE VORTICIDAD $(ms)^{-1}$. ABAJO, CAMPO DE DIVERGENCIA $(ms)^{-1}$	47

Lista de Tablas

TABLA I.- PRINCIPALES COMPONENTES ARMONICAS EN LA BAHIA DE TODOS SANTOS FUENTE DATOS HORARIOS: UNAM.	4
TABLA II.- CARACTERÍSTICAS DE LOS GRUPOS DE TRAZADORES, Y SU UBICACIÓN.	35

1. INTRODUCCION:

En la Bahía de Todos Santos (BTS), como en los mares costeros, el movimiento de las partículas presenta características de movimientos oscilatorios, sin embargo cuando una partícula cualquiera no regresa a su posición de origen después de un ciclo completo, a este desplazamiento se le conoce como flujo residual y es el responsable del transporte del material en suspensión en el agua de mar (i.e. contaminantes, larvas, etc.). Las corrientes residuales pueden ser producidas por el esfuerzo del viento sobre la superficie del mar, o forzadas por gradientes de densidad lateral debido a distribuciones no uniformes de temperatura y salinidad, así como por interacciones no lineales de los flujos periodicos asociados a la marea (Robinson, 1983)

Argote *et al.*, (1991), realizaron simulaciones numéricas de la circulación en la BTS y encontraron que el principal forzamiento en la generación de circulación es el viento quedando la marea en segundo término. En los cuerpos de agua costeros, normalmente la circulación esta dominada por la componente barotrópica, es decir se considera que la energía generada por fricción en el fondo y el viento en la superficie son suficientes para mezclar masa y momentum a través de la columna de agua y de eliminar cualquier estructura vertical (Robinson, 1983). Aunque en la BTS existe estratificación (Cruz-Colin, 1997) la componente barotrópica nos permite observar y estudiar las principales características de su circulación. En el presente estudio se simula la circulación barotrópica de la BTS, usando el modelo de circulación oceánica costera (POM) desarrollado por Blumberg y Mellor (1980). El POM ha sido aplicado anteriormente para simular la circulación costera en Long Island, Nueva York; la circulación general en la región central y sur del Oceano Atlántico; además del Golfo de México. Entre sus características principales

destacan el realismo con que representa fenómenos de mediana escala (1-100 km y 30 días). Más referencias se pueden encontrar en Blumberg et al.,(1993), Blumberg y Mellor (1980) y en la página de internet: <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom>.

1.1. Zona de estudio

La Bahía de Todos Santos (ver Fig. 1), está ubicada en la costa nor-occidental de la Península de Baja California entre los $31^{\circ} 40'$ y $31^{\circ} 55'$ de latitud norte y los $116^{\circ} 36'$ y $116^{\circ} 50'$ de longitud oeste; está limitada al norte por Punta San Miguel (PSM), al este por la ciudad de Ensenada, al sur por Punta Banda (PB), y al oeste por las Islas de Todos Santos (ITS). Tiene una forma rectangular, y un área aproximada de 180 km². Cuenta con dos conexiones a mar abierto, separadas por las ITS, la boca norte (BN) es de 12 km de ancho donde la profundidad máxima es de 40 m aunque en la zona existe un bajo con profundidades menores a 10 m, y la boca sur (BS) de 6 km de ancho, donde se alcanzan profundidades hasta de 300 m en el centro del cañón de Punta Banda.

La bahía es una cuenca somera, donde el 75% de su área presenta profundidad promedio menor a los 50 m y bajos hasta de 6 m, el restante 25 % corresponde al Cañón de Punta Banda (CPB) que se encuentra en la zona sur paralelo a PB. Las isóbatas menores a los 30 m tienden a ser paralelas a la línea de costa, mientras que las mayores a 60 m toman la configuración de un cono o abanico, hasta alcanzar los 350 m ya en la zona mas profunda del Cañón (González Villagran, 1992).

La marea en la zona es mixta semidiurna, es decir, presenta dos pleamares y dos bajamares diarias; y donde el componente armónico más importante es el M2 (Ver tabla 1) que corresponde a la marea semidiurna ($T \cong 12$ hrs) y que participa con una elevación de 48 cm en el nivel del mar (fuente Datos horarios UNAM.).

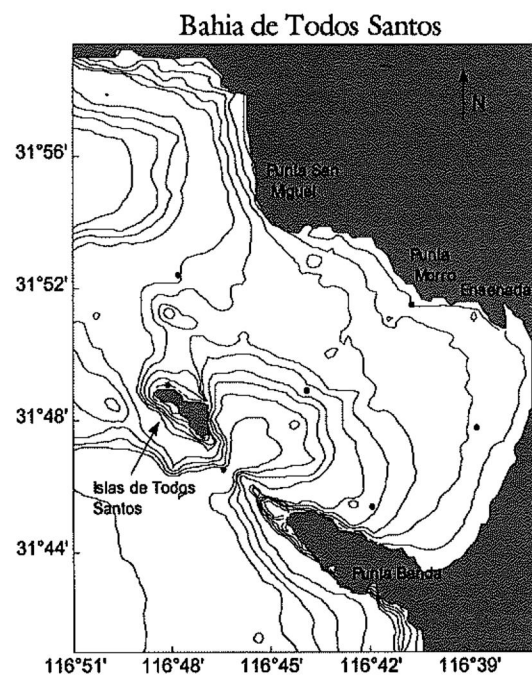


Fig 1 .- Zona de estudio, se indica la ubicación de los correntómetros.

Tabla I.- Principales componentes armónicas en la Bahía de Todos Santos fuente datos horarios: UNAM.

Componente armónica	Periodo	Altura (H) m	fase (g)
M2	12.42	0.487	136.99
S2	12.00	0.207	132.80
N2	12.65	0.116	116.53
K2	11.96	0.060	120.79
K1	23.93	0.322	205.92
O1	25.81	0.207	190.80
P1	24.06	0.1017	202.98

Referente a los vientos, Desde las costas de California, EUA hasta Baja California (30° - 35° N), existe un centro de alta presión durante todo el año, que se intensifica en verano, que favorece un sistema de brisas marinas y terrestres en la costa de Baja California. Alvarez-Sánchez (1977), describe este régimen para BTS analizando datos entre 1954 y 1969, encontrando predominancia de vientos del Noroeste y con menor frecuencia del Oeste y Oeste-Noroeste, con intensidades de 4 m/s, siendo la dirección más variable en invierno que en verano, y en otoño excepcionalmente se presentan vientos intensos del Este, conocidos como "Santana". Pavia-López (1979), encontró una fuerte dependencia de la dirección del viento en el interior de la Bahía con la orientación de la línea de costa, observó una zona de divergencia, en la zona central de la Bahía. Pavia y Reyes (1983) analizando el viento superficial en tres estaciones en la BTS y el viento sinóptico por medio de espectros rotacionales y funciones empíricas ortogonales, encontraron que la brisa marina y terrestre se encuentra medianamente desarrollada en primavera y otoño, mientras que en invierno existe una circulación de brisas anómala y en verano es débil.

1.2. Antecedentes

En la BTS, tienen lugar una gran variedad de actividades (i.e. acuicultura, recreación, pesca, descarga de aguas residuales domesticas e industriales, etc.), por lo que es de gran importancia entender la dinámica de su circulación. La BTS es una de las más estudiadas de México, aun así los estudios que se refieren a la hidrodinámica son escasos y mayormente observacionales (Argote-Espinoza *et al.*, 1991)

Álvarez Sánchez (1971) realizó la primer descripción de la circulación en la región norte de la BTS, para ello utilizó datos tomados con crucetas de deriva y correntómetros, encontrando velocidades de entre 6 y 8 cm/s en los primeros dos metros de la columna de agua, y una alta correlación con la dirección del viento, aunque no la cuantifica, además de corrientes residuales de 2 cm/seg. Argote-Espinoza (1975) describió la circulación superficial en la BTS a partir de distribuciones horizontales de temperatura y salinidad, y encontró que para vientos provenientes del norte existe una circulación paralela a la costa, desde PSM hacia el Puerto de Ensenada, y desde PB hacia el EPB. Durazo-Arvizu (1983), para la zona comprendida entre PB y la boca del EPB, encontró dos patrones distintos de circulación, uno de octubre a enero con tendencias de circulación hacia la costa y baja intensidad ($5 - 8 \text{ cm s}^{-1}$), y otro caracterizado por una corriente a lo largo de la costa desde PB hacia la boca del EPB, con velocidades de 10 a 15 cm s^{-1} , coincidiendo con los resultados obtenidos por Argote *et al.*, (1975) aunque sólo para profundidades menores a los 30 m. También, encontró una fuerte correlación entre la dirección de los vientos locales y la corriente superficial. Para vientos de baja intensidad no encontró un patrón bien definido. Hernández Walls (1986), por medio de un modelo analítico hidrodinámico, describió la circulación en la zona costera de la BTS inducida por vientos del noroeste y oeste de magnitudes entre los 0 y 5.5 m s^{-1} , encontró que en general la corriente es hacia la costa con una pequeña componente hacia el sur, y un promedio de

velocidades de 11 cm s^{-1} . Barrera Gaona (1998), analizo los patrones residuales de transporte de sedimentos, observo que en la zona norte de la bahía, el transporte tiene dirección SE y NE; Mientras que en la zona Sur la dirección de transporte es hacia el NE; creando una zona de convergencia en la costa central donde observo dirección al Oeste; mientras que en el CPB, la dirección es NE. En un estudio observacional mas completo García *et al.*, (1995), por medio de un arreglo de siete anclajes de correntómetros distribuidos en la Bahía a diferentes profundidades durante 1994, encontraron que la frecuencia más importante es la banda cero, que corresponde al valor promedio de las oscilaciones de largo periodo en la corriente persistente, y con menor energía las bandas 1 cpd y 2 cpd (diurna y semidiurna, respectivamente).

En cuanto a que simulaciones numéricas sólo se han realizado tres trabajos, Gavidia Medina (1988), realizo una simulación numérica en dos dimensiones de la circulación inducida por el viento y la marea, encontrando que la influencia del primero es mayor que la segunda. Rodríguez (1996), simuló los modos normales de oscilación de la BTS; Argote *et al.*, (1991), reprodujo la circulación inducida por viento en BTS, y encontró que el flujo costero y áreas de convergencia son inducidos por efectos topográficos, además de una alta correlación entre las zonas de flujo de retorno y la dirección del viento.

1.3. Objetivo

En el presente trabajo se plantea como objetivo lo siguiente:

- Describir la circulación residual en la Bahía de Todos Santos, inducida por la marea y el viento empleando un modelo numérico y compararla con observaciones existentes.
- Identificar las principales características de la circulación en la Bahía de Todos Santos.
- Continuar el trabajo iniciado por Gavidia (1988), mejorando la resolución, así como la disponibilidad de observaciones para comparar las simulaciones.

1.4. Métodos

1.4.1. Modelo

El modelo numérico utilizado en el presente trabajo es conocido por la comunidad oceanográfica como Princeton Ocean Model (POM por sus siglas en inglés), este ha sido ampliamente utilizado para la simulación de procesos de escala media y de la circulación en cuerpos de agua costeros. Las ecuaciones del modelo y los algoritmos numéricos usados para resolverlas son descritos con detalle por Blumberg y Mellor (1987).

El modelo resuelve la versión tridimensional de las ecuaciones primitivas en una malla Arakawa tipo "C", conservando cantidades como masa y energía; utiliza coordenadas sigma (σ) en la vertical y un esquema de cerradura turbulenta de nivel 2.5. La diferenciación es explícita en la horizontal e implícita en

la vertical y la marcha en el tiempo se realiza separando el modo barotrópico del baroclínico, lo cual permite utilizar diferentes pasos de tiempo para cada uno de ellos.

En el presente estudio se resuelve solamente el modo barotrópico de las ecuaciones de continuidad y momentum, siendo estas de la forma:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}D}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{U}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}^2 D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{U}\bar{V}D}{\partial y} - f\bar{V}D + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\langle wu(0) \rangle + \langle wu(-1) \rangle \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{V}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}\bar{V}D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}^2 D}{\partial y} - f\bar{U}D + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} = -\langle wv(0) \rangle + \langle wv(-1) \rangle \quad (3)$$

Donde las componentes del esfuerzo del viento son $-\langle W u(0) \rangle$ y $-\langle W v(0) \rangle$, y las componentes del estrés de fondo son $-\langle W u(-1) \rangle$ y $-\langle W v(-1) \rangle$. En cuanto a las condiciones de frontera y los forzamientos el código es sumamente flexible y permite al usuario experimentar con mucha facilidad. Para el presente estudio se utilizó una malla rectangular de 225 m por lado (140 puntos en la dirección norte-sur, y 95 en la dirección este-oeste) y 21 niveles de sigma en la vertical. De acuerdo con la malla utilizada el paso en el tiempo (Δt) utilizado para satisfacer las condiciones CFL debe ser menor a 1.5 seg., el Δt utilizado fue de 1 seg.

En las fronteras cerradas se impuso como condición flujo nulo y la elevación evoluciona libremente, en las fronteras abiertas la elevación es impuesta en cada paso del tiempo y para la velocidad se utiliza una condición de radiación tipo Orlanski (1976).

Se obtuvieron como resultados, la elevación del nivel medio del mar y velocidades en las componentes horizontales. Se analizan los campos de vorticidad y divergencia obtenidos del campo de velocidad residual.

1.4.2. Circulación Residual

El analizar las corrientes de marea nos permite inferir algunas características de la variación espacial de la circulación. Sin embargo en bahías y lagunas, las corrientes de marea actúan conjuntamente al viento, gradiente de presión atmosférico, descargas de ríos, corrientes de densidad, de mar abierto, fuerza de Coriolis e interacciones no lineales de la marea, así como con la geometría costera y batimetría (Zimmerman, 1977; Blumberg *et al.*, 1993). Cuando una partícula de agua cualquiera, después de un ciclo completo de marea no vuelve a su posición original, a estos desplazamientos se les conoce como flujos residuales (Yanagi, 1976), y esta definido como (Robinson, 1983):

$$a_R = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} a \, dt. \quad (4)$$

Es difícil medir directamente los flujos residuales ya que son uno o dos ordenes de magnitud menores a los flujos de marea, es decir, menores al nivel de ruido, además de los errores asociados a los correntómetros tradicionales que generan tales registros. En los últimos años gracias al avance tecnológico, ha sido posible utilizar modelos numéricos para estudiar estos fenómenos obteniendo buenos resultados (Robinson, 1983; Blumberg *et al.*, 1993)

Al estudiar la circulación residual se puede determinar el rotacional de las ecuaciones de movimiento y examinar la vorticidad residual, de esta manera se puede eliminar la elevación del nivel del mar, del problema. El examinar la vorticidad residual provee de una importante herramienta para entender a mayor profundidad como operan los mecanismos generadores de residuales. El análisis de la vorticidad permite discutir acerca de la generación de residuales de una manera no-rigurosa, lo cual es de gran ayuda al análisis matemático posterior.

1.4.3. Vorticidad

La vorticidad (2), es una característica de la cinemática de los fluidos que expresa la tendencia de las partículas del fluido a rotar y esta directamente asociada con el corte de velocidad (Pond y Pickard, 1978)

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (5)$$

Cuando la vorticidad es medida con respecto a la tierra, se conoce como vorticidad relativa; la convención de signos es vorticidad es: positiva (ciclónica) en contra de las manecillas del reloj, mientras que vorticidad negativa (anticiclónica) a favor de las manecillas del reloj esto en el hemisferio norte

En mares costeros barotrópicos considerar la vorticidad relativa (Ec. 6) es de gran utilidad, ya que esta es generada y eliminada rápidamente,

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} + \frac{df}{dt} = & \overbrace{\left(\frac{\omega + f}{h + \zeta} \right) \frac{d}{dt}(h + \zeta)}^A - \overbrace{\nabla \times a}^B + \overbrace{\nabla \times \frac{W}{\rho(h + \zeta)}}^C - \dots \\ & \underbrace{\frac{k|\bar{u}|}{h + \zeta} \omega}_D + \underbrace{k|\bar{u}| \times \nabla \frac{|u|}{h + \zeta}}_E + \underbrace{B \nabla^2 \omega}_F + \underbrace{\nabla B \times \nabla^2 u}_G \end{aligned} \quad (6)$$

Así cada uno de los términos en la ecuación (6) describen mecanismos distintos involucrados en la generación de vorticidad, para el caso de la BTS, el término de conservación de vorticidad potencial es el más importante (A) con un orden de magnitud de 10^{-10} , el cual está relacionado con los cambios topográficos, mientras que los términos B y C le siguen en importancia con un orden de magnitud de 10^{-12} (Gavidia, 1988). Los cuales están relacionados con variaciones laterales de la estructura vertical y con el torque producido por el viento respectivamente (Robinson 1983).

Examinando la vorticidad residual tenemos un método para comprender a mayor profundidad los mecanismos de generación de residuales; estos mecanismos son esencialmente similares y es posible clasificarlos según las condiciones topográficas en (Robinson, 1983):

Mecanismo A: Remolinos de Península (headland Eddies).

