

UNIVERSIDAD DEL MAR

Campus Puerto Ángel



Análisis de circulación y dispersión en la Bahía de Todos Santos, Baja California

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRÍA EN ECOLOGÍA MARINA
PRESENTA:

IRVING GEOVANNI CERVANTES AUDELO

PUERTO ÁNGEL OAXACA, MÉXICO, ENERO DE 2013

Dedicatoria

A mis padres y hermanos porque a pesar de la distancia somos una familia unida.

A mis tías Rommy y Sol por el apoyo.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Reginaldo Durazo (el chief) por brindarme su apoyo, consejos, comentarios y los recursos necesarios para la culminación de este trabajo. A Xavier Flores por la ayuda y comentarios a este trabajo. A Auxilio Esparza por la ayuda en la tesis y facilitar los trámites ante esta universidad. Así también quiero agradecer a todos los miembros que conforman este comité de tesis.

A mis padres por apoyarme incondicionalmente en todo y a mis hermanos porque siempre nos hemos querido y respetado.

Agradecimientos a todo el grupo que conforman a OCOMEX (Observatorio de Corrientes Mexicanas) y al grupo de oleaje de CICESE. Al Dr. Rafael Hernández Walls por la ayuda en la dispersión de partículas y al Dr. Rubén Castro por la ayuda con las boyas de deriva.

A mis compas de la UMAR: Xo, Sarita, Tatiana, Renata, Momia, Tania Ortiz, Cynthia Méndez, Aline Mejía, Ita, Yulang, Elder, Lobato, Almita Mendoza, Genobaby, Karen, Lalo greñas, Rafa, Carmen Méndez, Carlos Gómez.

A mis compas de la UABC y CICESE: Marco, Beatriz Ixetl, Gaby García Rubio, Lili, la Chivis, Mayra Hernández, Reby, Alexis Montserrat, Linda, Suguy, Andy, Mundo, Héctor García Nava, Tenoch, Pedro Osuna, Bernardo, Mony, Jane Raimer, Pamela De Grau, Raciél de Dios, Anita Ramírez, Amaia, Angie, Angie Ramírez.

A mis compañeros y amigos de casa: Vladimir Toro y Cesar Coronado.

A los Morritos Doña Ramona y Don Marcos por recibirme en su casa y tratarme como a un hijo.

Al Dr. Miguel Lavín Peregrina por proporcionarnos las boyas de deriva utilizadas en este estudio.

Al CONALEP plantel Ensenada, por permitirnos un espacio dentro de sus instalaciones para operar una estación de radar.

Gracias al CONACYT por el apoyo de la beca otorgada para realizar este trabajo. Este documento forma parte del proyecto “Estudio de Clasificación de la Bahía de Ensenada, B. C., México” financiado por CONAGUA-CONACYT con no. 143803.

Contenido

	Página
1. Introducción	8
2. Objetivo	11
2.1. Objetivos particulares	11
3. Área de estudio	12
4. Metodología	17
4.1. Advección de partículas.....	18
5. Resultados	24
5.1. Meteorología.....	24
5.2. Corrientes.....	30
5.3. Patrones de dispersión de partículas.....	34
5.4. Eventos extraordinarios	42
5.4.1. Corrientes.....	42
5.5. Boyas de deriva	49
6. Discusiones	53
7. Conclusiones	56
Referencias	57

Lista de figuras

- Figura 1.** Localización de la Bahía Todos Santos (BTS), Baja California. Los acrónimos PE, AG y Cp son Puerto de Ensenada, Arroyo el Gallo y Conalep respectivamente. El triángulo color rojo indica la estación de radar Punta Morro, el azul la estación Conalep y la estrella amarilla la estación meteorológica. La profundidad (metros) de la BTS está codificada en colores..... 14
- Figura 2.** Cobertura espacial y temporal de los datos obtenidos del radar CODAR para el año 2010. a).- Cobertura espacial de las corrientes expresada como porcentaje de datos, los cuadros pequeños de color negro, representan los puntos de malla espaciados cada 1 km ×1 km. b).- Cobertura temporal de las corrientes superficiales, para el año 2010 en la BTS..... 21
- Figura 3.** Boyas de deriva utilizada para los experimentos en la BTS durante el periodo de 2012. El lado izquierdo de la figura muestra una boya Microstar en el agua, de la que pende un papalote colocado a 1.5 m de profundidad, mientras que del lado derecho se muestra el papalote y la boya fuera del agua..... 23
- Figura 4.** Rosas de viento que muestran las direcciones principales (en porcentajes) de las que proviene el viento, para cada época del año. Los triángulos de color azul muestran las direcciones de las que proviene el viento y las magnitudes indican el porcentaje. 26
- Figura 5.** Variables atmosféricas registradas por la estación meteorológica para el año 2010. Las áreas sombreadas de color gris indican los periodos utilizados como representativos de cada una de las estaciones del año, las verdes del evento Extremo y las azules del Santana. 29
- Figura 6.** Flujo medio de las corrientes superficiales de la BTS para cada estación del año, calculado a partir de datos horarios. Los vectores de color indican la magnitud y el sentido de las corrientes. La flecha en la parte superior izquierda de cada panel, representa la escala de un vector con magnitud de 15 cm s^{-1} 32
- Figura 7.** Trayectorias descritas por las partículas advectadas en la BTS, utilizando datos de radar de alta frecuencia. Las líneas de colores representan los trayectos realizados por cada una de las partículas advectadas. 36

Figura 8. Distribución espacio-temporal de las partículas liberadas en la BTS, codificada en colores. La barra de colores representa el porcentaje de partículas observadas en cada localidad para cada una de las estaciones.....	40
Figura 9. Flujo medio de las corrientes superficiales de la BTS para el evento Extremo y el evento Santana, calculado a partir de datos horarios. Los vectores de color indican la magnitud y el sentido de las corrientes. La flecha en la parte superior izquierda de cada panel, representa la escala de un vector con magnitud de 15 cm s^{-1}	44
Figura 10. Trayectorias descritas por las partículas advectadas en la BTS para el evento Extremo y el evento Santana, utilizando datos de radar de alta frecuencia. Las líneas de colores representan los trayectos realizados por cada una de las partículas advectadas.....	46
Figura 11. Distribución espacio-temporal de las partículas liberadas en la BTS para el evento Extremo y el evento Santana, codificada en colores. La barra de colores representa el porcentaje de partículas observadas en cada localidad, para cada evento.	48
Figura 12. Trayectorias descritas por boyas de deriva en la BTS, el Punto de color azul muestra el punto de inicio de las boyas y las líneas rojas con puntos negros, representan los trayectos de cada boya, para la estación de verano.	50
Figura 13. Distribución espacio-temporal de las boyas liberadas en la BTS, codificada en colores. La barra de colores representa el porcentaje de partículas observadas en cada localidad, para la estación de verano.	52

1. Introducción

La zona costera constituye la interface entre el continente y el océano, donde cohabitan distintos ecosistemas como arrecifes de coral, bosques de algas, estuarios, marismas y lagunas costeras (Lalli y Parsons, 1997; Conabio, 2008). Alrededor de la zona costera se desarrollan diversas actividades como el turismo, transporte marítimo, pesca, acuicultura, producción de energía, extracción de hidrocarburos y minerales, entre otras. El desarrollo no planeado de estas actividades puede traer como consecuencia conflictos ambientales, generación de residuos y contaminantes (Conabio, 2008).