Este mecanismo se produce aparentemente por la dificultad de las partículas de agua de seguir la costa en una punta o península (Fig. 2a). Las fuentes de generación de vorticidad residual son la fricción de fondo, ya que para la misma velocidad, una columna menor experimenta mas fricción que una columna mayor, la consecuencia es que un flujo paralelo a la costa experimente un torque; cuando el flujo es en sentido opuesto, el torque también (Fig. 2b), por lo que en una costa recta, la vorticidad residual es cero. Ahora si consideramos la fricción del fondo como proporcional a la velocidad de la marea al cuadrado, entonces aunque la profundidad en las proximidades de una península sea constante, el resultado de la fricción del fondo será el incremento de la velocidad cerca de la costa rodeando la punta, y con ello un torque y vorticidad residual (Fig. 2c). En el caso de una

isla, ambos mecanismos actúan como fuentes generadoras de vorticidad, produciendo 4 remolinos (Fig. 3).

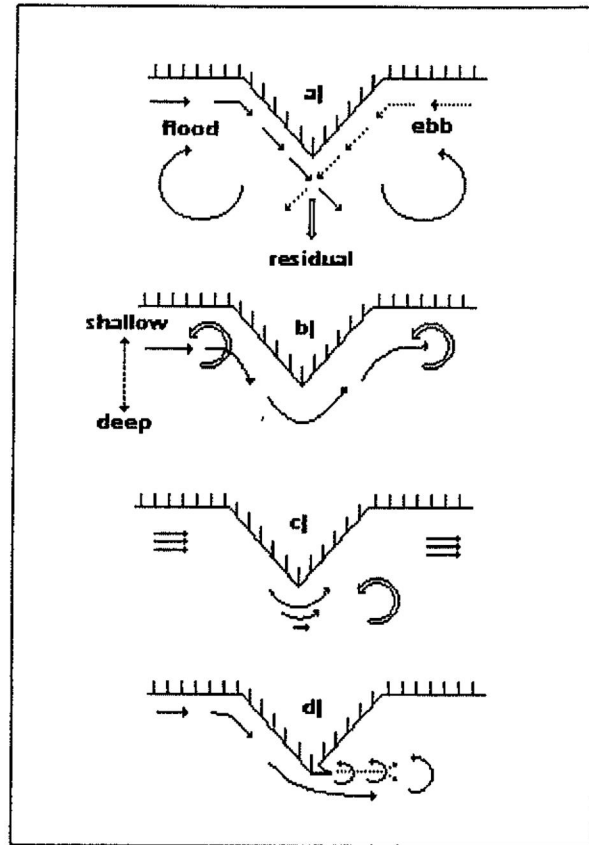


Fig 2 .- Mecanismos posibles en la generación de remolinos de península.

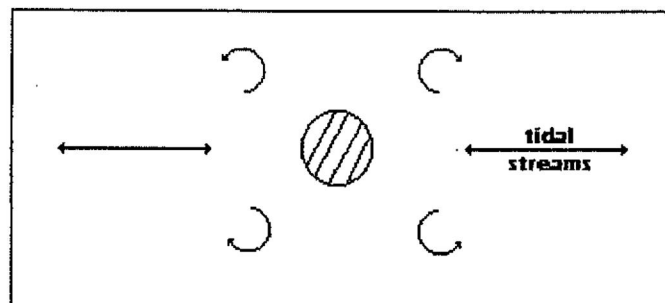


Fig 3 .- Remolinos residuales en una isla, por flujos de marea.

Mecanismo B: Circulación sobre barras de arena paralelos.

Una columna de agua que se mueve sobre las barras, en un sentido normal eje topográfico de ésta, será aplastada (debido a la topografía), y su tendencia a conservar la vorticidad potencial, dará como resultado un giro anticiclónico; de la misma manera al salir de las barras, resulta en un giro ciclónico. Esto ocurre cualquiera que sea la dirección del flujo; así que al final en la zona somera se encontrara vorticidad negativa (anticiclónica), y en la profunda circundante positiva (ciclónica). La fricción del fondo también es importante aquí, así que la misma fricción tendrá mayor efecto sobre zonas someras, que en profundas (Fig. 4 y 5).

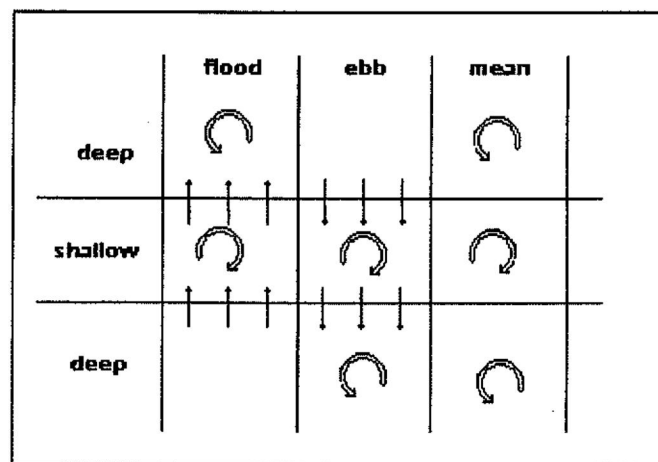


Fig 4 .- Mecanismo generador de vorticidad debido al efecto del cambio de la profundidad sobre la columna de agua.

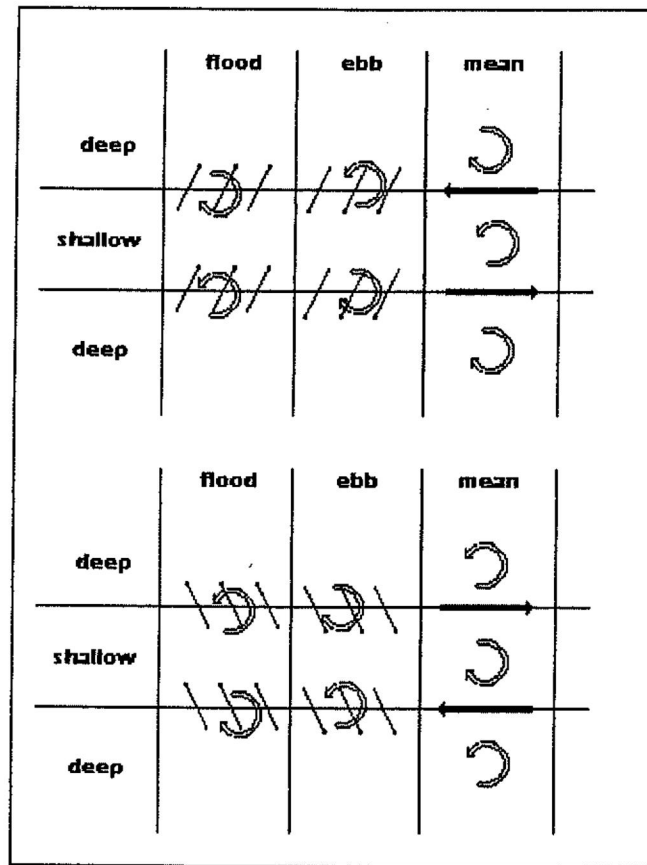


Fig. 5 .- Generación de vorticidad por fricción oblicua sobre una barra.

Mecanismo C: Remolinos de cuencas (basin eddies).

Sabemos que las corrientes de marea disminuyen en magnitud al acercarse a la cabeza de la cuenca; la fricción del fondo actúa de manera más importante sobre la columna en la zona somera, es decir a los lados de la cuenca, así que la viscosidad lateral ejerce un torque a ambos lados de la cuenca (Fig. 6). Conforme disminuye la velocidad, también lo hace el torque.

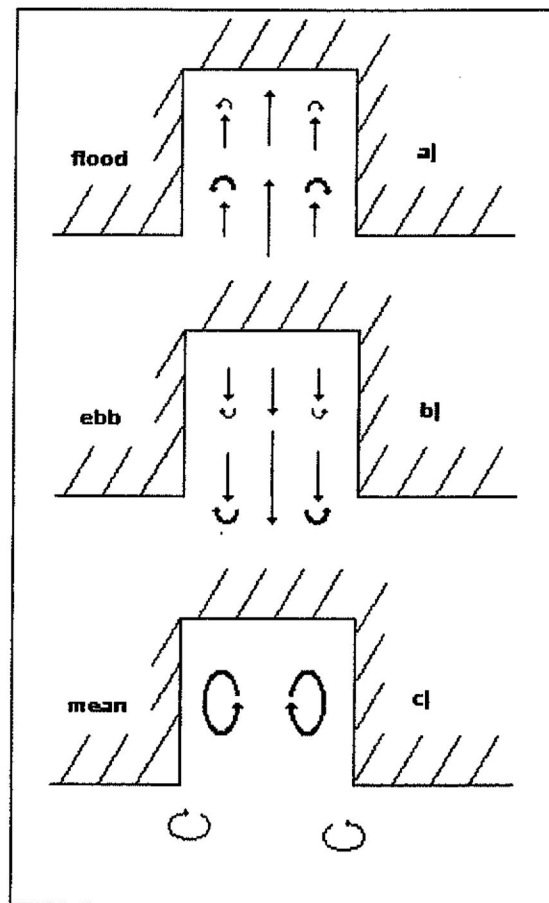


Fig. 6 .- Generación de remolinos en una cuenca semicerrada.

1.4.4. Divergencia

Si eliminamos los términos de presión de las componentes horizontales de movimiento derivando cruzado y restando la ecuación (6a) de la ecuación (6b),

$$\frac{du}{dt} - f \cdot v = -\alpha \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (6a)$$

$$\frac{dv}{dt} - f \cdot u = -\alpha \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \quad (6b)$$

Obtenemos:

$$\frac{d}{dt}(\zeta + f) = -(\zeta + f) \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -(\zeta + f) \cdot \nabla \cdot \underline{V}_H, \quad (7)$$

Donde el término $\nabla \cdot \underline{V}_H$, es reconocido como una medida de la tendencia horizontal de un fluido para divergir ($\nabla \cdot \underline{V}_H > 0$) o converger ($\nabla \cdot \underline{V}_H < 0$).

$$\nabla \cdot \underline{V}_H = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}. \quad (8)$$

1.4.5. Trayectorias lagrangeanas

La circulación residual calculada, muestra una imagen del dominio, que es un promedio en el tiempo de la velocidad y dirección de las corrientes, lo cual nos permite reconocer el patrón general de circulación en todo el dominio, sin embargo, cuando nuestro interés es hacia zonas específicas (i.e.

descargas de contaminantes) y su rango de influencia, es de mayor utilidad conocer la historia del transporte de una partícula marcada, es decir las trayectorias lagrangeanas.

Se presentan casos de trayectorias de las principales zonas de descargas en la BTS, como son el puerto del Sauzal de Rodríguez y el arroyo el Gallo, con los principales vientos predominantes por estación, para verano e invierno, además de este para simular la condición Santana .

Para encontrar la posición de las partículas a través del tiempo planteamos un esquema numérico de la ecuación (9), donde $dt = \Delta t = 43200 \text{ s (12 h)}$, y $d(x, y) = \Delta(x, y) = (X_2 - X_1, Y_2 - Y_1)$, donde X_2 y Y_2 , son las nuevas posiciones de una partícula a cada intervalo de tiempo y $U(x, y)$, es la velocidad lagrangeana.

$$U(u, v) = \frac{d(x, y)}{dt}. \quad (9)$$

Se realizaron experimentos para calcular la dispersión de partículas de agua en el Puerto del Sauzal, el arroyo el Gallo y frente a las Islas de Todos Santos (zona de descarga del material dragado en el Puerto de Ensenada). La dispersión (α) que defino como la variación del área ocupada por las partículas marcadas, con respecto al tiempo (ec 10.).

$$\alpha = \frac{d(area)}{dt}. \quad (10)$$

2. RESULTADOS:

En esta sección se muestran los experimentos numéricos realizados en la BTS, con diferentes forzamientos. La respuesta de la BTS, se muestra a partir de gráficas de nivel del mar, patrones de corrientes de vorticidad y divergencia, las cuales son presentadas como (ω / h) y $(\nabla \cdot \underline{V}_H / h)$ respectivamente, donde h es la profundidad.

2.1. Viento:

Para obtener los residuales inducidos por el viento, se tiene que permitir al modelo estabilizarse, es decir esperar a que la diferencia entre la elevación media en un paso del tiempo y el siguiente sea menor a 1 mm. Los vientos se clasificaron según la estación del año en la cual predominen, para el caso del verano se analizaron los vientos de NW, W, y N, mientras que para el invierno de S y SW. Además de la circulación producida por los vientos del E, presentes esporádicamente en el otoño bajo condiciones de Santana (Pavía y Reyes, 1983; Reyes *et al.*, 1983). Para obtener las simulaciones numéricas, se utilizó como mecanismo de forzamiento un viento de magnitud 5 m/s y direcciones variables según la época del año. Ya que en la BTS, solamente existe una estación meteorológica permanente donde son registradas estas magnitudes y direcciones. Aunque el patrón de vientos es variable dentro de la bahía (Pavía, 1979), una simulación con viento constante representa muy bien el campo de velocidades en la BTS.

2.1.1. Condiciones de Verano:

La elevación máxima encontrada es de 4 mm en la zona de playas municipales en el interior de la BTS, y la máxima depresión (3.5 mm) se encontró con vientos del norte (Fig. 7) sobre la costa norte de la BTS. Se observa además una tendencia a formarse isolineas de elevación del nivel del mar perpendiculares a la dirección del viento en los tres experimentos (Figs. 7, 9, 11).

Los patrones de circulación producidos por los vientos del N y NW (Figs. 7, 9), son muy similares; la dirección del flujo es de norte a sur, y resaltan tres núcleos de velocidades máximas (1.2 y 1.4 cm/s), en San Miguel, Punta Morro, y frente a la boca del EPB, y desalojando la BTS por la zona del CPB donde las velocidades son mucho menores (0.2 - 0.4 cm/s). Para vientos del W (Fig. 8) se observan dos celdas de circulación, una sobre la cuenca al noroeste del dominio y otra en el interior de la bahía, ambas con velocidades menores a 1 cm/s. La zona sureste de la BTS presenta dos giros ciclónicos, el primero en el extremo de Punta Banda y el segundo de mayores dimensiones cerca de la barra del EPB, que da lugar a una corriente de retorno cerca de la boca del EPB. En los tres casos la zona oriental de las ITS, esta caracterizada por velocidades menores a 0.1 cm/s.

El campo de vorticidad (Figs. 8, 10, 12) es muy parecido en los tres casos, siendo negativo en su mayoría, excepto por la zona costera, el bajo de San Miguel y los alrededores a las ITS. Cuando el viento proviene del oeste, se observa una franja de vorticidad positiva desde San Miguel hacia el oeste, además que en el sur de la BTS la zona de vorticidad negativa es bastante ancha.

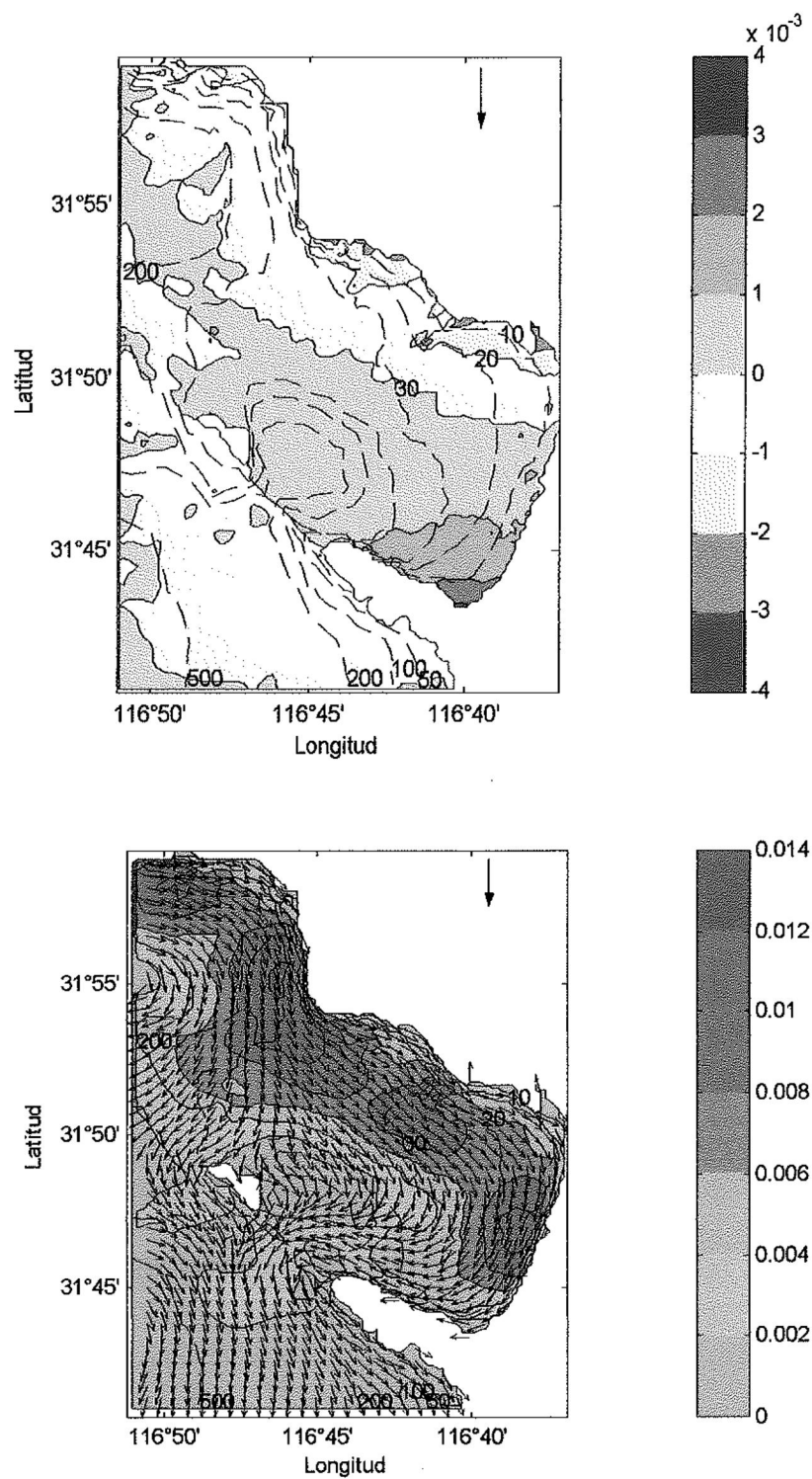


Fig. 7 .- Experimento forzado con viento del norte. Arriba, campo de elevación, en m. Abajo, circulación residual, en m s^{-1} . La flecha indica la dirección del viento.