Los residuos vertidos a los cuerpos de agua costeros pueden degradar seriamente la calidad del agua y ocasionar problemas de eutroficación (Socolofsky y Jirka, 2005). En las áreas costeras los delicados ecosistemas son algunas veces impactados por residuos vertidos, los cuales afectan a las especies marinas que habitan en la zona y degradan comunidades bénticas (Zamora-Castro *et al.*, 2007; Lalli y Parsons, 1997; Venturini *et al.*, 2008). Las zonas contaminadas pueden perder la estructura de sus comunidades, lo cual puede reflejarse en cambios de la riqueza, dominancia, diversidad y abundancia de especies. Es por esto por lo que organismos oportunistas a menudo dominan el área afectada (Kennish, 2001; De Jonge y Elliot, 2001).

México cuenta con un litoral de ~11,000 km donde el 68% corresponde a las costas e islas del Océano Pacífico y del Golfo de California y el otro porcentaje restante pertenece a las costas, islas y cayos del Golfo de México y del Mar Caribe (Conabio, 2008). México posee una enorme riqueza y biodiversidad de recursos marinos (Contreras-Espinosa y Warner, 2004), los cuales se enfrentan a diversos problemas por el uso de las costas, ya que

la población ejerce fuerte presión sobre los ambientes frágiles y de gran diversidad biológica. Esta presión sobre los ecosistemas pueden llegar a ocasionar la pérdida de hábitats en zonas intermareales, dunas y acantilados debidos a la deforestación y al cambio del uso del suelo para desarrollos urbanos, portuarios y turísticos.

La Bahía de Todos Santos (BTS) se encuentra ubicada en la ciudad costera de Ensenada sobre la costa noroccidental de la Península de Baja California, en el Océano Pacífico, a unos ~80 km al sur de la frontera con los Estados Unidos de América (figura 1). En los últimos años el uso de la BTS se ha incrementado en muchas áreas como la maricultura (ranchos atuneros y diversos cultivos), actividades turísticas (pesca, buceo, surf, etc.), actividades industriales (pesca industrial y procesamiento de los productos obtenidos), así como el incremento de las actividades propias de asentamientos humanos alrededor de ésta. Las actividades de la ciudad de Ensenada pueden constituir un riesgo de contaminación ambiental para la BTS, ya que actualmente está afectada por descargas (domésticas e industriales) y escorrentías agrícolas (Gutiérrez-Galindo *et al.*, 2010; Muñoz-Barbosa *et al.*, 2012). El 90% de las aguas residuales domésticas y de las industrias de la ciudad de Ensenada se descargan a la BTS por medio del efluente el Gallo (Zamora-Castro *et al.*, 2007; Muñoz-Barbosa *et al.*, 2012).

Estudios en la BTS argumentan que la contaminación por materia orgánica está por encima de lo permitido por las leyes mexicanas y que las descargas de materia orgánica en la bahía representa una fuente potencial de contaminación para la zona costera (Segovia-Zavala y Galindo-Bect, 1984). Este tipo de contaminación en la BTS revela cambios estructurales en organismos bentónicos, que son reflejados en la abundancia relativa y diversidad de las especies marinas (Encalada-Fleites y Millán-Núñez, 1990). En las

localidades de El Sauzal, el Puerto de Ensenada y la desembocadura del arroyo El Gallo se han reportado valores de 16 000 coliformes en 100 ml de mayo a agosto (época turística), con influencia de estas hasta 5 km de la costa (Sañudo-Wilhelmy *et al.*, 1984). En otro estudio se reportan patrones similares donde las concentraciones mayores de coliformes y bacterias se observan en la entrada al Puerto de Ensenada y frente al arroyo El Gallo (Portillo-López y Lizárraga-Partida, 1997). Nutrientes como fosfatos (PO_4), nitratos (NO_2) y nitritos (NO_3) alcanzan valores de 5.0, 0.92 y 12 μM , respectivamente, donde las zonas de mayor a menor concentración son la rada del Puerto de Ensenada, El Sauzal y Punta Banda. Esto ocurre fundamentalmente entre los meses de mayo a agosto, que son los meses de mayor producción pesquera y descargas urbanas (Segovia-Zavala *et al.*, 1988). Cerca del Puerto de Ensenada también se han encontrado en organismos concentraciones de plata (Ag) y cobre (Cu) de 0.64-0.27 y 6.72-9.10 $\mu\text{g g}^{-1}$ respectivamente, y se ha sugerido que estas pueden estar asociadas con un impacto antropogénico (Gutiérrez-Galindo y Muñoz-Barbosa, 2001). De igual manera se reportan algunas especies (poliquetos) que son indicadoras de contaminación en la rada portuaria de Ensenada (Encalada-Fleites y Millán-Núñez, 1990).

Los trabajos previamente mencionados para la BTS, describen de forma adecuada la distribución espacial de los contaminantes en la bahía. Sin embargo, estos estudios no proporcionan suficiente información sobre la variabilidad temporal de dichas distribuciones. Una técnica que se utiliza para el estudio de la variabilidad temporal de concentración de sustancias en el océano es la dispersión de partículas (contaminantes, larvas, etc.), ya que provee una estimación directa de los procesos de difusión y advección. Esta técnica se ha probado con éxito en regiones de mar abierto (Poulain y Niiler, 1989;

Falco *et al.*, 2000; Poje *et al.* 2002; Bolt *et al.*, 2012) y en mares semicerrados (Lekien *et al.*, 2005; Coulliette, *et al.*, 2007; Shadden *et al.*, 2009), especialmente cuando se combinan dos o más métodos de medición. Los resultados que se obtienen con el conocimiento de los patrones de dispersión son directamente aplicables en aspectos como el manejo de la zona costera y en la predicción de salud de los ecosistemas costeros (Heemink, 1990; James, 2002).

En este trabajo se estudian los patrones espacio-temporales de dispersión de partículas en la Bahía Todos Santos (BTS), a partir de corrientes superficiales medidas con radares de alta frecuencia. La dispersión se obtiene a partir de la simulación numérica y analítica de las trayectorias que se derivan de las mediciones. Los resultados se discuten en términos de los patrones espaciales de contaminación, descritos anteriormente al interior de la BTS y la posible variabilidad de la salud del ecosistema acuático.

2. Objetivo

Estudiar la dispersión de partículas a partir de mediciones de corrientes superficiales dentro de la Bahía de Todos Santos B. C.

2.1. Objetivos particulares

1. Determinar los principales patrones de dispersión de partículas dentro de la BTS.
2. Obtener parámetros de dispersión de partículas (tiempo de residencia).
3. Caracterizar la variabilidad estacional de la dispersión de partículas en la BTS.
4. Estudiar la conexión de los patrones de dispersión obtenidos con la salud de los ecosistemas.

3. Área de estudio

La Bahía de Todos Santos (BTS) se localiza en el Océano Pacífico al noroeste del Estado de Baja California, México, entre los 31° 45' y 31° 54' de latitud norte y 116° 36' y 116° 48' de longitud oeste. Se limita al norte con Punta San Miguel, al sur con Punta Banda, al este con la ciudad de Ensenada y al oeste con las Islas Todos Santos (figura 1). La BTS tiene una superficie de ~200 km² (Argote-Espinoza *et al.*, 1991), cuenta con dos bocas: una con ~12 km de ancho y profundidades menores a los 50 m y otra de ~5 km con profundidades de hasta 400 m en el cañón submarino (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1988). Las temperaturas superficiales más bajas en la BTS ocurren de febrero a abril (~12-14 °C) y las más altas de agosto a septiembre (~20-24 °C) (Morales-Zuñiga, 1977; Grijalva-Chon *et al.*, 1985). La temporada de surgencias es durante primavera y verano (Morales-Zuñiga, 1977; Grijalva-Chon *et al.*, 1985; Espinosa-Carreón *et al.*, 2001; Conabio, 2008; Lares *et al.*, 2009).

Los vientos locales son los principales forzantes de las corrientes superficiales en la BTS (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1988), que se originan principalmente por las características físicas de la región, aunque están afectados por la situación meteorológica general (Pavía y Reyes, 1983). Los vientos de 4 m s⁻¹ son predominantemente del noroeste y representan el 49% de la ocurrencia total, seguido de vientos del oeste con el 18.6% y el 10.5% restante es del oeste-noroeste (Álvarez-Sánchez, 1977). Entre octubre y noviembre se presentan vientos del este conocidos como *Santa Ana* o *Santana*, que pueden persistir hasta por tres días (Álvarez-Sánchez, 1977; Castro *et al.*, 2003). Estos se caracterizan por ser provenientes de regiones desérticas, con temperaturas altas, humedad baja (< 10%) y

velocidades de hasta 22 m s^{-1} . Estos vientos del este son capaces de originar cambios en el océano como en el campo de corrientes superficiales, surgencias, intercambio de calor (latente y sensible) aire-mar y alteración del medio marino (Sommers, 1978; Castro *et al.*, 2003).

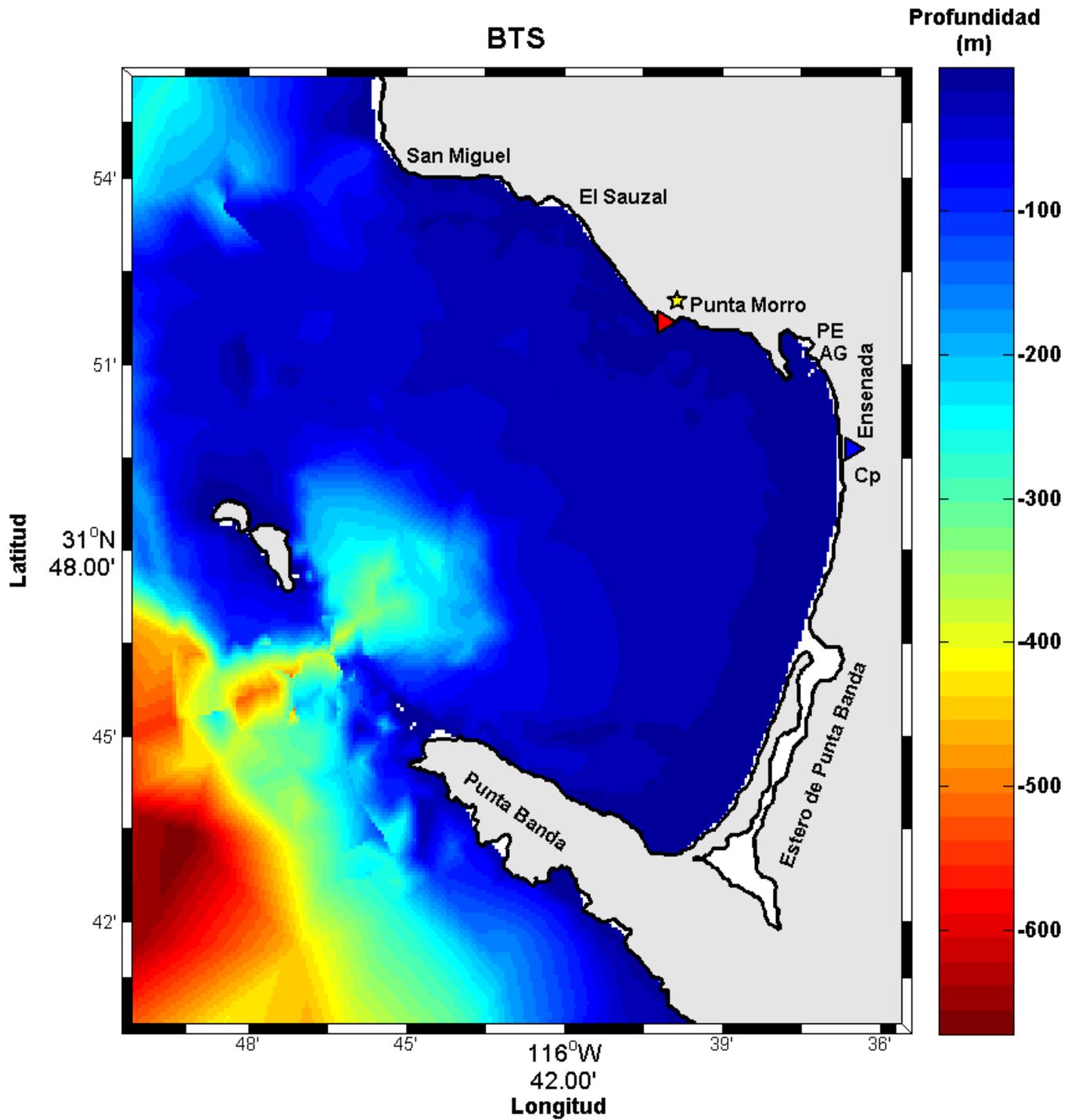


Figura 1. Localización de la Bahía Todos Santos (BTS), Baja California. Los acrónimos PE, AG y Cp son Puerto de Ensenada, Arroyo el Gallo y Conalep, respectivamente. El triángulo color rojo indica la estación de radar Punta Morro, el azul la estación Conalep y la estrella amarilla la estación meteorológica. La profundidad (metros) de la BTS está codificada en colores.

El sistema de corrientes adyacentes frente a Baja California está influenciado principalmente por la Corriente de California, la cual produce cambios importantes dentro de la Bahía de Todos Santos (Mateos *et al.*, 2009). Espinosa-Carreón *et al.* (2001) argumentan que los cambios estacionales de las propiedades físicas del agua en la BTS se derivan de procesos que ocurren en el océano abierto, por lo que el agua presente en la zona está relacionada con la dinámica del sistema de la Corriente de California.