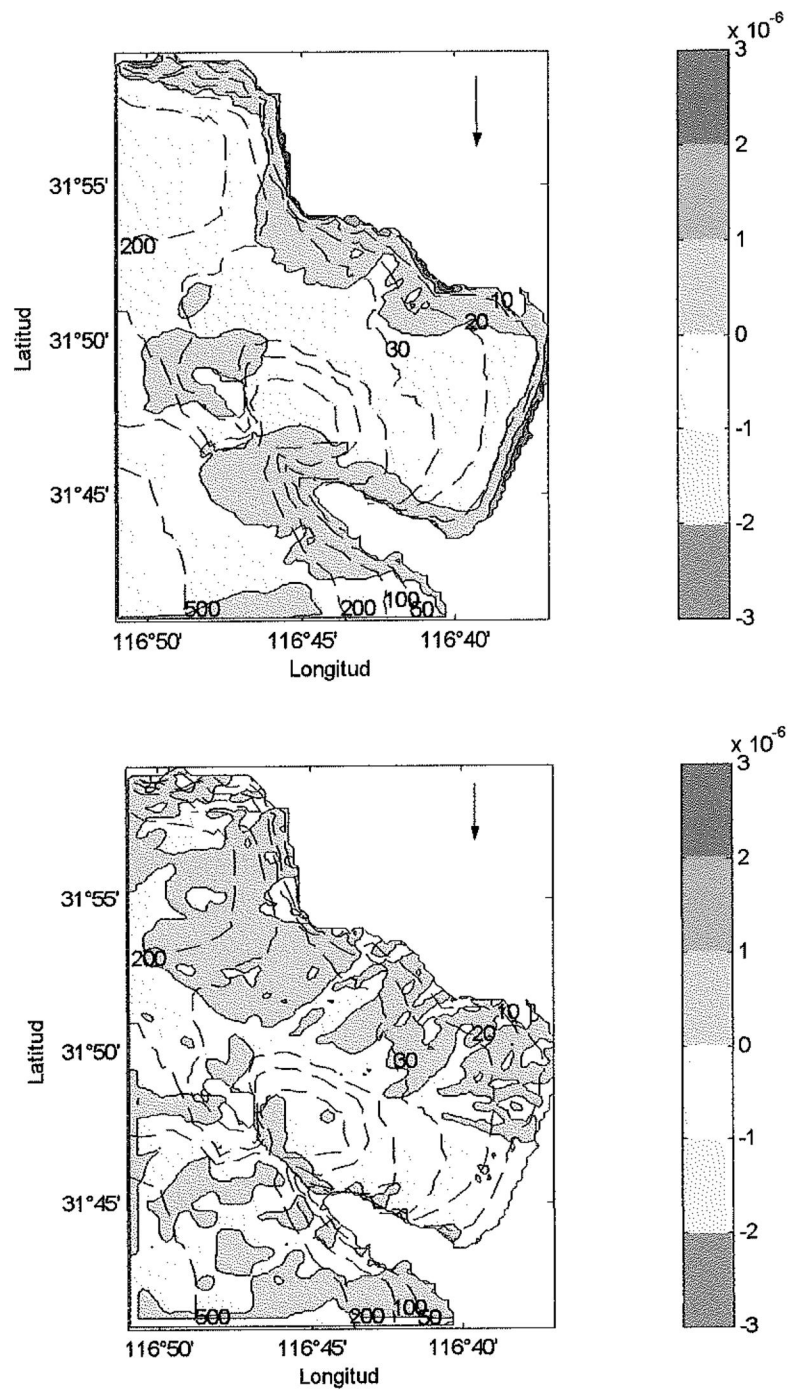


Fig. 8 .- Experimento forzado con viento del norte. Arriba, campo de vorticidad en (m s^{-1}) . Abajo, campo de divergencia en (m s^{-1}) . La flecha indica la dirección del viento

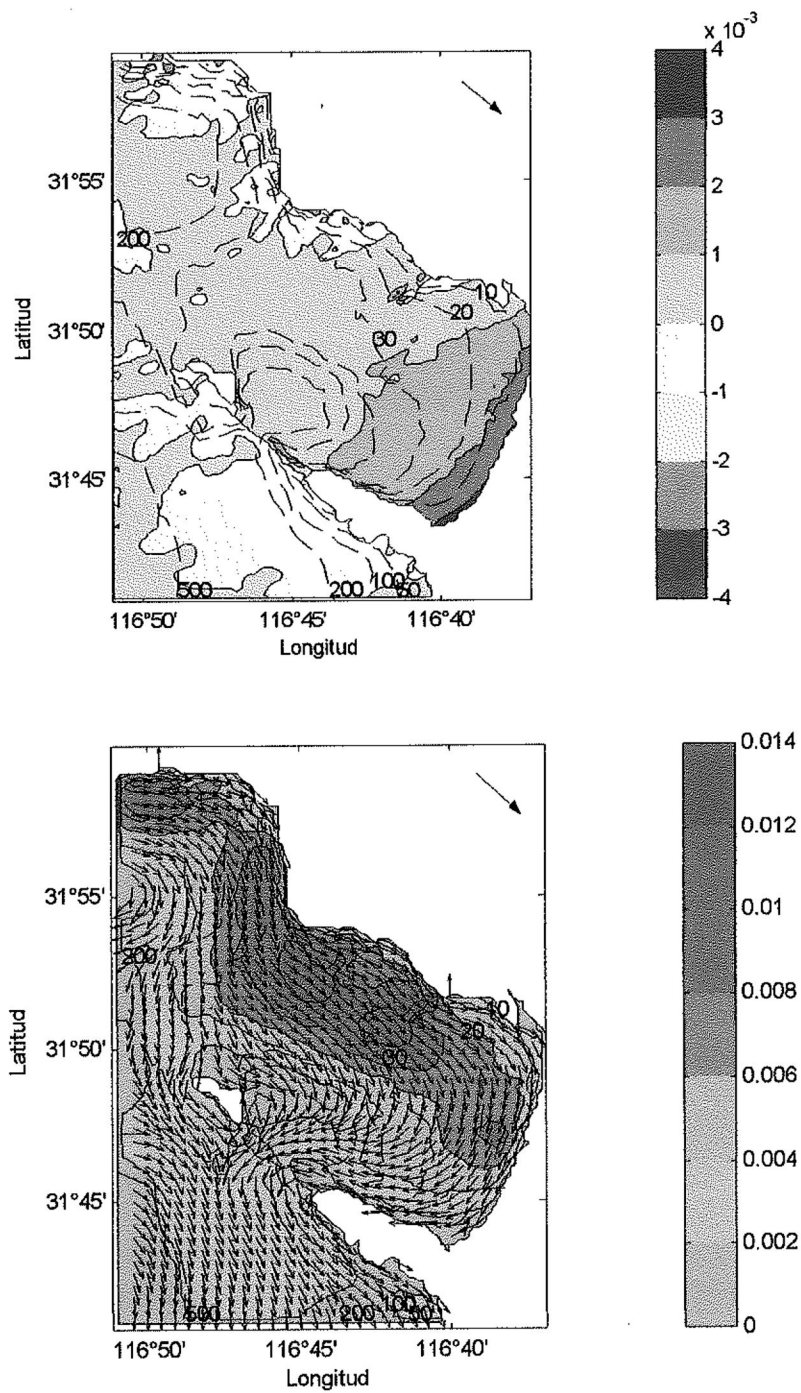


Fig. 9 .-Experimento forzado con viento del noroeste. Arriba, contornos de elevación del nivel del mar (m). Abajo, corrientes residuales (m s^{-1}). La flecha indica la dirección del viento

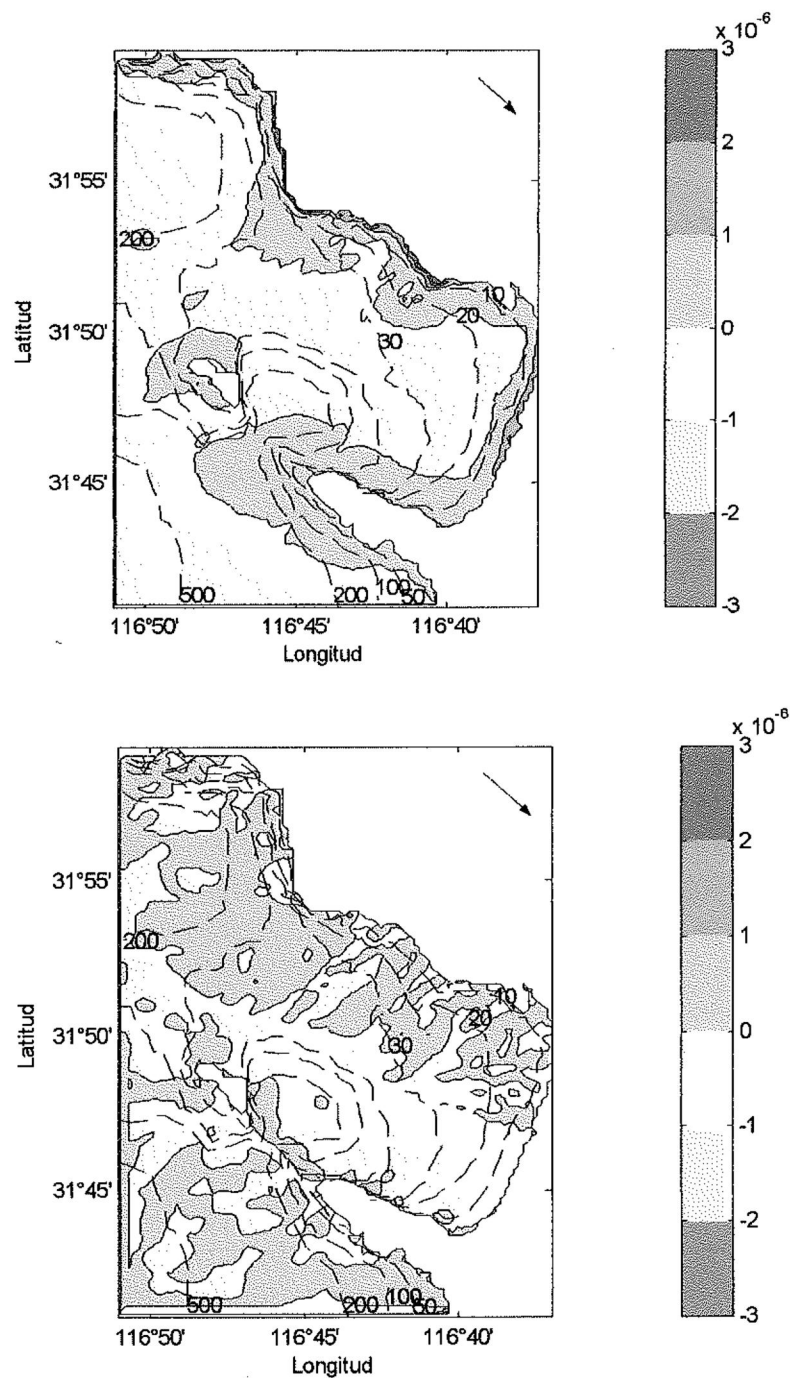


Fig. 10 .-Experimento forzado con viento del noroeste. Arriba, campo de vorticidad (m s^{-1}). Abajo, campo de divergencia (m s^{-1}). La flecha indica la dirección del viento

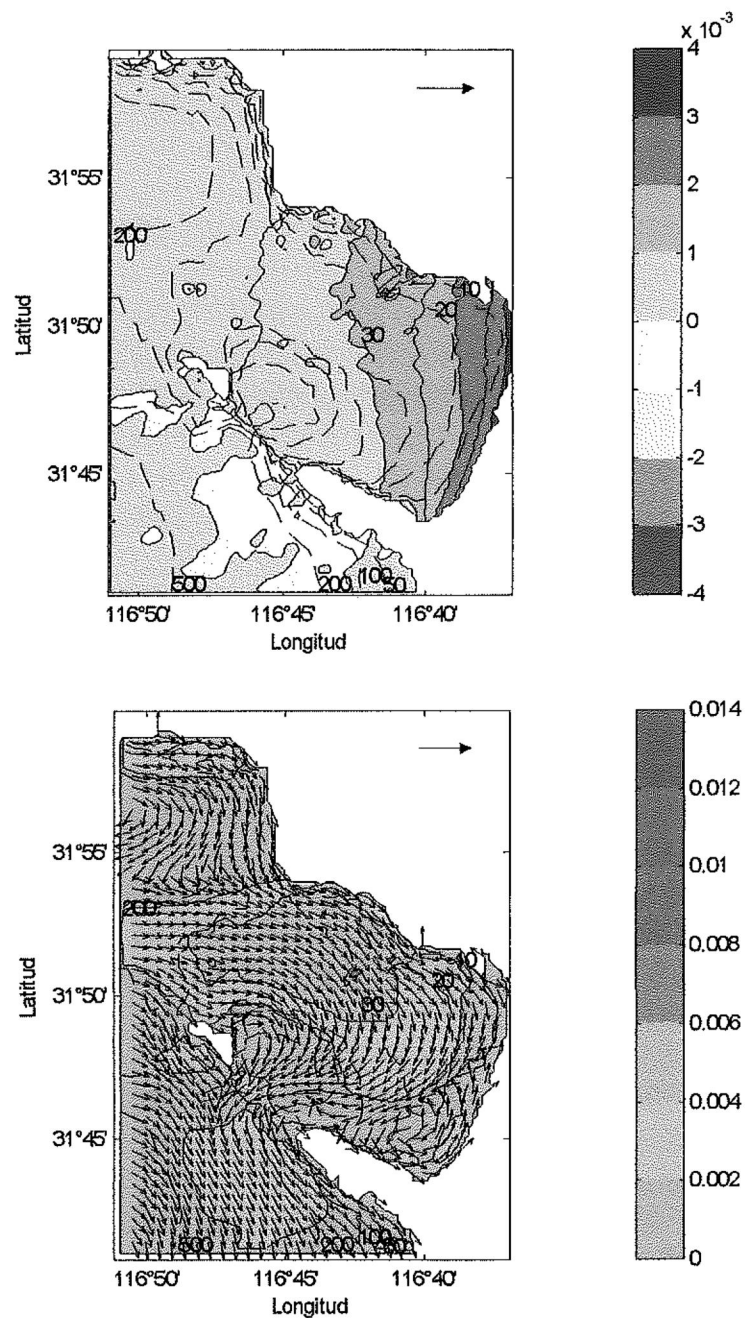


Fig. 11 .-Experimento forzado con viento del oeste. Arriba, contornos de elevación del nivel del mar (m). Abajo, corrientes residuales (m s⁻¹). La flecha indica la dirección del viento

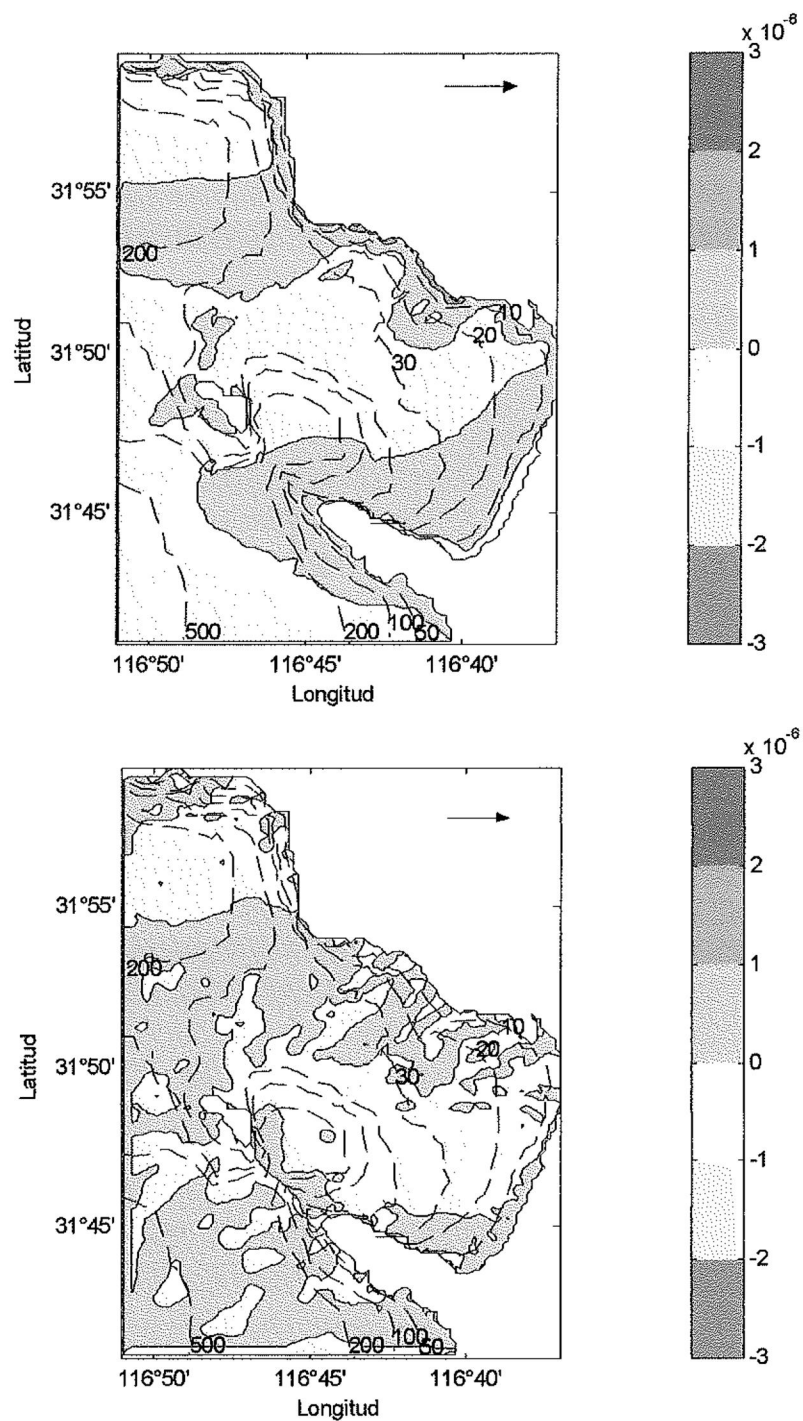


Fig. 12 .- Experimento forzado con viento del oeste. Arriba, campo de vorticidad (m s^{-1}). Abajo, campo de divergencia (m s^{-1}). La flecha indica la direcci3n del viento

El campo de divergencia, también es muy similar en los tres casos (Figs. 8, 10, 12) observándose tendencias negativas en la zona sur de la BTS, mientras que en la zona norte se observa predominancia positiva, aunque existen zonas negativas dispersas. En el canal entre las ITS y el extremo de PB, se observa una zona de divergencia positiva (convergencia).