Estudios realizados con derivadores Lagrangeanos para caracterizar patrones de corrientes superficiales en el sur de la BTS, muestran que frente a la barra del Estero de Punta Banda se encuentra una región de convergencia cuando las corrientes son perpendiculares a la costa, y de divergencia cuando son paralelas (Durazo-Arvizu y Álvarez-Sánchez, 1988). Se ha evidenciado que las corrientes dentro de la BTS son dominadas principalmente por el viento (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1988; Gavidia-Medina, 1988), mientras que las corrientes generadas por las mareas (1.5 cm s^{-1}) son despreciables (Argote-Espinoza *et al.*, 1991). Las corrientes más intensas ($\sim 15 \text{ cm s}^{-1}$) ocurren en primavera y verano cuando los vientos son más intensos y estables, mientras que en otoño e invierno cuando los vientos son más débiles y variables, las corrientes son también débiles y variables ($\sim 5 \text{ cm s}^{-1}$). En promedio se presentan corrientes bien definidas entre marzo y agosto que propician una convergencia en la región de la boca del Estero Punta Banda (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1988). Resultados obtenidos a partir de un modelo numérico barotrópico forzado por viento (Argote-Espinoza *et al.*, 1991) muestran dos patrones de corrientes superficiales, uno en verano cuando el viento del norte y noroeste genera una corriente que sigue la línea de costa desde San Miguel hasta Punta Banda, y otro en invierno cuando el viento del sur y sureste invierten el flujo. Estudios más recientes con

modelos de última generación (ROMS, Mateos *et al.*, 2009) concuerdan con que las corrientes en verano son hacia el sur a lo largo de la costa ($\sim 8 \text{ cm s}^{-1}$), con estructuras de mesoescala (remolinos y meandros) que producen variaciones en el transporte que van de ~ 13 a $23 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ entre el océano abierto y la bahía.

4. Metodología

Con el fin de conectar la hidrodinámica con el forzamiento atmosférico se utilizaron datos de una estación meteorológica marca Aanderaa Instruments modelo AWS2700 ubicada en $116^{\circ} 39.988' W$ y $31^{\circ} 51.755' N$ (figura 1), a una altitud aproximada de 10 m sobre el nivel del mar, libre de barreras físicas que pudieran interferir en las mediciones. El periodo de observaciones de viento fue del 1 de enero al 31 de diciembre de 2010. Las mediciones horarias de las condiciones meteorológicas consistieron en datos de presión atmosférica, humedad relativa, temperatura del aire, velocidad y dirección del viento.

A la serie de datos meteorológicos se les eliminaron datos erróneos y se interpolaron temporalmente para cubrir datos faltantes en la serie. Finalmente, se calcularon promedios diarios de cada una de las variables. Los datos de promedios diarios se utilizaron para obtener información sobre los porcentajes mensuales de las direcciones dominantes y poder caracterizar las condiciones atmosféricas en las diferentes estaciones del año. Se elaboraron rosas de vientos para cada estación del año y los intervalos que se obtuvieron fueron utilizados para el análisis del forzamiento en las corrientes superficiales medidas con radares de alta frecuencia.

Mediante dos radares de alta frecuencia CODAR (acrónimo en inglés para Coastal Ocean Dynamics Applications Radar, www.codar.com) instalados en la BTS se obtuvieron mediciones de corrientes superficiales de enero a diciembre de 2010 (figura 2b) a intervalos de una hora, con una resolución espacial de 500 m. Para cada intervalo de tiempo la malla original se interpoló para obtener una resolución espacial más gruesa de 1 km (figura 2a).

Debido a fallas técnicas del equipo o a suministros de energía eléctrica, existieron periodos donde no fue posible obtener mediciones (figura 2b). Con el fin de evitar un sesgo en los promedios obtenidos, la caracterización estacional de los patrones de corrientes superficiales se obtuvo utilizando solo aquellos meses donde el número de días sin datos fuera menor a un día. Los datos obtenidos fueron utilizados para el cálculo de los flujos medios de las corrientes superficiales. Los meses seleccionados para cada una de las épocas del año se detallan más adelante en la sección de resultados.

Los principales meses que constituyeron a cada una de las temporadas fueron utilizados para seleccionar una serie típica de corrientes. Con la finalidad de eliminar señales de alta frecuencia o componentes de mayor energía (diurna e inercial), como las corrientes generadas por la marea y las corrientes inerciales, a cada una de las series mensuales representativas de la temporada del año correspondiente se les aplicó un filtro Lanczos pasa bajas (Duchon, 1979; Cetina *et al.*, 2006; Emery y Thomson, 2011), con una frecuencia de corte de $1/36$ cph ó 0.0277 Hz. Se filtraron las corrientes de marea debido a que se ha demostrado con modelos numéricos (Gavidia-Medina, 1988; Argote-Espinoza *et al.*, 1991), que estas son despreciables para la circulación de la BTS y por ende para la dispersión.

Los campos de corrientes horarias se obtuvieron después de aplicar la metodología descrita anteriormente y los datos obtenidos fueron utilizados para la advección de partículas en la BTS representativo de cada estación del año.

4.1. Advección de partículas

Por medio de los campos vectoriales obtenidos a partir de la serie de datos de corrientes medidas con los radares de alta frecuencia, se estudió el comportamiento que tendrían las partículas distribuidas en la BTS. La trayectoria Lagrangeana de cada partícula advectada está dada por la siguiente ecuación diferencial ordinaria que define la velocidad de una partícula

$$\frac{dx}{dt} = g(x, t), \quad x(0) = x_0, \quad (5)$$

donde g es una función que depende de x (posición) y de t (tiempo). La posición x_{i+1} de cualquier partícula con posición previa x_i está dada por la ec. (5) en el intervalo $t_i \leq t \leq t_{i+1}$, esto es,

$$x_{i+1} = x_i + \int_{t_i}^{t_{i+1}} g(x, t) dt. \quad (6)$$

La integral en (6) se calculó mediante el método de Runge-Kutta de segundo orden, para lo que se utilizó el método del trapecoide

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} g(x, t) dt \approx \frac{h}{2} [g(x_i, t_i) + g(x_{i+1}, t_{i+1})], \quad (7)$$

donde $h = t_{i+1} - t_i$. En (7) se desconoce x_{i+1} , así que este término se obtiene por el método de Euler hacia delante, donde $x_{i+1} = x_i + hg(x_i, t_i)$, por lo que el esquema se reduce de la siguiente manera:

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} g(x, t) dt \approx \frac{h}{2} [g(x_i, t_i) + g(x_i + g(x_i, t_i), t_{i+1})] \quad (8)$$

$$x_{i+1} = x_i + \frac{h}{2} [g(x_i, t_i) + g(x_i + g(x_i, t_i), t_{i+1})] \quad (9)$$

o de una forma más convencional:

$$k_1 = g(x_i, t_i) \quad (10)$$

$$k_2 = g(x_i + k_1, t_{i+1}) \quad (11)$$

$$x_{i+1} = x_i + \frac{h}{2}(k_1 + k_2). \quad (12)$$

Es posible aplicar este esquema a mapas vectoriales de corrientes obtenidas con los radares de alta frecuencia, por lo que la ecuación puede escribirse como:

$$x_{t+1} = x_t + \frac{\Delta t}{2}(\vec{u}_t + \vec{u}_{t+1}), \quad (13)$$

donde \vec{u} es la velocidad de la corriente obtenida por los radares de alta frecuencia. En este trabajo la advección de partículas en los campos vectoriales de corrientes se realizó bajo el supuesto de que las partículas eran infinitamente pequeñas y poseían influencia directa de las corrientes y no del viento.