2.1.2. Condiciones de Invierno

Las máximas variaciones del nivel del mar, corresponden a vientos del suroeste (4 mm), mientras que para los vientos del sur son solamente 2 mm, en ambos casos en la costa norte, en las inmediaciones del Puerto de Ensenada (Figs. 13, 15). Para los vientos del suroeste no se observan descensos importantes a excepción de algunas zonas protegidas, sin embargo cuando el viento proviene del sur desde los $31^{\circ}51' N$ hacia el sur se observa un descenso gradual hasta llegar a 3 mm por debajo del nivel del mar en la zona sureste de la BTS. Siendo esta zona la de menor nivel para ambos forzamientos.

El comportamiento general de la circulación es del sur al norte (Figs. 13, 15). Las máximas velocidades para ambos casos se encuentran frente a PSM y a la boca del EPB, para vientos del S un tercer núcleo se observa frente a Punta Morro, aunque de menor magnitud. Para el viento del S la circulación presenta tendencias anticiclónicas en todo el dominio, con un único giro en el interior de la BTS; para el viento del suroeste se observan en el interior dos giros uno ciclónico en el centro de la BTS, y el segundo anticiclónico al noreste de las ITS. En ambos casos se observa una celda de circulación anticiclónica en el norte del dominio. En las zonas al oriente de las Islas, y al sur del dominio, se observa la menor dinámica, con velocidades menores a 0.20 cm/s.

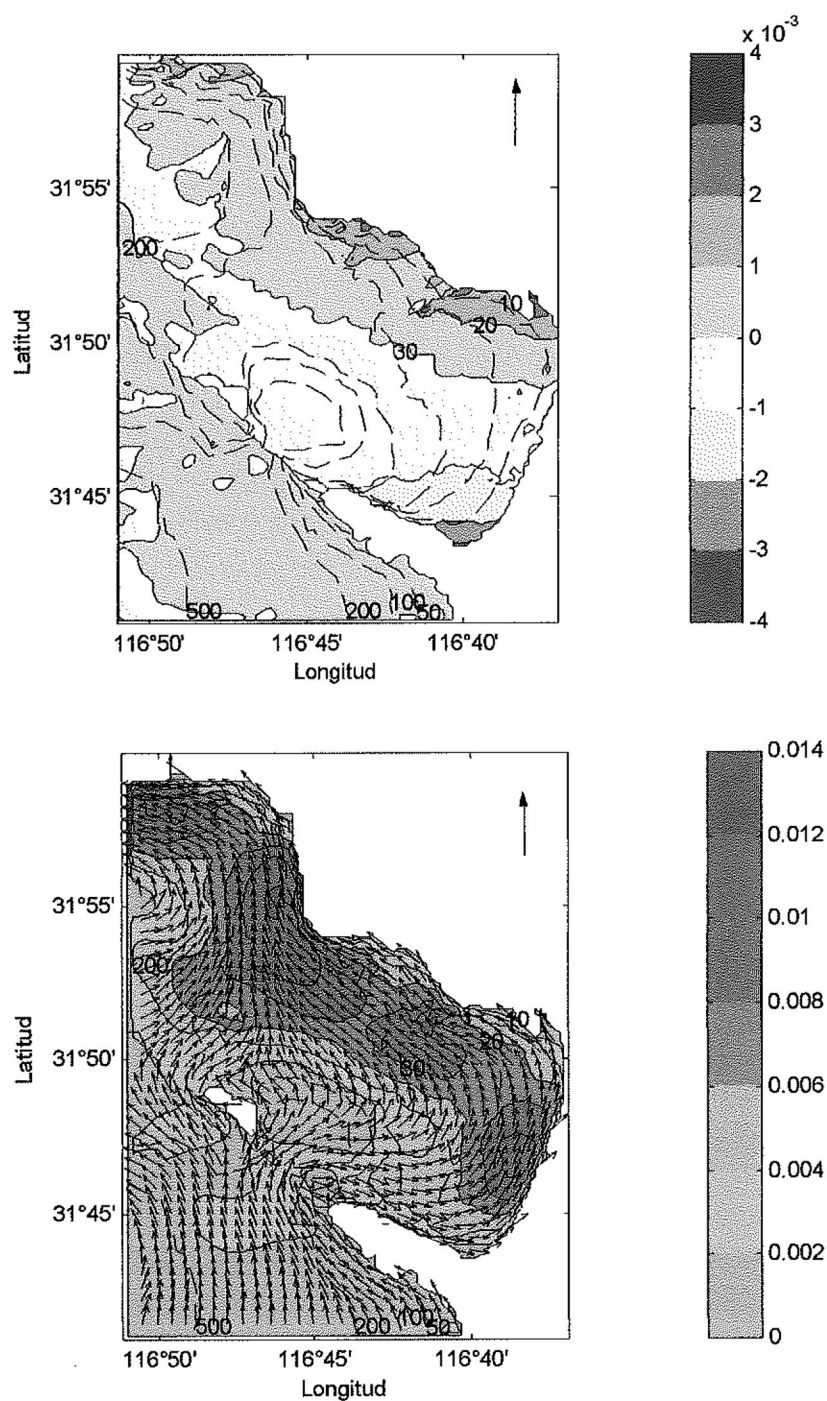


Fig. 13 .- Experimento forzado con vientos del sur. Arriba, elevación del nivel del mar, (m). Abajo, corrientes residuales en (m s^{-1}). La flecha indica la dirección del viento

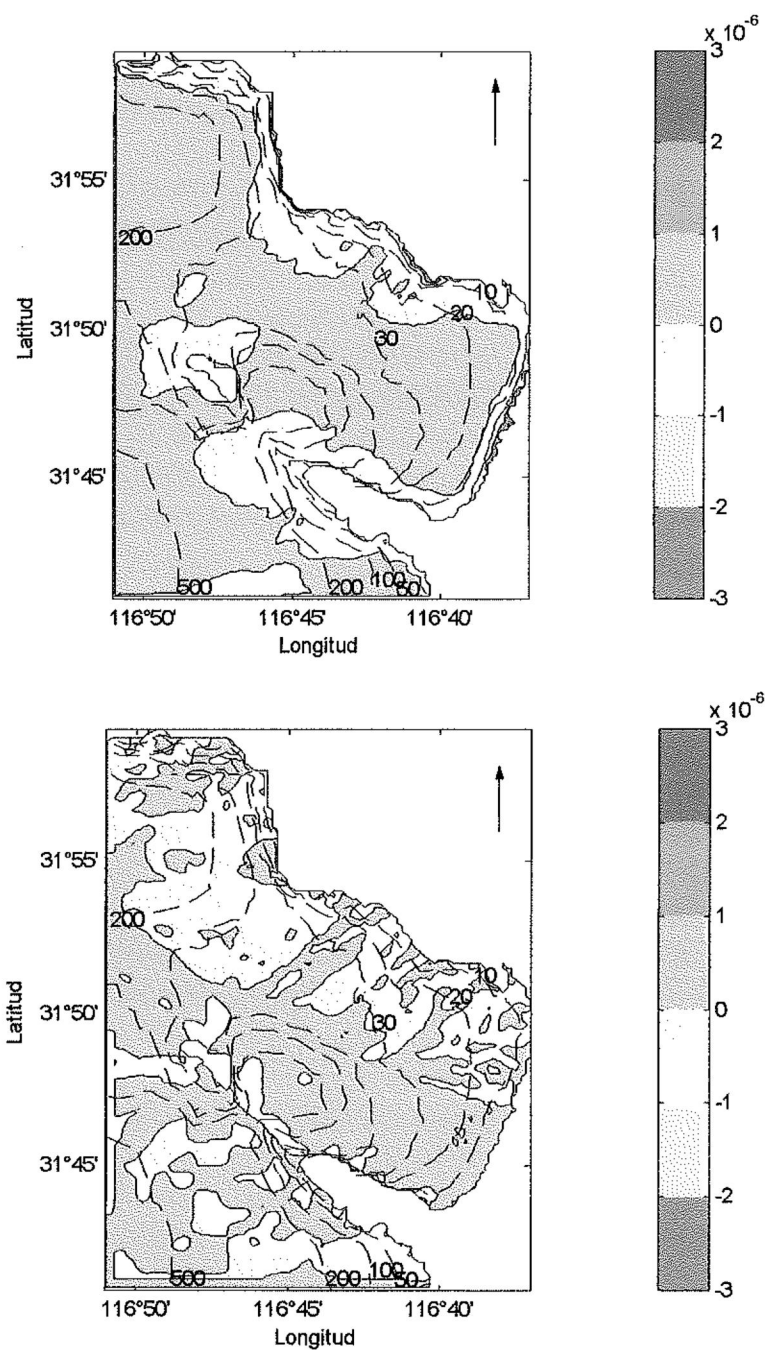


Fig. 14 .- Experimento forzado con vientos del sur. Arriba, campo de vorticidad en (m s^{-1}) . Abajo, campo de divergencia en (m s^{-1}) . La flecha indica la dirección del viento

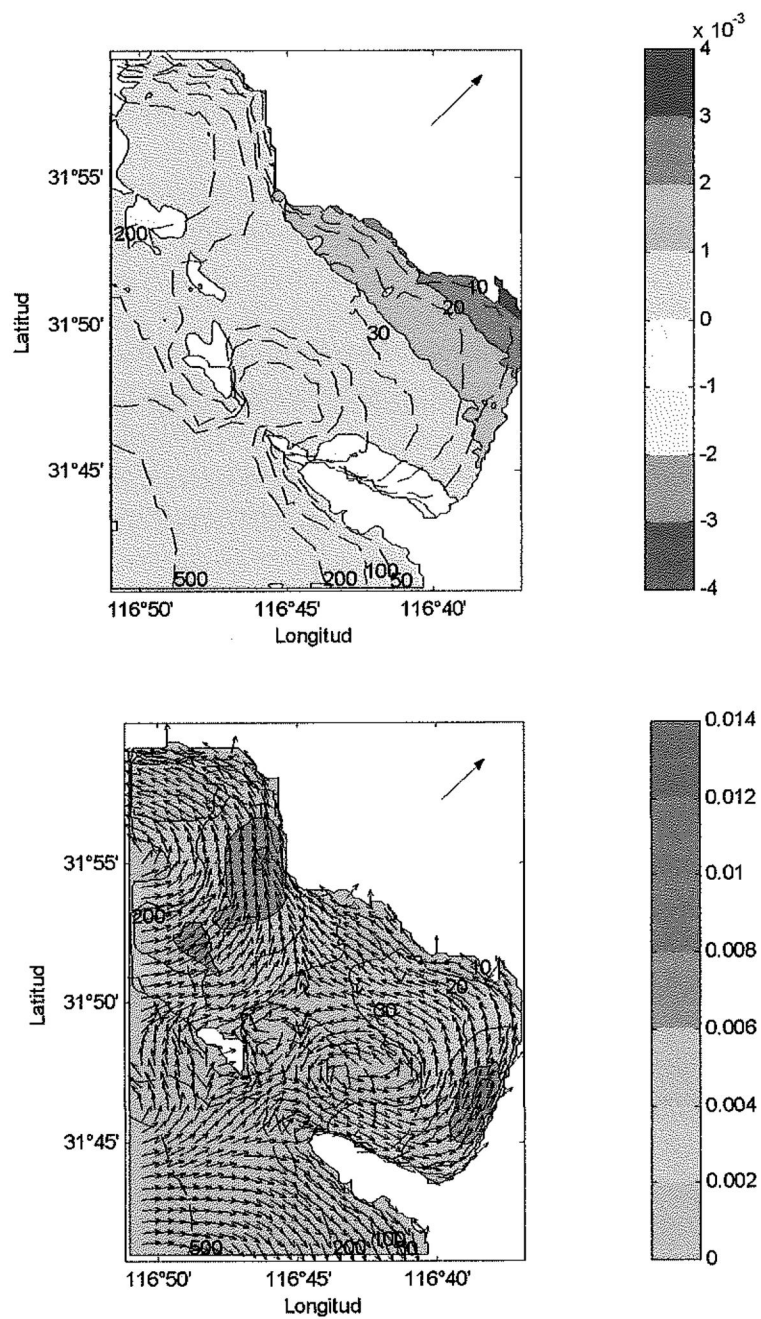


Fig. 15.-Experimento forzado con vientos del suroeste. Arriba, contornos de elevación del nivel del mar (m). Abajo, corrientes residuales (ms^{-1}). La flecha indica la dirección del viento

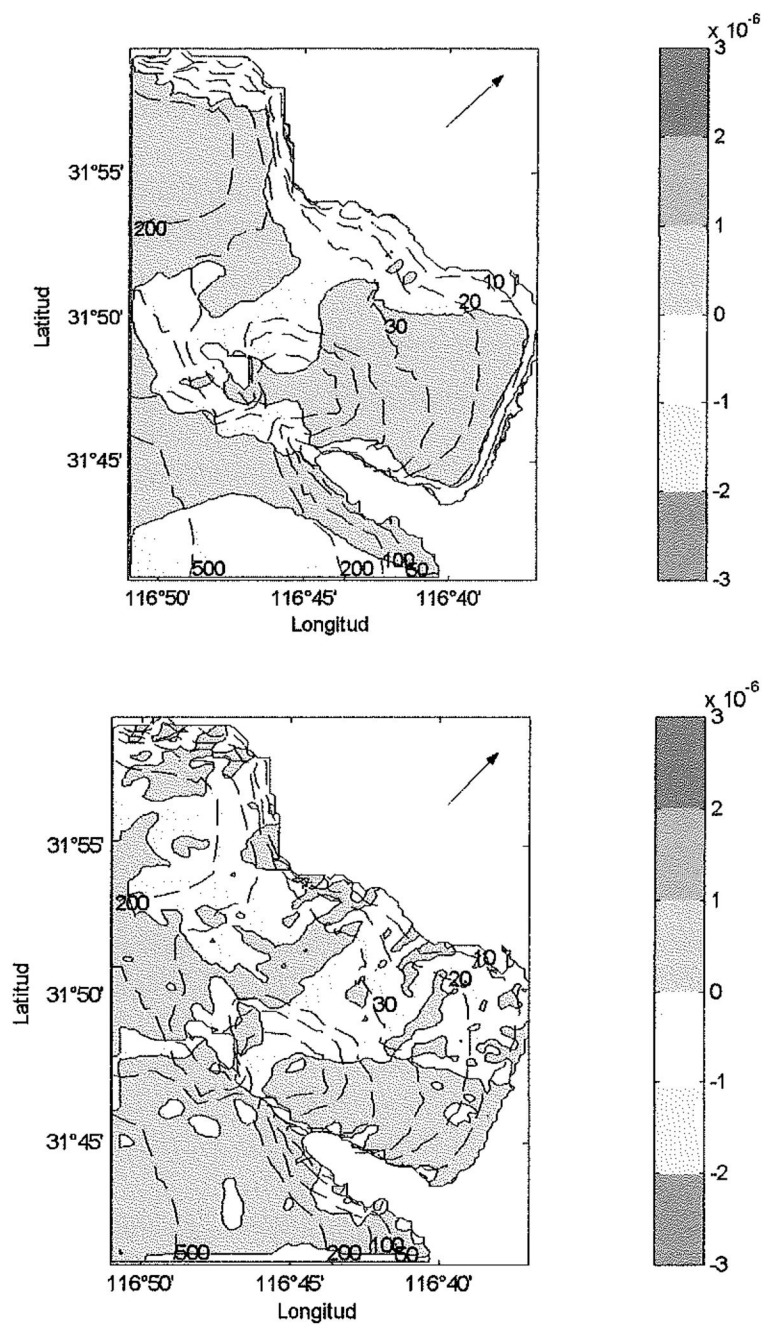


Fig. 16 .- Experimento forzado con viento del suroeste. Arriba, campo de vorticidad en $(m\ s)^{-1}$. Abajo, campo de divergencia en $(m\ s)^{-1}$. La flecha indica la direcci3n del viento

El campo de vorticidad (Figs. 14, 16) presenta características negativas en la costa por lo menos hasta la isóbata de los 10 m. Cuando el viento proviene del suroeste (Fig. 16) se observa un cinturón negativo desde Punta Banda, rodeando las ITS y hasta la costa norte de la BTS, cerca de San Miguel. Cuando el viento proviene del sur solo aparece una zona negativa rodeando las ITS, y el bajo de San Miguel. El campo de divergencia es muy similar en ambos casos (Figs. 14, 16), negativo en el norte del dominio y positivo en el sur, sobresale una franja de divergencia (divergencia positiva) desde las ITS hacia el extremo de Punta Banda.