Para conocer el tiempo de residencia y las zonas donde las partículas se pudieran acumular, se advectaron partículas cada hora en todos los nodos de la malla de la BTS (figura 2a), y se obtuvieron las posiciones y trayectorias de cada una de las partículas advectadas. Posteriormente, con las posiciones de las partículas advectadas en la BTS se realizó un conteo de las partículas que se observaron por hora en cada una de las retículas de la malla (ver nodos de la figura 2a), con los que se obtuvieron mapas de distribución espacio-temporal de las partículas. Este método también permitió obtener el tiempo de residencia de las partículas definido aquí como el tiempo que tarda una partícula en salir de la bahía o tocar una de las fronteras. Por último cabe mencionar que las partículas que tocaron o salieron por una de las fronteras, no se volvieron a reincorporar al cálculo Lagrangeano.

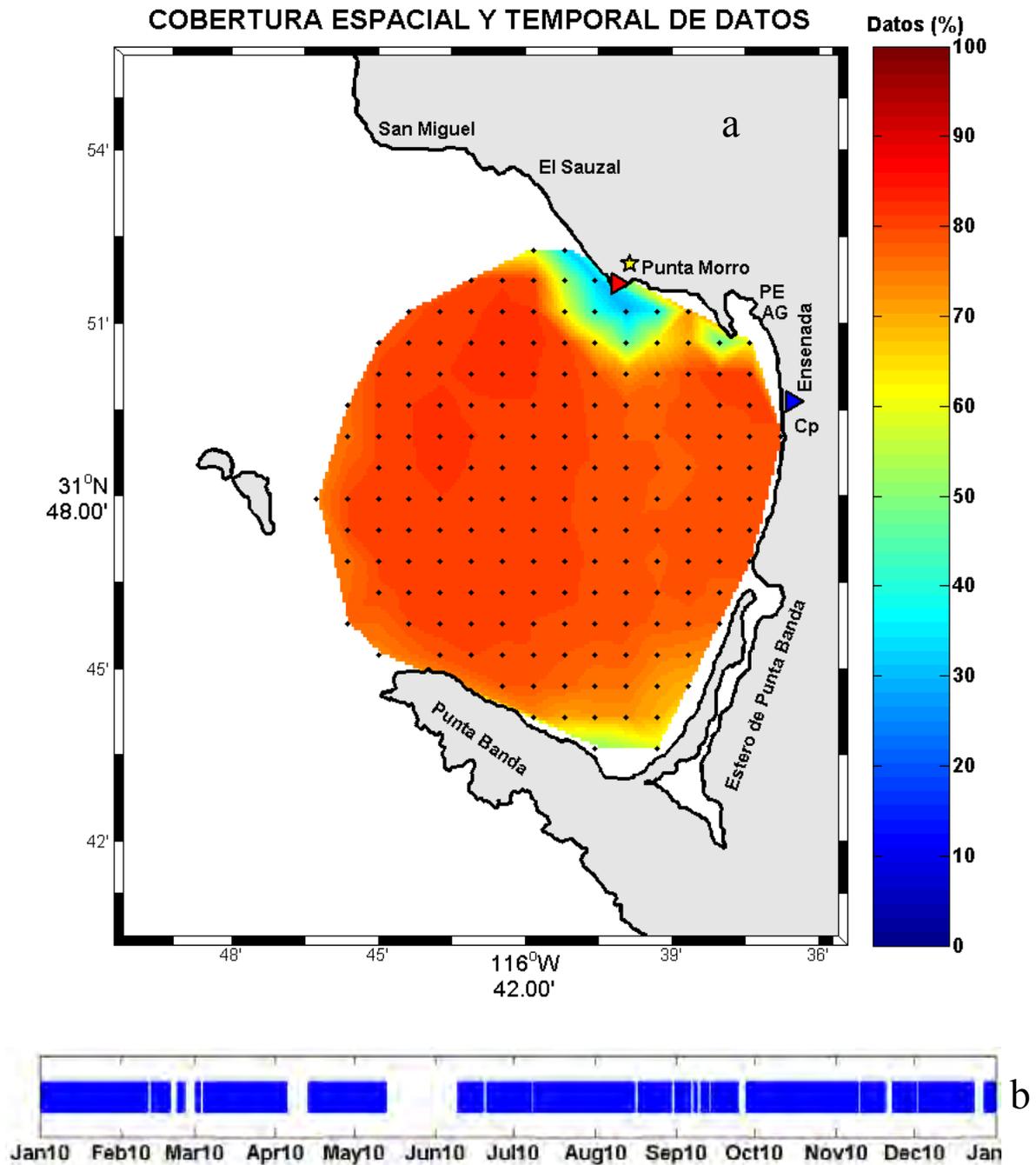


Figura 2. a).- Cobertura espacial de las corrientes expresada como porcentaje de datos, los cuadros pequeños de color negro, representan los puntos de malla espaciados cada 1 km × 1 km. b).- Cobertura temporal de las corrientes superficiales para el año 2010 en la BTS.

Para comparar las trayectorias obtenidas a partir de la advección de partículas, simuladas en los campos de corrientes superficiales medidas con los radares de alta frecuencia, se realizaron tres experimentos con boyas a la deriva. Los experimentos se realizaron durante el periodo del 5 al 8 de junio, 28 al 30 de julio y 28 al 31 de agosto de 2012.

Las boyas utilizadas son conocidas como boyas Microstar (www.pacificgyre.com), las cuales cuentan con un elemento de arrastre tipo papalote (figura 3) que asegura el derivador a una parcela de agua. El centro del elemento de arrastre estuvo localizado a ~1.5 m de profundidad, y para minimizar el efecto del viento sobre el desplazamiento de la boya de deriva, la razón de área sumergida a área expuesta fue mayor a 40.

Las boyas Microstar derivan con la corriente oceánica y proporcionan la posición con una antena GPS (*Global Positioning System*) aproximadamente cada 10 minutos. Los datos proporcionados por las boyas fueron llevados a datos horarios, para poder ser comparados con la dispersión de partículas de los radares. Las posiciones fueron graficadas obteniendo las trayectorias descritas para cada una de las boyas (figura 12). Cabe mencionar que las boyas que fueron levantadas y puestas nuevamente en el agua, se consideraron como una nueva trayectoria. Una vez obtenidas las trayectorias de las posiciones de las boyas, se realizó un conteo del número de veces que se observaron en cada una de las retículas de malla (figura 2a), similar al método aplicado para el conteo de partículas descrito anteriormente. Posterior al conteo se obtuvieron gráficos de la distribución espacio-temporal de las boyas.



Figura 3. Boyas de deriva utilizada para los experimentos en la BTS durante el periodo de 2012. El lado izquierdo de la figura muestra una boya Microstar en el agua en su posición encendida, de la que pende un papalote colocado a 1.5 m de profundidad, mientras que del lado derecho se muestra el papalote y la boya fuera del agua en su posición apagada (invertida).

5. Resultados

El presente capítulo se divide en cinco apartados, el primero muestra las variables meteorológicas observadas (presión atmosférica, humedad relativa, temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento) y una estadística básica de las direcciones principales del viento. El segundo apartado muestra flujos medios de las corrientes superficiales para cada una de las épocas del año en la Bahía de Todos Santos (BTS). El tercer apartado muestra los resultados del análisis de las trayectorias descritas por las partículas y los principales patrones de dispersión, en mapas de distribución espacio-temporal de las partículas para cada una de las épocas del año. En esta sección también se muestra una tabla con información referente a las velocidades de las corrientes y los tiempos de residencia. En el cuarto apartado se muestran dos eventos extraordinarios de viento: un evento que se denominó como evento extremo y otro en condiciones de vientos Santana. También muestra los flujos medios de las corrientes, las trayectorias observadas y mapas de distribución espacio-temporal de las partículas durante cada uno de los eventos extraordinarios. En el apartado final se muestran las trayectorias descritas por las boyas de deriva y su distribución espacio-temporal en la BTS.

5.1. Meteorología

En este estudio las épocas del año se clasificaron de la siguiente manera: invierno (enero, febrero y marzo), primavera (abril, mayo y junio), verano (julio, agosto y septiembre) y otoño (octubre, noviembre y diciembre).

Con la finalidad de obtener información acerca de la dirección predominante de los vientos en la BTS, se elaboraron gráficos de rosas de vientos. La dirección del viento a lo largo de 16 cuadrantes en las diferentes estaciones del año se muestra en la figura 4. Adicionalmente, en la tabla 1 se presentan los porcentajes de las direcciones principales del viento y los valores de las velocidades máximas alcanzadas.

Las rosas de viento (figura 4) muestran que las direcciones de las que proviene el viento durante el invierno ($> 10\%$ de ocurrencia) son principalmente del W, NNE y NE respectivamente. En la primavera se observó que el viento proviene esencialmente del W, aunque se registró otra componente del WSW con porcentaje de ocurrencia mayor al 10%. Para verano se observó que el viento proviene principalmente del W con otra componente de menor porcentaje del WNW. Por último para el viento en otoño se registró que éste proviene del WNW, NE y W respectivamente.

Se observó que en invierno y otoño los vientos alcanzaron velocidades mayores (hasta de 16.3 m s^{-1} durante invierno, tabla 1) y fueron más variables, con componentes principales del norte y del oeste. En primavera y verano los vientos obtuvieron velocidades menores, que alcanzaron los 7.9 m s^{-1} y fueron más persistentes, provenientes del oeste.

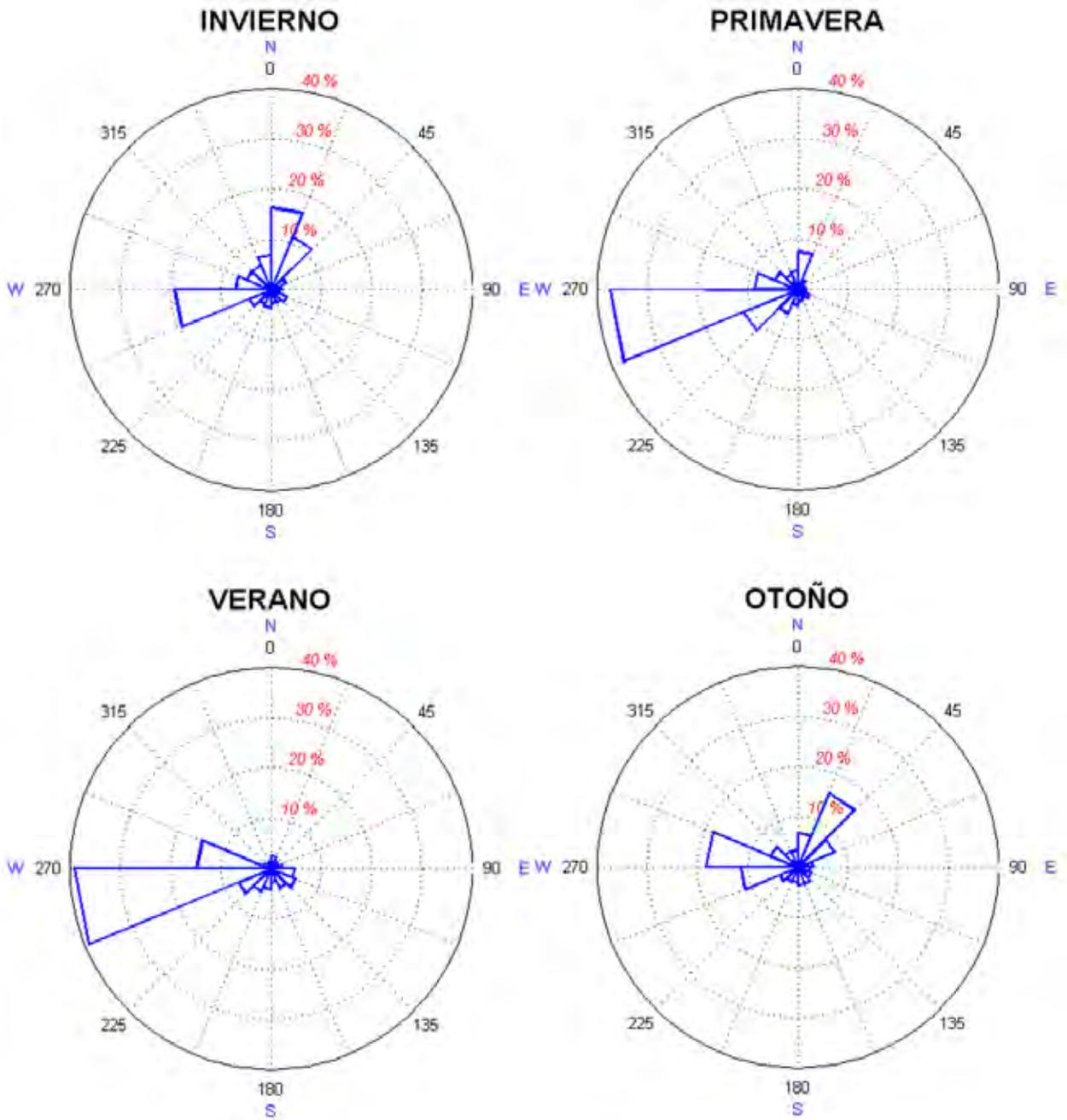


Figura 4. Rosas de viento que muestran las direcciones principales (en porcentajes) de las que proviene el viento para cada época del año. Los triángulos de color azul muestran las direcciones de las que proviene el viento y las magnitudes indican el porcentaje.

Tabla 1. Direcciones predominantes de los vientos en porcentaje y las velocidades máximas (m s^{-1}) alcanzadas para cada una de las estaciones del año.

Estación	Dirección	Porcentaje	Velocidad máxima(m s^{-1})
Invierno	W	19.2%	16.3
	NNE	16.3%	
	NE	11.8%	
Primavera	W	37.5%	7.9
	WSW	11.7%	
Verano	W	39.2%	6.9
	WNW	14.8%	
Otoño	WNW	18.4%	9.9
	NE	16.1%	
	W	11.4%	

La evolución temporal de las condiciones atmosféricas registradas por la estación meteorológica se presentan en la figura 5, donde se muestran cinco paneles, uno para cada una de las variables registradas: presión atmosférica, humedad relativa, temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento respectivamente. Las áreas sombreadas de color gris en cada panel indican los periodos representativos de cada estación del año, mismos periodos que fueron utilizados para simular la advección de partículas en la BTS. Por su parte, las áreas en color verde y azul muestran los periodos de dos eventos extraordinarios que se eligieron para un análisis posterior.