2.1.3. Condición Santana

Esporádicamente, en los meses de otoño se presentan vientos provenientes del oriente, los cuales son provocados por un centro de alta presión que durante esa época se encuentra sobre el suroeste de los Estados Unidos y envía vientos secos a alta velocidad con dirección al Océano Pacífico, aunque sólo se presentan esporádicamente y su persistencia es del orden de algunos días, se alcanzan altas velocidades, que producen cambios en la circulación de la zona de estudio, y debido a este carácter esporádico, se estudian como un caso independiente.

La elevación máxima (4 mm) es encontrada en la zona de las playas municipales en el interior de la BTS (Fig. 17), descendiendo en la dirección oeste siendo nula en los límites de la bahía. Las Isolíneas de elevación presentan tendencias a ser paralelas a las isóbatas, cuando menos hasta los 30 m de profundidad.

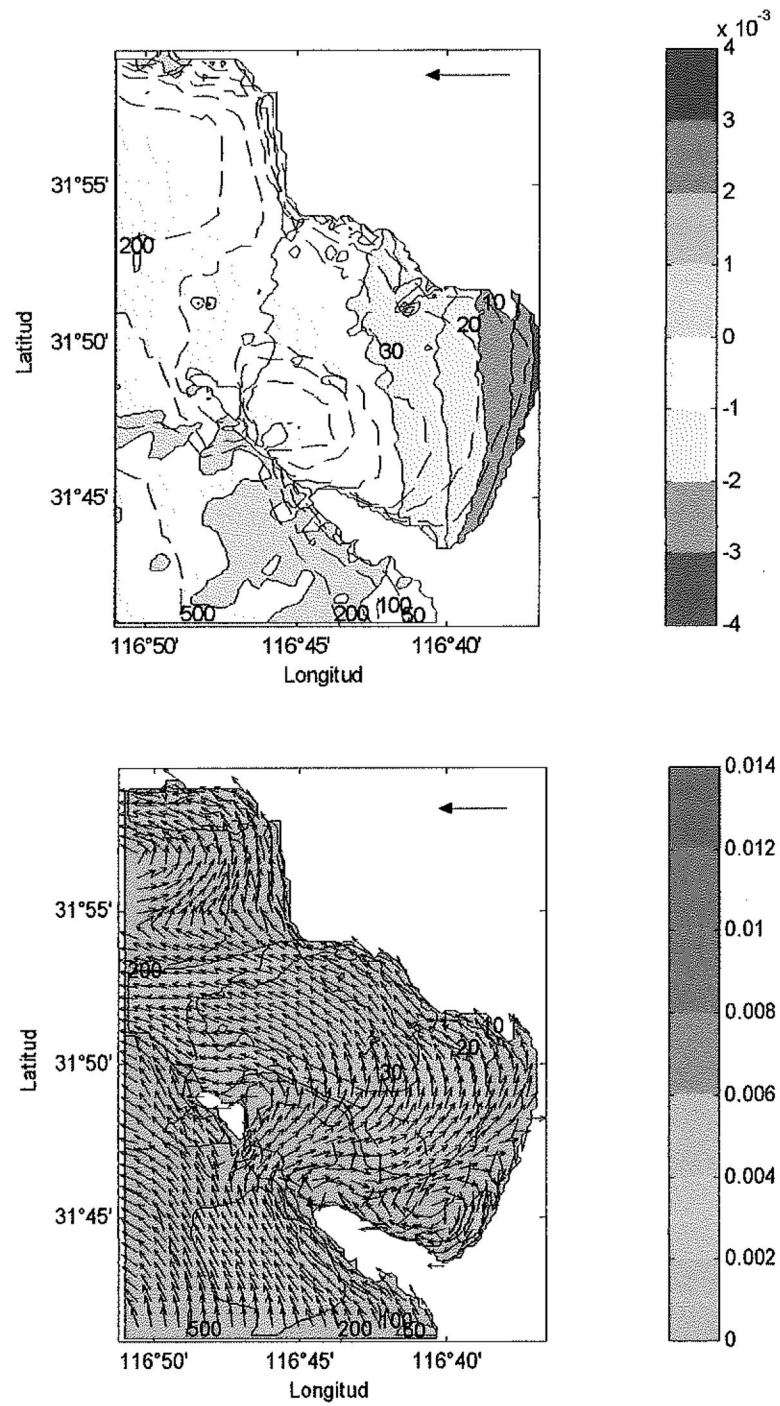


Fig. 1.- Experimento forzado con viento del Este. Arriba, contornos de elevación del nivel del mar (m). Abajo, corrientes residuales (ms^{-1}). La flecha indica la dirección del viento

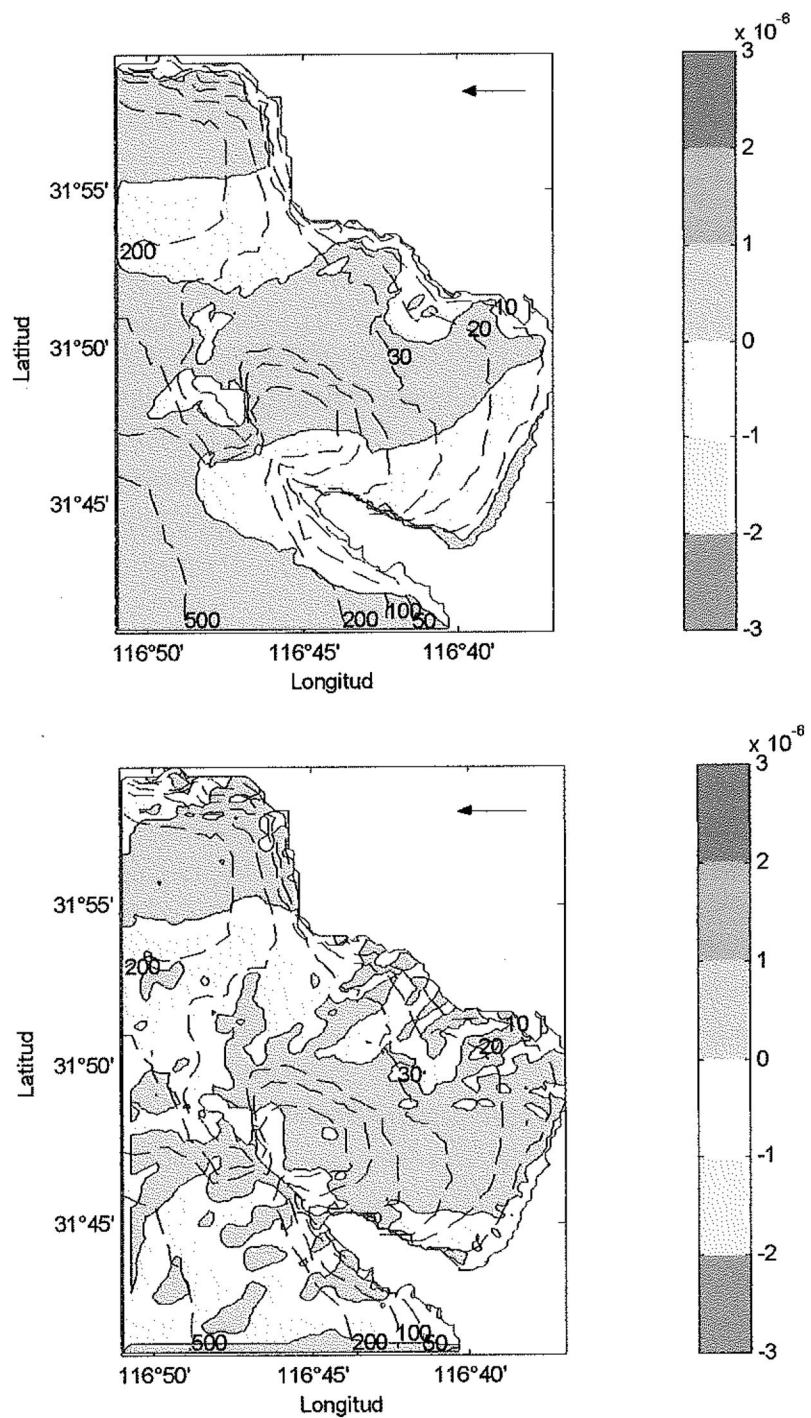


Fig. 18 .- Experimento forzado con vientos del este. Arriba, campo de vorticidad (m s^{-1}). Abajo, campo de divergencia en (m s^{-1}). La flecha indica la direcci3n del viento

La circulación (Fig. 17) en general va de sur a norte y presenta características ciclónicas; las máximas velocidades (0.8 cm/s) se encuentran frente a la costa norte de la BTS, desde el Sauzal hasta Punta Morro. En la zona sureste de la BTS, se observa un giro anticiclónico de bajas velocidades. En el interior de la BTS la zona con menor dinámica se encuentra al oriente de las ITS y en la zona del giro ciclónico desde el extremo de Punta Banda hacia las playas municipales.

La zona costera de todo el dominio tiene características anticiclónicas vorticidad negativa además de la zona de las ITS, el bajo de San Miguel y además una franja que se extiende desde San Miguel hacia la frontera abierta a los $31^{\circ}54'$ (Fig. 18), la que separa dos celdas de circulación una al norte del dominio y otra en el interior de la Bahía. En el centro de la BTS, se observa una zona de divergencia (positiva), y las zonas cercanas a las costas actúan como zonas de convergencia (negativa).

2.2. Trayectorias lagrangeanas

Se colocaron arreglos de partículas por todo el dominio para seguir su posición. Los experimentos se realizaron de la misma forma que el experimento anterior, con vientos provenientes del norte, noroeste, y oeste para ejemplificar el verano y provenientes del sur y suroeste para el invierno; el periodo de tiempo que se siguió a las partículas fue de 20 días ($dt = 12 \text{ hr}$). Se colocaron 6 grupos de partículas distribuidas en todo el dominio, que serán referidos según la Tabla 2.

Tabla II.- Características de los grupos de trazadores, y su ubicación.

NOMBRE DEL GRUPO	COLOR	EXPLICACION
SALSIPUEDES	Amarillo	Cruz en la cuenca al sur del Mirador
SAN MIGUEL	Verde	Línea recta desde PSM , hasta la ITS
COSTA INTERIOR	Rosa	Arreglo que sigue la costa de la BTS
ENSENADA	Azul celeste	Cruz en el interior de la BTS
CAÑON	Rojo	Línea desde sobre el CPB
FRONTERA	Azul	Arreglo sobre la frontera abierta

Se realizaron cálculos de dispersión, según la ecuación (10), para periodos de 20 días ($dt = 12$ hr), en las zonas del Puerto del Sauzal de Rodríguez, el Arroyo el Gallo, y la zona al oriente de la Isla de Todos Santos en $31^{\circ}48' N$ y $116^{\circ}45' W$ que es el lugar donde se descarga el material dragado en el puerto de Ensenada (Barrera-Gaona, 1998). La variación del área se presenta como proporción al área inicial.

2.2.1. Verano

El grupo de amarillo, viaja hasta el interior de la BTS hasta las inmediaciones del CPB, y solo las partículas mas al sur del arreglo viajan por el exterior de la bahía, con viento del N y NW (Fig. 19, 20), cuando el viento es del W (Fig. 21) este arreglo cambia radicalmente y permanece en la zona desplazándose muy poco, con excepción de un par de partículas que viajan al interior de la BTS, y se comportan igual que con vientos del N o NW. El grupo verde, cuando el viento proviene de W y NW, viaja al interior de la BTS, siguiendo perpendicularmente las isóbatas acercándose al final del periodo al CPB;

mientras que para el viento del N el grupo se divide, las partículas más al norte entran a la BTS, perpendicularmente a las isóbatas, el segundo subgrupo rodea la isla por la costa exterior, colocándose de forma paralela a las isóbatas. El grupo rosa, sigue la línea de costa alrededor de la isóbata de los 20 m, aunque el transporte es mucho menor cuando el viento es del W. El grupo azul celeste, se dirige hacia el CPB, pero conforme se acerca el transporte es menor, por lo que las partículas más alejadas, tienden a alcanzar a las más cercanas al CPB. El grupo rojo, sale de la BTS, y se mueve al sureste paralelo a Punta Banda; y el grupo azul, se mueve al sur, y solo dos partículas entran a la BTS, cuando el viento proviene del W.

Las partículas colocadas en el puerto del Sauzal siguen la línea de costa entre la isóbata de los 20 y 30 m, la dispersión, aumenta un 50 %, los primeros 8 días y luego disminuye un poco y se mantiene más o menos constante, a los 20 días las partículas se encuentran frente a la barra del EPB cuando el viento es del N y NW (Figs. 19, 20). En la zona del arroyo el Gallo, cuando el viento es del N y NW, las partículas siguen la isóbata de los 10 m hacia el CPB, la dispersión aumenta un poco los primeros 5 días, para después disminuir hasta un 30% del original, cuando ya se encuentran viajando paralelas a la costa de Punta Banda, llegando hasta la isóbata de los 50 m mientras que para el viento del W (Fig. 21) el área solo disminuye un 10 %, aunque solo se mueve hasta la isóbata de los 20 m. Las partículas en el centro de la BTS, se mueven al exterior a muy baja velocidad, pues solo llegan hasta la boca sur de la BTS, con dispersión nula y solo aumentando un poco al final del periodo.

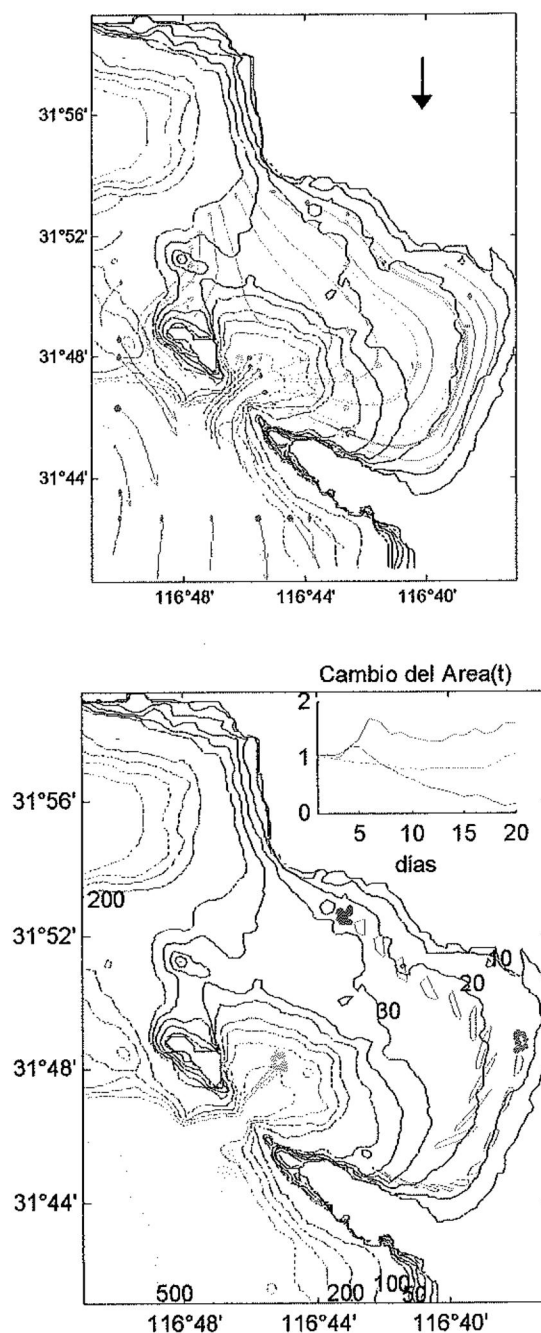


Fig. 19 .- Experimento con lagrangeanos (viento norte). Arriba, trayectorias (ver tabla II para descripción). Abajo, dispersión de contaminantes en el P. del Sauzal, Arroyo el Gallo, y bahía central, en el recuadro se muestra el cambio del area con el tiempo. La flecha indica la dirección del viento.