En términos generales para primavera y verano se observaron condiciones atmosféricas más estables. Las variables registradas mostraron que la presión atmosférica fue comparativamente menor en estas épocas, mientras que en contraste la humedad relativa y las temperaturas fueron mayores. Los vientos predominantes del oeste mostraron mayor estabilidad en dirección aunque las intensidades del viento no fueron tan altas como

las registradas en invierno y otoño. Debido a que la dirección predominante del viento durante primavera y verano es del oeste, la humedad relativa asociada fue mayor.

Para invierno y otoño se notaron condiciones atmosféricas variables, la presión atmosférica en estas épocas fue más alta, mientras que la humedad relativa y la temperatura fueron más bajas en comparación con la primavera y verano. Los vientos registrados fueron variables en dirección provenientes del oeste y norte, mientras que las velocidades alcanzadas en estos periodos, fueron más altas (ver tabla 1).

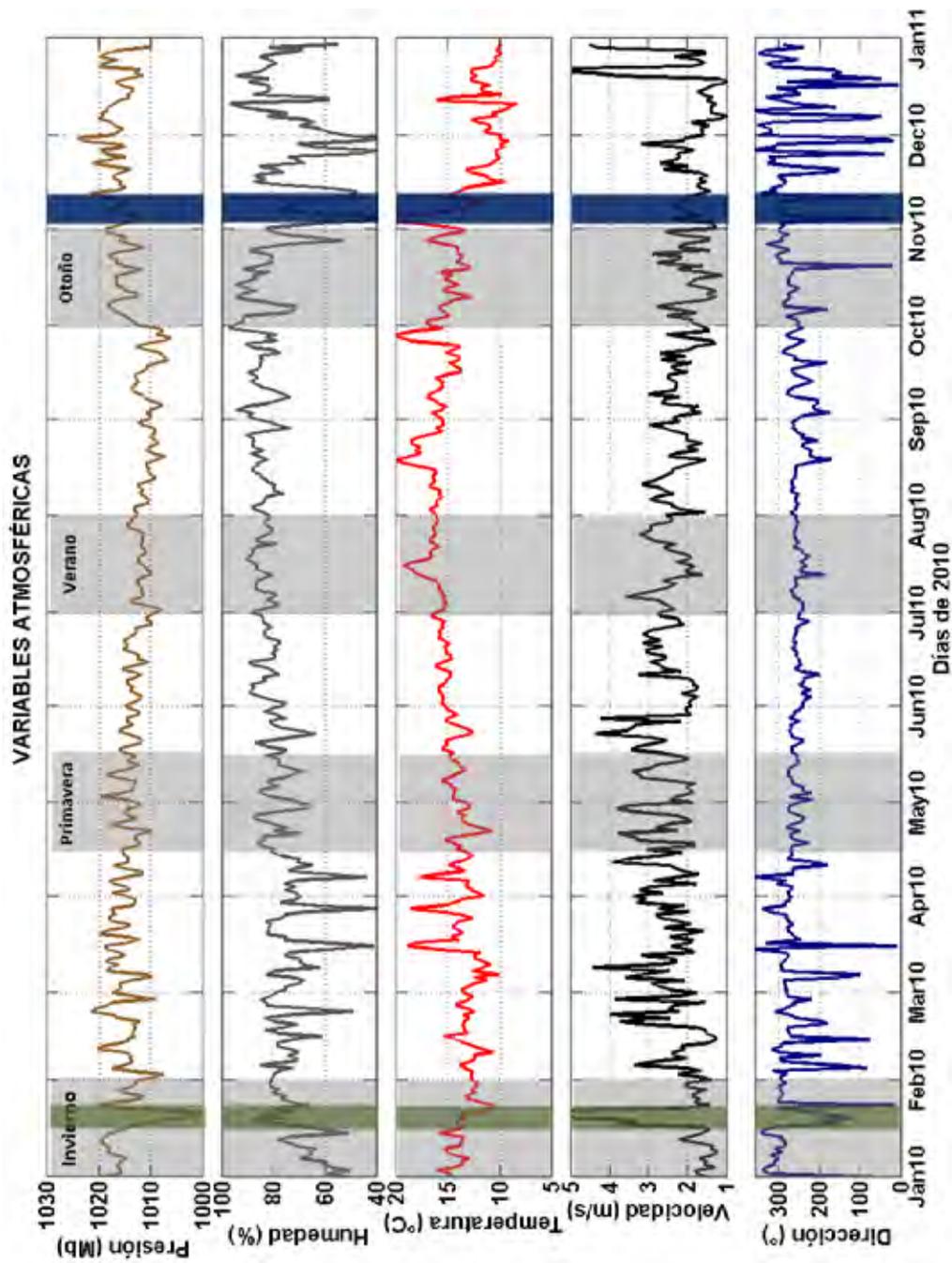


Figura 5. Variables atmosféricas registradas por la estación meteorológica para el año 2010. Las áreas sombreadas de color gris indican los periodos utilizados como representativos de cada una de las estaciones del año, las verdes del evento Extremo y las azules del Santana.

5.2. Corrientes

Con base en el análisis de viento descrito en la sección anterior se eligieron las condiciones atmosféricas representativas de cada estación del año y se utilizaron dichos meses para separar estacionalmente la serie de datos de corrientes. Como invierno se consideraron los datos de enero (31 días). Para la primavera se utilizaron datos de corrientes del 14 de abril al 13 de mayo (29 días), para el verano el mes de julio (31 días) y para otoño todo el mes de octubre (31 días).

Con la finalidad de brindar un panorama de la circulación en la BTS, se presentan a continuación los flujos medios de las corrientes superficiales representativas de cada época del año. Los flujos medios se muestran en la figura 6, donde los vectores codificados en color indican la magnitud y la dirección de las corrientes superficiales. La flecha ubicada en la parte superior izquierda de cada panel, representa la escala de un vector de 15 cm s^{-1} . Los mapas en esta figura representan un resumen de resultados más detallados sobre la circulación que presenta Larrañaga-Fu (2013).

El flujo medio para la época de invierno (figura 6a) describe una circulación ciclónica que abarca toda la bahía, donde las corrientes más intensas se observaron en la parte sur y las menos intensas en la parte norte. Se observó una corriente en la boca norte junto a las islas que alcanzó velocidades mayores de 15 cm s^{-1} y que disminuyeron hasta $\sim 5 \text{ cm s}^{-1}$ conforme se internaron en la bahía. Las corrientes de menor intensidad se registraron en la parte norte de la BTS, donde un flujo con velocidades menores a los 5 cm s^{-1} se observa hacia el este en la boca norte junto a El Sauzal, corriente que se intensifica frente a

Punta Morro y se debilita nuevamente frente a la Playa Municipal y en la entrada del Puerto de Ensenada.

Para primavera el flujo medio (figura 6b), muestra una corriente intensa cercano a las islas en las bocas norte y sur, con velocidades mayores a los 15 cm s^{-1} y dirección sureste. El flujo se adentra en la BTS y disminuye de intensidad hasta velocidades menores a 5 cm s^{-1} cerca de la costa, excepto frente a la boca del Estero de Punta Banda, donde la corriente se intensifica ligeramente. En la región más somera las corrientes cambian de dirección y se orientan normal a la costa. Hacia la parte norte se identifica un flujo de menor intensidad con una estructura ciclónica. Este flujo inicia en la boca norte frente a El Sauzal y llega a alcanzar velocidades entre 5 y 10 cm s^{-1} .