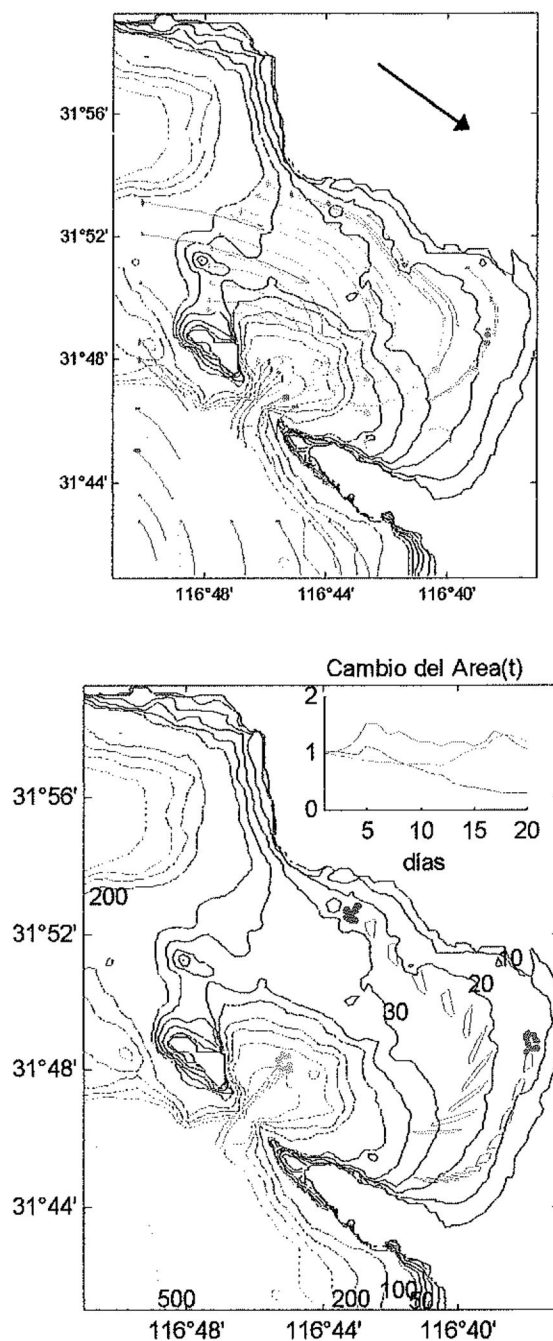


Fig. 20 .- Experimento con lagrangeanos (viento noroeste). Arriba, trayectorias (ver tabla II para descripción). Abajo, dispersión de contaminantes en el P. del Sauzal, Arroyo el Gallo, y bahía central, en el recuadro se muestra el cambio del area con el tiempo. La flecha indica la dirección del viento

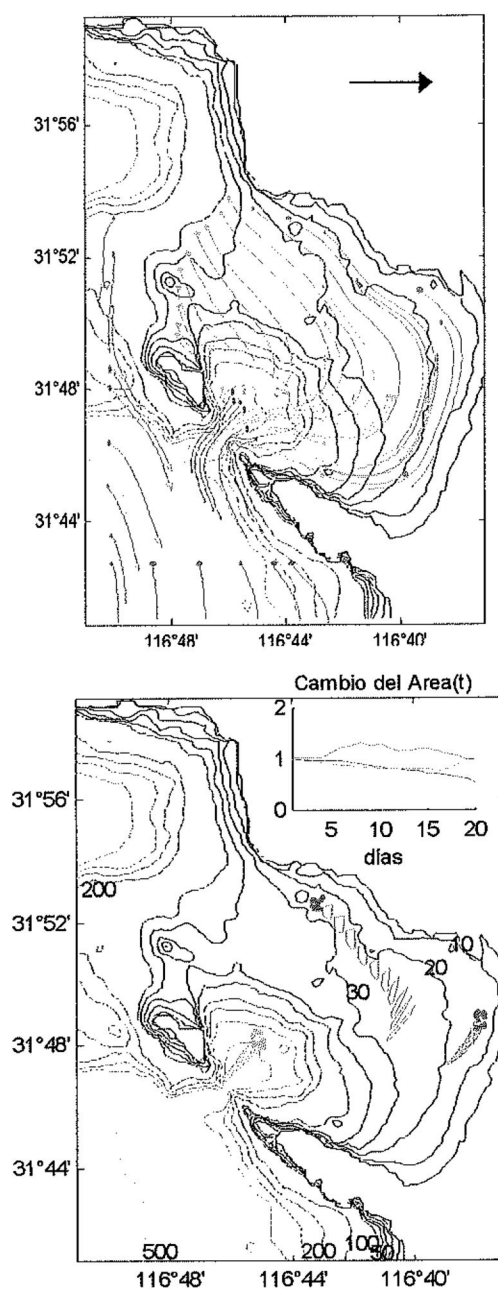


Fig. 21 .- Experimento con lagrangeanos (viento oeste). Arriba, trayectorias (ver tabla II para descripción). Abajo, dispersión de contaminantes en el P. del Sauzal, Arroyo el Gallo, y bahía central, en el recuadro se muestra el cambio del área con el tiempo. La flecha indica la dirección del viento.

2.2.2. Invierno

El grupo amarillo, verde y el rosa, se mueven hacia el exterior del dominio, por la zona norte a gran velocidad, siguiendo la línea de costa, al igual que el grupo azul celeste cuando el viento proviene del S (Fig. 22), sin embargo este grupo permanece girando en el interior de la BTS, cuando el viento es del SW (Fig. 23). El grupo rojo, se mueve hacia el interior de la BTS hasta la isóbata de los 200 m, excepto las partículas cercanas a Punta Banda, que se mueven paralelas a esta hasta la isóbata de los 50 m, esto cuando el viento es del Sur, pero cuando proviene del SW, permanecen quietas tratando de alinearse a Punta Banda. El grupo azul, no entra a la BTS, moviéndose hacia el norte o al oriente siguiendo la frontera abierta.

En los experimentos de dispersión, se encontró que para las partículas en el centro de la BTS, el transporte es mínimo, sin embargo el área aumenta mas del 50 %, sin variar la posición. Para el arroyo el Gallo, con vientos del SW (Fig. 23) las partículas se mueven hasta Punta Morro, disminuyendo el área hasta un 50 %, mientras que para el viento del S (Fig. 22), se mueven sobre la isóbata de los 10 m hasta el puerto del Sauzal, primero disminuye el área, después de los 10 días aumenta hasta un máximo de 40 %, para disminuir después de los 15 días hasta un 50 % del original. Las partículas del Puerto del Sauzal, cuando el viento es del S, salen de la BTS disminuyendo 50% su área y llegando hasta la frontera noroeste del dominio, cuando el viento es del SW el transporte es mucho menor llegando solo hasta Punta San Miguel y el área aumenta los primeros 7 días, manteniéndose constante el resto del tiempo. Después de los 15 días el área aumenta drásticamente.

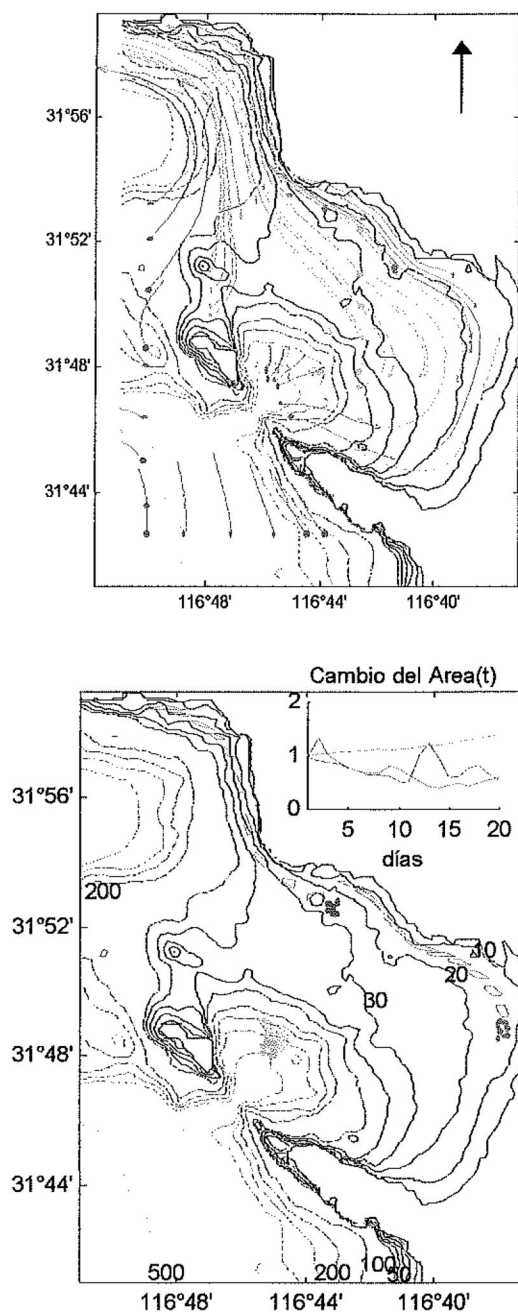


Fig. 22 .- Experimento con lagrangeanos (viento sur). Arriba, trayectorias (ver tabla II para descripción). Abajo, dispersión de contaminantes en el P. del Sauzal, Arroyo el Gallo, y bahía central, en el recuadro se muestra el cambio del area con el tiempo. La flecha indica la dirección del viento.

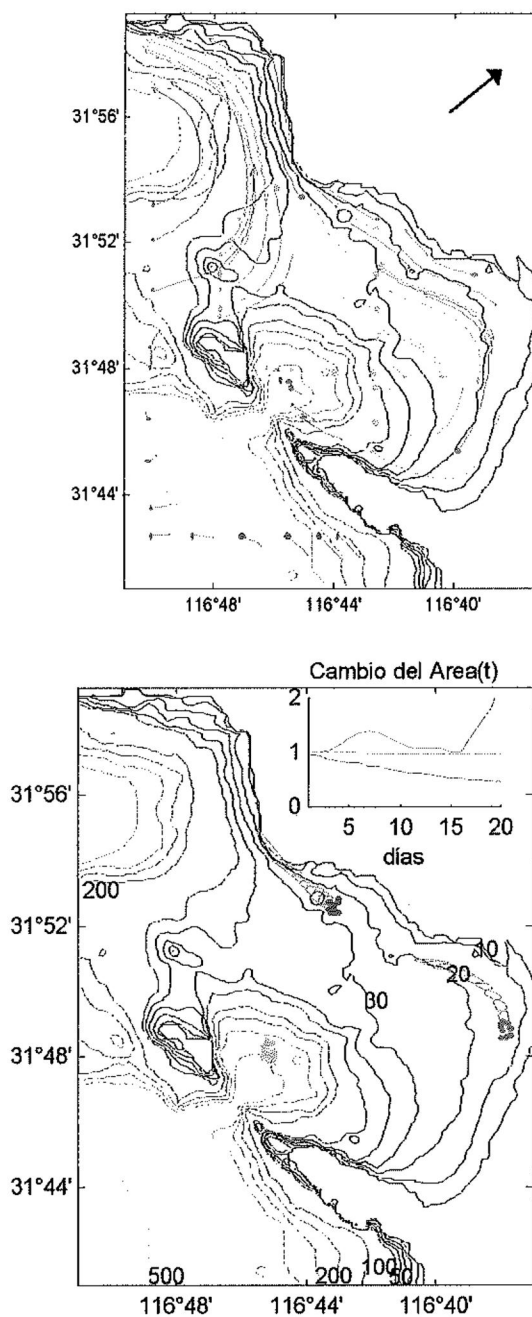


Fig. 23 .- Experimento con lagrangeanos (viento suroeste). Arriba, trayectorias (ver tabla II para descripción). Abajo, dispersión de contaminantes en el P. del Sauzal, Arroyo el Gallo, y bahía central, en el recuadro se muestra el cambio del area con el tiempo. La flecha indica la dirección del viento.

2.2.3. Santana

En este caso (Fig. 24) el grupo azul y verde, salen del dominio, por la frontera oeste, con excepción de las partículas del grupo azul que se encuentran en la frontera sur, las cuales se mueven hacia el noroeste. El grupo amarillo, gira y se dirige hacia el exterior del dominio, la mayoría de las partículas no alcanzan a salir del dominio. El grupo azul celeste y el rosa, se mueven paralelos a la costa norte de la BTS, llegando hasta San Miguel. El grupo rojo, se mueve al interior de la BTS, perpendicular a las isóbatas, pero no llegan sino hasta la isóbata de los 200 m.

La dispersión en el puerto del Sauzál, es negativa llegando a áreas menores aun decimo del area original después de los 15 días; por el contrario en los experimentos en el arroyo el Gallo y al oriente de las ITS, la dispersión es positiva, alcanzando en el caso de las partículas en la ITS áreas mayores al doble del area original sin siquiera haber cambiado de posición.

2.3. Marea

El residual de marea se calculo por medio de la ecuación (4), al promediar el periodo de la componente semidiurna ($M2 \cong 12 \text{ hr}$), durante 40 ciclos. La elevación (Fig. 25) es constante en todo el dominio siendo de 2 mm sobre el nivel medio del mar, con excepción de la frontera abierta donde es nula y las regiones al noroeste y sureste del dominio, donde se observan elevaciones mayores a los 3 mm.

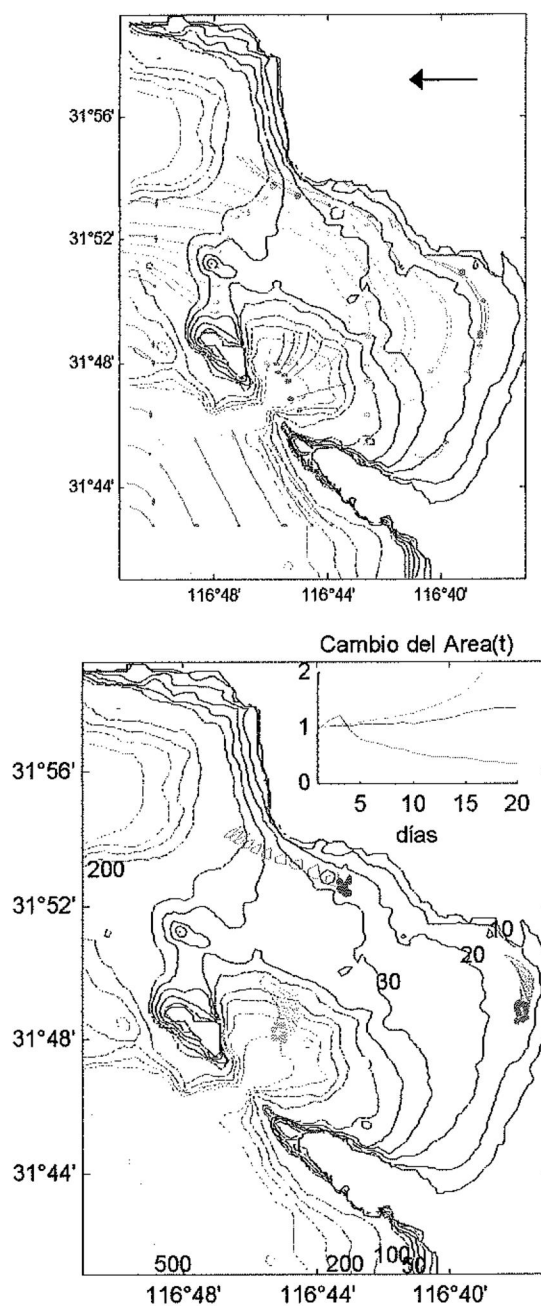


Fig. 24 .- Experimento con lagrangeanos (viento este). Arriba, trayectorias (ver tabla II para descripción). Abajo, dispersión de contaminantes en el P. del Sauzal, Arroyo el Gallo, y bahía central, en el recuadro se muestra el cambio del area con el tiempo.

Es de llamar la atención el giro anticiclónico (Fig. 25) en la zona noroeste del dominio donde se alcanzan velocidades hasta de 1.4 cm/s. Así mismo el gradiente de velocidad en la vecindad de este, ya que en el resto del dominio la magnitud de velocidad es menor a 0.1 cm/s. En todo el dominio se observan tendencias anticiclónicas (Fig. 26) y ciclónicas solo en la zona costera. Otros núcleos de alta velocidad se encuentran asociados al Bajo de San Miguel y a la zona al sur de Punta Banda, aunque sólo se alcanzan velocidades de 0.6 cm/s y 1 cm/s respectivamente.

El campo de vorticidad (Fig. 26) confirma lo antes notado, al observarse vorticidad positiva en la zona costera y negativa después de la isóbata de los 30 m aproximadamente. Asociado al bajo de San Miguel se observa una zona de vorticidad positiva, además de una franja de tendencias ciclónicas (vorticidad positiva) desde Punta San Miguel, hacia la frontera abierta. El campo de divergencia (Fig. 26) en general es negativo, convergiendo solamente en algunas zonas de la costa norte y en los alrededores del bajo de San Miguel.

3. DISCUSIONES.

3.1. Residuales de Viento

Se observa una relación entre la dirección del viento y elevación del nivel medio del mar, pues la máxima elevación siempre se encuentra en la zona opuesta a la dirección del viento, y de la misma manera la mayor depresión se encuentra en la zona aledaña a de donde proviene el viento. De lo cual resulta que, el viento al actuar apila a las partículas de agua en la dirección en la que este se dirige y al encontrar un obstáculo como es una frontera cerrada, produce acumulación de agua en la zona, que se refleja como elevación positiva, lo mismo ocurre en la zona de cercana a la dirección del viento, pues al no haber una

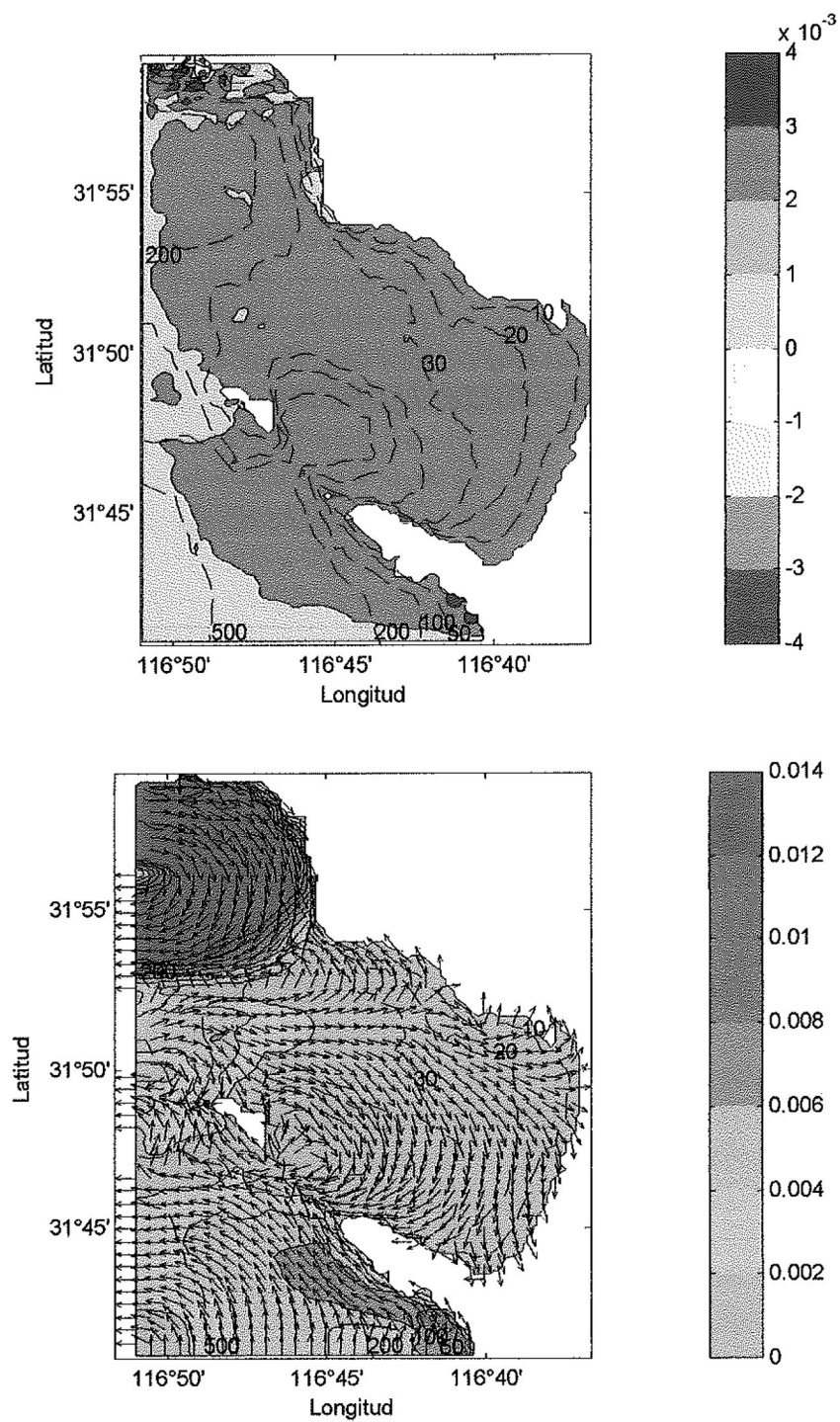


Fig. 25.- Experimento forzado con la componente semidiurna de la marea (M2). Arriba, contornos de elevación del nivel del mar (m). Abajo, corrientes residuales (m s⁻¹).

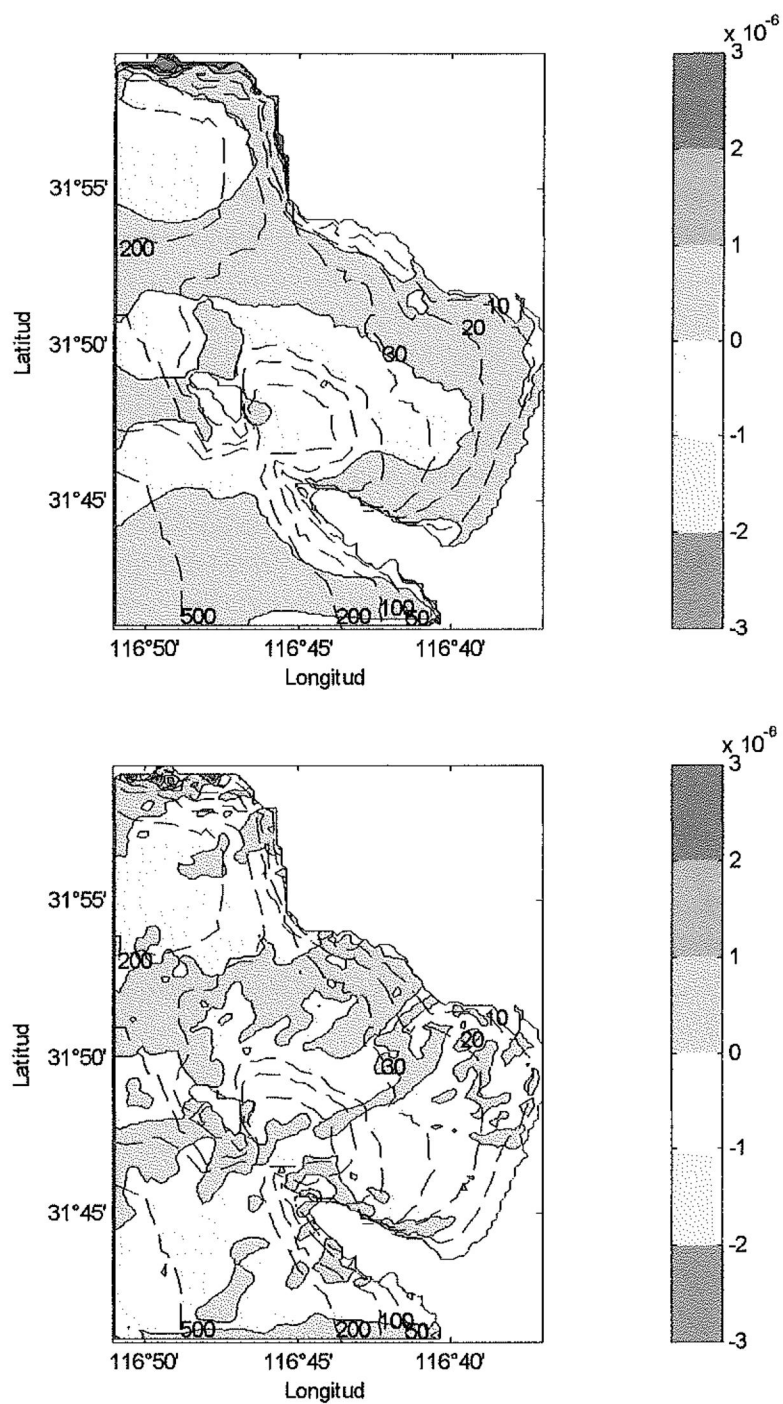


Fig. 26 .- Experimento forzado con la componente semidiurna de la marea (M2). Arriba, campo de vorticidad (ms^{-1}). Abajo, campo de divergencia (m s^{-1}).

frontera cerrada que impida el flujo del agua esta se aleja para acumularse en otro lugar. Esta relación también fue observada por Gavidia (1988). Cuando el viento forzante proviene de alguna de las fronteras abiertas NW, W, SW, o S (Figs. 9, 11, 13, 15), no se observan descensos importantes debido a la conservación de masa.

En general se observa claramente una variación estacional con dos patrones de circulación distintos uno para el verano de norte a sur y otro para el invierno del sur hacia el norte. También se aprecia que para vientos opuestos, las patrones de elevación y circulación son opuestos, por ejemplo para el norte y el sur, los patrones son exactamente iguales, pero en el caso de la circulación la dirección es opuesta, mientras que las isolineas de elevación son iguales, pero donde hay elevación para un caso en el opuesto hay pérdidas y viceversa (Figs. 7, 13). En la zona del norte del dominio, se forma un giro delimitado por la batimetría de la zona, donde en general hay altas velocidades (excepto para el experimento con viento del E y W), y su interacción con el interior de la BTS, se puede ver reflejada en las altas velocidades en la zona norte del dominio.

Frente a Punta San Miguel, Punta Morro, y a la boca del EPB, se observaron las más altas velocidades para todos los experimentos, Argote et al., (1991) observo las más altas velocidades en la costa norte de la BTS, aunque no aparecían en forma de núcleos debido al tamaño de la malla utilizada. Estos núcleos se pueden explicar por medio de efectos topográficos y de la línea de costa, por ejemplo en PSM, el flujo intenta seguir la línea de costa, pero la punta aunque no es muy prominente, produce un cambio en la dirección del flujo de cerca de 270° , por lo que el flujo para satisfacer la ecuación de conservación de masa, tiende a acelerarse; en Punta Morro, ocurre un proceso similar, además de la

presencia de bajos, que producen aceleración en el flujo al reducir la profundidad; mientras que frente a la boca del EPB, donde no existe una punta, o cambios repentinos de profundidad, aun así la profundidad es muy poca, y la pendiente baja, por lo que el volumen de agua que puede pasar a un tiempo por la columna es reducido, y como consecuencia se aumenta la velocidad; en los experimentos realizados con el modelo, no se incluyó el EPB, por lo que al menos en la zona cercana, el patrón sería afectado, por la circulación interna del EPB. La zona al oriente de las ITS, presentó la dinámica mas baja con velocidades menores a 0.1 cm/s; debido a la profundidad y que sin importar el forzamiento que se le aplique siempre estará en una zona mas o menos bien protegida.

La estructura de vorticidad y divergencia, son muy semejantes en todos los casos, también se aplica el carácter inverso entre vientos opuestos. Los valores encontrados para estas variables del orden de 10^{-6} . Al analizar los campos de vorticidad se observa en todos los casos, vorticidad de signo opuesto sobre la costa al resto del dominio, esto se puede relacionar a mecanismos de tipo A, sin embargo la zona de playas municipales donde se observa la menor pendiente, la zona afectada por la vorticidad es mas angosta que en el resto del dominio, esto indica que la fuerza de fricción sola no es suficiente para formar estas estructuras, siendo que la configuración de la línea de costa juega un papel muy importante en su formación. Otra región donde se pueden observar claramente procesos generadores de vorticidad es sobre el bajo de San Miguel, ya que al disminuir repentinamente la profundidad, el flujo experimenta un torque, según los mecanismos tipo B. En la ITS, esperaríamos observar patrones del tipo A para remolinos de Isla, sin embargo estos no aparecen al menos no claramente, debido a que el patrón descrito por Robinson (1983), es en un flujo ideal, sin vorticidad inicial, con una isla circular, y profundidad constante en los alrededores de esta, para el caso de la ITS, ninguna de estas características se cumple, por ejemplo

la cercanía del CPB, ocasiona la interacción de otros mecanismos como el tipo B por los cambios de profundidad.

El campo de divergencia muestra en general dos zonas, dividiendo el dominio aproximadamente a los $31^{\circ}50'$ N, la zona sur es muy homogénea, mientras que en la norte aunque se puede observar una tendencia, aparecen zonas de signo opuesto, esto debido a que la zona sur es mas profunda que la zona norte, en donde los cambios de profundidad, aunque menores, tienen un mayor efecto sobre la columna de agua. En general, se puede apreciar que el flujo diverge al entrar a la BTS, y converge al salir, debido a lo angosto de las bocas. A continuación se analizaran casos concretos de la circulación durante el verano, el invierno y en condición Santana.

3.1.1. Condiciones de Verano

La tendencia general es apilar agua en el interior de la BTS, en la zona de playas, coincidiendo con lo reportado por Gavidia (1988), aunque las elevaciones encontradas en los experimentos (Figs. 7, 9, 11) son mayores en algunas ocasiones hasta por 3 o 4 mm que las reportadas por Gavidia, esto pudiera deberse, a la resolución que la malla empleada, sobre todo en la zona somera, y que el dominio es mucho mayor.

El patrón de circulación forzado con viento del N y W (Figs. 7, 9) coinciden con lo propuesto por Argote et al., (1991), observándose altas velocidades (menores en el experimento de viento del oeste) en la costa norte de la BTS, y una corriente de retorno desde la zona de playas municipales, hacia las ITS en el experimento de viento del W. Flujos paralelos a la costa y un giro anticiclónico en el interior de la Bahía

fueron sugeridos con anterioridad por Alvarez-Sánchez, *et al.*, (1988) y Argote (1975), además de inferirse del reporte de García, *et al.*, (1995) ya que en los correntómetros de la ITS y en el CPB, se observan direcciones al sur, sin embargo en los correntómetros más profundos a partir de los 66 m la dirección es predominantemente hacia el norte aunque a baja velocidad, si recordamos que los experimentos realizados con el modelo son en el modo barotrópico al integrar la columna de agua predominara la dirección con mayor velocidad. Alvarez-Sanchez, *et al.*, (1988) observo para vientos del oeste, trayectorias hacia el oriente y luego al norte paralelas a PB y la barra del EPB, mientras que en el de García, *et al.*, (1995), para la zona de PB, no observo una dirección predominante, lo que podría estar relacionado con el giro ciclónico observado en la zona, bajo forzamiento del viento del W (Fig. 11) , o incluso del NW (Fig. 9) aunque en este caso el giro se reduce a la zona más somera, frente a Punta Banda.

La vorticidad positiva en la zona costera (Figs. 8, 10, 12) se debe a mecanismos de vorticidad tipo A sobre el bajo de San Miguel a mecanismos tipo B, debido a la pendiente, y a cambios bruscos en la batimetría (bajos). Una zona de vorticidad positiva se extiende desde Punta San Miguel hacia la frontera abierta, siguiendo la zona menos profunda, en el experimento forzado con vientos del W (Fig. 12), debido a la influencia del flujo que va al interior de la BTS, sobre la celda de circulación al norte del dominio. El interior de la Bahía esta dividido en dos zonas, al norte se observa vorticidad negativa, mientras que en el sureste se observa vorticidad positiva debida al mecanismo A y como consecuencia se observan dos giros ciclónicos frente a Punta Banda, el primero cerca de la barra del EPB y el segundo en el extremo de PB, en la entrada sur de la Bahía.

El sur de la Bahía se comporta como una zona de convergencia (Figs 8, 10, 12), ya que el flujo solo encuentra una salida de la bahía la cual es muy estrecha. Las zonas con menor dinámica para los vientos del N y NW (Figs 7, 9) se encuentran en la zona occidental de la ITS, ya que estas actúan como estructura de protección, en la zona sur del dominio la velocidad disminuye considerablemente debido al aumento de la profundidad. Mientras que para vientos del W (Fig. 11) la velocidad es baja en todo el dominio, presentando velocidades altas solo sobre la costa norte de la Bahía.

3.1.2. Condiciones de Invierno

Las máximas variaciones del nivel del mar encontradas, corresponden al viento del SW (4 mm), en ambos casos en la costa norte, en las inmediaciones al puerto de Ensenada (Figs. 13, 15). Mientras que descensos en el nivel del mar solo en algunas regiones protegidas, como la costa norte de Punta Banda, y de las Islas, además del bajo de San Miguel, donde no sobrepasa de 1 mm por debajo del nivel medio del mar; mientras que para viento del S (Fig. 13), hay 3 mm por debajo del nivel del mar, y toda la zona sur de la BTS pierde por lo menos 1 mm.

Se establece una circulación del sur al norte, en un giro ciclónico, es decir, de manera invertida al verano, observado también por Argote et al., (1991); en el experimento con viento del SW (Fig. 15) se encuentran los tres núcleos de velocidad máxima en la zona norte que se observaron durante el verano, con vientos del N y NW, generados por procesos similares, sin embargo la dirección de la corriente es opuesta. Una vez mas mecanismos de tipo A producen características anticiclónicas, sobre toda la zona costera de la BTS y sobre la región norte de las ITS (Figs. 14, 16), García *et al.*, 1995, observo en invierno direcciones hacia el oriente en la costa norte de la ITS. El cinturón de vorticidad negativa que se observa en el experimento con vientos del suroeste (Fig. 16) desde Punta Banda, pasando por las Islas, cubriendo

el bajo de San Miguel, y extendiéndose hasta la costa norte entre el Sauzal y San Miguel, es producido por mecanismos tipo B al pasar de una zona profunda a una somera al acercarse a las Islas por la zona sur, mientras que en la parte norte el giro anticiclónico al oriente de las ITS, producido por un mecanismo tipo A, donde García *et al.*, (1995) no encontró una dirección dominante, forman el extremo norte del cinturón. Hacia el occidente de las Islas se observan tendencias ciclónicas, debido a la pendiente batimetría (mecanismo A). Sobre el bajo de San Miguel, una vez mas para ambos forzamientos el mecanismo B produce la zona de vorticidad negativa.

En el experimento con vientos del sur (Fig. 14), la zona al norte de las Islas y el Bajo de San Miguel presentan vorticidad negativa, provocada por un proceso generador de vorticidad del tipo de A, ya que la Isla norte se comporta como una punta.; mientras que en el bajo de San Miguel, se observa el mecanismo B, obteniendo vorticidad ciclónica en la parte profunda y anticiclónica en la somera

3.1.3. Condición Santana

En el experimento realizado bajo condición Santana (Fig. 17) se encontró una disminución general del nivel medio del mar, por el contrario, en la zona oriental del dominio en el interior de la Bahía, se observa un bajo de 4 mm, y disminuyendo el descenso hacia las fronteras abiertas del dominio siguiendo de forma casi paralela las isóbatas cuando menos hasta los 30 m, y solo en la zona sur del dominio existe elevación positiva siendo menor a 1 mm.

La circulación general (Fig. 17) es de sur a norte, con comportamiento ciclónico, y velocidades máximas en la zona norte de la BTS entre Punta San Miguel y Punta Morro (0.8 cm/s). Argote *et al.*, (1991) encontró también las máximas velocidades en la zona norte del dominio, además de un giro

anticiclónico en la costa oriental del dominio, en el experimento realizado se observó la misma tendencia, salvo que el giro anticiclónico aparece mejor definido, y acompañado de un segundo giro de menor dimensión en el extremo de Punta Banda, el cual no aparece en los resultados de Argote, esto pudiera deberse a la baja velocidad presente en la región en ambas simulaciones, y que en el experimento realizado la malla es menor por lo que se pueden definir estructuras mas pequeñas. Al igual que en el experimento con viento del oeste, se forma una estructura de tipo C al observarse tendencias anticiclónicas (Fig. 18) al oriente del CPB, y ciclónicas hacia las ITS,

Se puede observar, por la costa norte de la Isla, una fuerte influencia del giro ciclónico del interior de la Bahía, mientras que por la costa exterior, el flujo intenta seguir las isóbatas, adquiriendo vorticidad anticiclónica por el mecanismo A. Mientras que en el bajo de San Miguel, se observa vorticidad negativa en la zona somera y positiva en la circundante debido al mecanismo B.

3.2. Trayectorias Lagrangeanas

La utilidad de observar trayectorias lagrangeanas, radica en que podemos conocer la posición en el tiempo de determinada parcela de agua; directamente estas mediciones son realizadas con boyas de deriva o flotadores, que son ubicados desde la costa (por teodolito, radar, etc.), este tipo de mediciones tienen algunas limitaciones, como por ejemplo el periodo de observación es muy corto, y que no solo la corriente ejerce fuerza sobre la boya, sino otros factores como el mismo viento, oleaje entre otros. El simular partículas en base a mediciones eulerianas, proporciona algunas ventajas aunque también algunos inconvenientes. Por ejemplo se puede seguir una boya durante mas tiempo, y además aumentar el numero de estas, una característica importante es que la trayectoria de la partícula marcada, no es afectada, por otros forzamientos como viento y el oleaje. Estas simulaciones también tiene sus inconvenientes, por

ejemplo el viento durante el experimento se mantiene constante, y el despreciar la velocidad de Stokes, que para el experimento realizado con M2 es del orden de 10^{-2} velocidad comparable con las velocidades eulerianas obtenidas por el modelo, razón por la que no se calcularon trayectorias para esta simulación.

Las mediciones reales de boyas de deriva en la BTS, consideran tiempos de observación cortos, por ejemplo Alvarez-Sanchez et al., (1991), realizo experimentos con arreglos de 2 a 3 crucetas de deriva, durante periodos no mayores de 10 hrs, en la zona de playas en el interior de la BTS, en los meses de marzo a agosto y de septiembre a enero, por lo que es difícil realizar comparaciones.

En el verano (Figs. 19, 20, 21) en el interior de la BTS, el transporte es hacia el sur del dominio siguiendo las isóbatas de 10 y 20 m, mientras que a mayor profundidad, tienden a ser perpendiculares a las isóbatas, Alvarez-Sanchez et al., (1991), en sus experimentos en la zona norte observo tendencias de las crucetas a seguir la isóbata de 10 m hacia el sur. Mientras que en la zona sur, con vientos variables encontró trayectorias paralelas a Punta Banda, que seguían por la barra del EPB, pese a que estas trayectorias no se observan en los experimentos realizados, en el campo de velocidad residual forzado con viento del oeste (Fig. 11), se observa un giro ciclónico en la zona, que podría muy bien relacionarse con tales trayectorias. Para el resto de la zona no hay observaciones; En general las trayectorias del experimento tienden a ir hacia el interior de la BTS y acumularse en la zona sur sobre el CPB, donde el transporte es mucho menor.

En el caso del invierno las observaciones realizadas por Alvarez-Sanchez et al., (1991), no describen el patrón encontrado en los experimentos con viento del Sur y Suroeste (Figs. 23, 24), donde el

transporte es muy alto en la región norte siguiendo las isóbatas, y bajo en la región sur sobre el CPB, estas diferencias pudieran ser debido a la alta variabilidad de las direcciones del viento durante el invierno. El experimento realizado con vientos del Este, muestra trayectorias similares a las encontradas durante el invierno, al menos en el interior de la BTS, en la región norte el grupo verde sale por completo del dominio, mientras que el grupo amarillo permanece en la zona de inicio.

Ante la problemática de conocer el destino del material descargado en el mar ya sea por descarga residual, o dragado, se realizaron experimentos de dispersión de partículas, esta se presento como una proporcion del cambio del area con respecto al area original, las tres zonas elegidas, fueron el Puerto del Sauzal, el Arroyo el Gallo y frente a las ITS. Para los experimentos de verano forzados con vientos del N, NW, y W (Figs. 19, 20, 21). Las partículas marcadas en el Puerto del Sauzal de Rodríguez, presentaron la máxima dispersión alcanzando el doble del área original, mientras que aquellas liberadas sobre el arroyo el Gallo, redujeron su área a menos de la mitad ambas moviéndose hacia el sur siguiendo las isóbatas de 20 y 10 m respectivamente. En los experimentos de Invierno realizados con vientos del S y SW (Figs. 22, 23), el transporte fue hacia el norte, para el Puerto del Sauzal y el Arroyo el Gallo, y el área de las partículas presento tendencia a disminuir, no obstante presentaron algunos incrementos y decrementos después de los 10 días. Para el experimento con vientos del E (Fig. 24), la dispersión en el Puerto del Sauzal es negativa, mientras que para el Arroyo el Gallo es la dispersión es positiva llegando a ocupar un área dos veces mayor, con un desplazamiento hacia el norte muy reducido. Las partículas frente a ITS, en todos los casos presentan un desplazamiento muy reducido, y dispersión positiva alcanzando, para el experimento con vientos santana. En el experimento realizado con vientos del SW, a partir de los 15 dias, las particulas que partieron del P. del Sauzal, presentan un gran aumento de area, esta se debe a que al

moverse muy cerca de la Punta de San Miguel, algunas partículas son atrapadas, por la estructura de vorticidad presente, quedando muy cerca de la orilla, por lo que las áreas son superestimadas.

3.3. Residuales de Marea

Las simulaciones de circulación residual (Fig. 25), el orden de magnitud es de 10^{-2} m/s sobre la zona norte del dominio y en el interior de la BTS de 10^{-3} , en general muestran una gran similitud con los encontrados por Gavidia (1988), con ordenes de 10^{-4} . las máximas magnitudes se encuentran en la zona noroeste del dominio zona que Gavidia no incluyo en su experimento, en el resto del dominio la diferencia es solo de un orden de magnitud, lo que se debe a la malla empleada.

Se puede observar en la costa norte desde San Miguel hasta Punta Morro tendencias ciclónicas (Fig. 26), de igual manera sobre la costa sur entre las ITS y punta Banda un giro anticiclónico, esto en general presenta características de vorticidad tipo C, donde la causa del torque es la fricción con las paredes, mientras que la fricción del fondo solamente reduce la magnitud del giro, así en la costa norte (somera), solo se observan algunas tendencias, mientras que en el sur donde las profundidades lo permiten aparece un giro anticiclónico bien desarrollado. La zona de vorticidad positiva sobre la costa norte se extiende en el interior de la BTS, debido a la combinación del mecanismo A, donde la fricción del fondo ejerce un torque hacia la costa, incluso siendo más importante que el mecanismo C, sobre la Península de Punta Banda.

Predomina la divergencia negativa (convergencia) en todo el dominio (Fig. 26), observándose solo sobre la costa norte en el interior de la Bahía zonas de divergencia positiva ya que en esta zona el flujo se

divide en dos corrientes debido a la estructura tipo C antes explicada. Las ITS, son afectadas por el giro anticiclónico sobre el CPB, y por la zona de vorticidad positiva sobre el bajo de San Miguel, al norte de las primeras, por lo que no se aprecia claramente las características típicas de la circulación de las islas descrita por Robinson (1983), por ejemplo en la costa occidental de las ITS, el mecanismo A produce la zona anticiclónica y al norte de las islas es el mecanismo tipo B el que produce la zona ciclónica esto se puede apreciar en la fig (26).

La escasa elevación (Fig. 25) así como las bajas velocidades observadas en el dominio comparadas con las producidas por el viento son debido a que la marea en este caso la componente semidiurna tiene un periodo al cabo del cual el flujo cambia en dirección, conservando aproximadamente la misma magnitud, por lo que al obtener la velocidad residual es muy baja es debido a la doble acción de la marea. Gavidia (1988), también observo que las corrientes inducidas por la marea, fueron mucho menores que las inducidas por el viento.

4. CONCLUSIONES

El modelo reprodujo bastante bien la circulación barotrópica en la BTS, en los experimentos realizados, encontrando comportamientos similares a los reportados por Argote et al., (1991), y las observaciones de García *et al.*, (1995).

La BTS, en general presento variación estacional con dos tipos de circulación una en verano del norte hacia el sur, y otra en Invierno del sur hacia el norte; bajo condiciones Santana, la tendencia de sur a norte se mantuvo, sin cambios trascendentes. Se observo que el interior de la BTS esta controlado por un giro ciclónico en invierno, y anticiclónico en verano.

La vorticidad juega un papel muy importante en la generación de remolinos, por lo que se propone que en siguientes estudios se lleve a cabo un análisis matemático detallado de los mecanismos generadores de la vorticidad. Del primer análisis realizado se sugiere que los principales mecanismos que actúan en la BTS, son del tipo A y B. Donde los cambios batimétricos y la fricción del fondo y paredes en las fronteras cerradas son los principales agentes generadores de vorticidad. Siendo ejemplos típicos la zona costera y el bajo de San Miguel.

La circulación inducida por la marea no es importante comparada con la inducida por el viento, sin embargo experimentos donde se incluyan ambos forzamientos deben de realizarse para conocer la respuesta de la BTS a estos. Sobre todo la circulación que ocurre en la región norte del dominio fuera de la BTS, afecta en general a la circulación interna por lo que se sugiere sea incluido en futuras simulaciones.

La simulación de trayectorias lagrangeanas por este medio, resulto una muy útil herramienta, con ventajas sobre las mediciones directas, obteniéndose resultados similares a los reportados con anterioridad por Alvarez *et al.*, (1988). Las trayectorias simuladas tienden a seguir las isobatas en la zona somera, mientras que en la zona profunda las cruzan perpendicularmente.

La dispersión durante el verano fue positiva en el Puerto del Sauzal y el Arroyo el Gallo, y negativa en la zona de descarga del material dragado, al centro de la BTS, en el invierno el proceso fue inverso, siendo negativa en el P. del Sauzal y el A. El Gallo, y positiva en la zona de descarga. Durante condiciones Santana fue positiva en el A. el Gallo y en la zona de descarga del material dragado.

En la zona costera el transporte fue alto, y las variaciones de área al paso del tiempo bajas y solo en la zona de descarga en el CPB, donde el transporte es muy bajo, para los casos sobre la costa el transporte es más importante que la dispersión resulto el transporte realizado por las partículas marcadas, ya que en el caso del centro de la BTS, el transporte fue mínimo bajo todos los forzamientos, y aun con baja dispersión el material arrojado a la zona permanece ahí durante un largo periodo.

5. LECTURA CITADA.

- Alvarez-Sanchez, L. G. Medición de Corrientes Superficiales en la Bahía de Todos Santos, B. C. Tesis de Licenciatura. FCM. UABC. 1971
- Alvarez-Sanchez, L. G., Vientos en la Bahía de Todos Santos, Baja California, Ciencias Marinas, Vol. 4 Num 1, 1977.
- Alvarez-Sánchez, L. G., R. Hernández-Walls, y R. Durazo-Arvizu., Patrones de Deriva de Trazadores Lagrangeanos en la Bahía de Todos Santos. Ciencias Marinas 14(4):135-162, 1988.
- Argote-Espinoza, M. L., A. Amador y C. Morales. 1975. Distribución de los parámetros salinidad y temperatura y tendencias de circulación en la Bahía de Todos Santos, B. C. Memorias de la primera reunión del CIBCASIO, 3-30.
- Argote-Espinoza, M. L., F. J. Gavidia-Medina y A. Amador-Buenrostro, Wind Induced circulation in Todos Santos Bay, B.C. Mexico. Atmósfera. Vol. 4, pp 101-115. 1991.
- Barrera Gaona, J. A., Patrón de Dispersión de Sedimentos en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México. Tesis de Licenciatura. FCM. UABC. 1998.
- Blumberg, A. F., G. L. Mellor., A Description of a three-dimensional coastal Ocean Models. en Three-dimensional coastal ocean models, editado por N.S. Heaps. American Geophysical Union. Washington, D.C. 1987.
- Blumberg, A. F., y G. L. Mellor, A coastal ocean numerical model, in Mathematical Modelling of Estuarine Physics, Proc. Int. Symp., Hamburg, August 24-26, 1978. Editado por J. Sundermann y K. -P. Holz, 203-214, Springer-Verlag, Berlin, 1980.

- Blumberg, A. F., R. P. Signell, and H. L. Jenter., Modelling Transport Processes in the Coastal Ocean, J. Marine Env. Engg. Vol. 1, pp 31-52. 1993.
- Crean, P. B., A Numerical Model of Barotropic Mixed Tides between Vancouver Island and the Mainland and its relation to studies of the Estuarine circulation, en *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords: Proceedings of the 9th International Liege Colloquium on Ocean Hydrodynamics*, editor C.J. Nihoul. pp 283-313. Elsevier, Nueva York, 1975.
- Cruz-Colin, María Esther. Variabilidad de Temperatura del mar en la Bahía de Todos Santos, B. C. México. Tesis de Maestría. FCM. UABC. 1997.
- Durazo-Arvizu, R., Circulación Superficial y Cinemática de la Región Sur de la Bahía de Todos Santos, B. C. Tesis de Licenciatura. FCM. UABC. 1983.
- García, J, J. M. Robles, C. Flores, y S. Sánchez, Observaciones de corrientes y temperaturas en la Bahía de Todos Santos, B.C. Durante enero-marzo de 1994, Inf. CTOFT9505, 75 pp., CICESE., Oceanografía Física., Ensenada, B. C., 1995.
- García, J, J. M. Robles, C. Flores, y S. Sánchez, Observaciones de corrientes y temperaturas en la Bahía de Todos Santos, B.C. Durante mayo-octubre de 1994, Inf. CTOFT9508, 72 pp., CICESE., Oceanografía Física., Ensenada, B. C., 1995.
- García, J, J. M. Robles, C. Flores, y S. Sánchez, Observaciones de corrientes y temperaturas en la Bahía de Todos Santos, B.C. Durante septiembre-noviembre de 1994, Inf. CTOFT9509, 61 pp., CICESE., Oceanografía Física., Ensenada, B. C., 1995.
- Gavidia-Medina, F.J., Simulación Numérica de la Circulación Barotrópica en al Bahía de Todos Santos, Tesis de Maestría, 94 pp., CICESE. Ensenada, B.C., Nov. 1988.

- González-Villagran, Adriana., Reevaluación de los Estudios utilizados para el diseño del puerto de Ensenada, B. C., Tesis de Licenciatura. FCM. UABC. 1992.
- Hernández Walls, R. circulación inducida por el viento en la zona costera. Tesis de Licenciatura. FCM. UABC. 1986.
- Longuet-Higgins, M.S., On the Transport of Mass by Time-Varying Ocean Currents, Deep-Sea Research., 16 pp 431-447, 1969.
- Orlanski, I., A Simple Boundary Conditions for unbounded Hyperbolic Flows, J. Comput. Phys., 251-269. 1976.
- Pavia, E. y S. Reyes., Variaciones Espaciales y Estacionales del Viento Superficial en la Bahía de Todos Santos, B. C., Ciencias Marinas, Vol. 9 (1), pp 151-167, 1983.
- Pavía-López, E. G. Brisas en la Bahía de Todos Santos, B. C. durante los meses de marzo a agosto de 1978. Tesis de Licenciatura. FCM. UABC. 1979.
- Pond, Stephen, y George L. Pickard. 1978. Introductory dynamic oceanography. pp 241. Pergamon. Nueva York. EUA.
- Robinson, I.S., Tidally induced residual flows, en Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas, editado por B. Johns, pp 321-356, Elsevier, Inglaterra. 1983.
- Rodríguez Pérez, C. Análisis numérico de Oscilaciones inducidas en la Bahía de Todos Santos. Tesis de Licenciatura. FCM. UABC. 1996.
- Yanagi, T., Fundamental Study on the Tidal Residual circulation-I, J. Ocean. Soc. Japan. Vol. 32. pp 199-208, 1976.

- Zimmerman, J.T.F., Dispersión by tide-induced Residual Current Vortices, en Hydrodynamics of Estuaries and Fjords: Proceedings of the 9th International Liege Colloquium on Ocean Hydrodynamics, editado por C.J. Nihoul. pp 206-215, Elsevier, Nueva York. 1977.
- Zimmerman, J.T.F., On the Euler-Lagrange Transformation and the Stokes' Drift in the prescence of Oscillatory and Residual Currents, Deep-Sea Research., 26A. pp 505-520, 1979.