Para el flujo medio de verano (figura 6c) se observaron corrientes más homogéneas. En esta época también se detectaron corrientes intensas en la boca sur y norte cercano a las islas, con dirección sureste y velocidades mayores a los 15 cm s^{-1} . Estas corrientes disminuyen en intensidad cerca de la costa hasta alcanzar velocidades de entre 5 y 10 cm s^{-1} . Similar a primavera, se encontró otro flujo con velocidades menores a los 5 cm s^{-1} que presentó una estructura en forma de remolino ciclónico, que abarcó casi toda la parte norte de la bahía. El flujo inició en la boca norte junto a El Sauzal y culminó en la costa, desde la boca norte del Estero de Punta Banda hasta el Puerto de Ensenada.

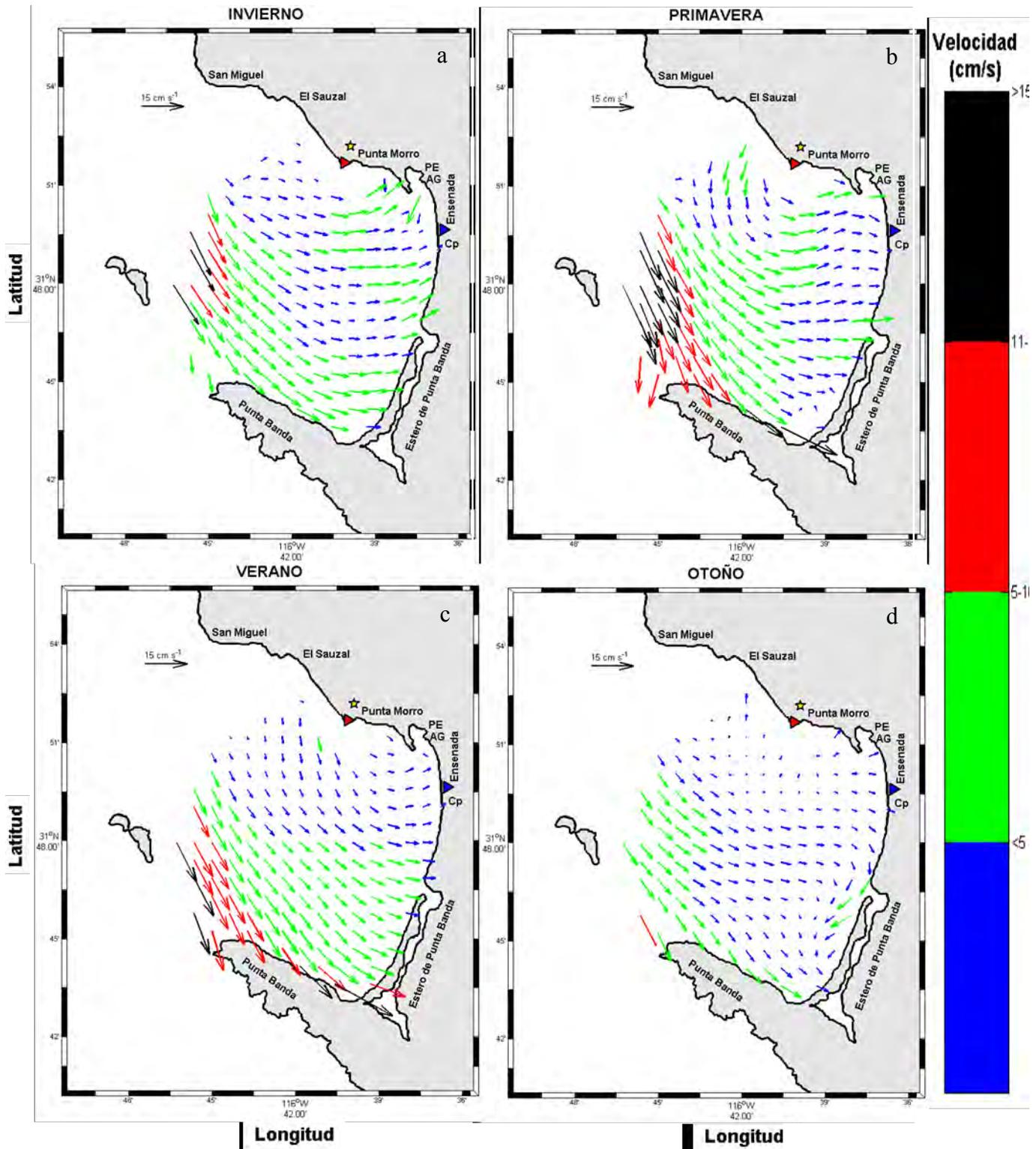


Figura 6. Flujo medio de las corrientes superficiales de la BTS para cada estación del año, calculado a partir de datos horarios. Los vectores de color indican la magnitud y el sentido de las corrientes. La flecha en la parte superior izquierda de cada panel representa la escala de un vector con magnitud de 15 cm s^{-1} .

Para el otoño (figura 6d), el flujo medio se caracterizó por corrientes débiles ($< 5 \text{ cm s}^{-1}$) en casi toda la bahía, con una circulación anticiclónica frente a la barra del Estero de Punta Banda y una corriente costera con dirección hacia el sur desde la Playa Municipal hasta el Estero de Punta Banda. Las corrientes de mayor intensidad se observaron en la boca norte y sur cerca de las islas, con valores entre 5 y 10 cm s^{-1} , las cuales se debilitaron al interior. Se detectaron corrientes menores a 5 cm s^{-1} en la boca norte cerca de El Sauzal y toda la parte norte de la BTS.

Temporalmente, las corrientes de mayor intensidad fueron observadas en la época de primavera y verano, mientras que las corrientes de menor intensidad se observaron en invierno y otoño. La mayor intensidad está directamente relacionada con la acción del viento, ya que el viento es más persistente e intenso en las épocas de primavera y verano, mientras que en la temporada de invierno y otoño son más variables y débiles (figura 4, rosas de viento y figura 5, ver panel de velocidad del viento).

La distribución espacial de la circulación en la BTS mostró que las corrientes más intensas se observaron cerca de las islas en las bocas sur y norte, mientras que las corrientes más débiles se localizaron en el interior de la BTS cercano a la boca norte (cercano a Punta Morro), y desde la boca sur del Estero de Punta Banda hasta el Puerto de Ensenada. La distribución espacial de las corrientes medidas puede ocurrir debido a la influencia de la batimetría, ya que en la parte sur junto a Punta Banda la profundidad es mayor y la batimetría decrece más abruptamente, mientras que en la parte norte, adyacente a Punta Morro la batimetría es menor y decrece más suavemente (figura 1). Esto puede deberse a que el fondo ejerce fricción sobre las corrientes que ocasiona que estas disminuyan la velocidad.

5.3. Patrones de dispersión de partículas

Como resultado de la advección de partículas, se obtuvieron mapas de las trayectorias descritas por cada una de las partículas advectadas (figura 7) así como los parámetros de dispersión que se muestran en la tabla 2. Igualmente, se elaboraron gráficos del conteo de partículas en porcentaje codificados en colores, que proporcionan información acerca de la distribución espacio-temporal de las partículas en la bahía (figura 8).

A continuación se presentan las trayectorias de cada una de las partículas que fueron advectadas (figura 7). A pesar de la complejidad de la representación gráfica, es posible apreciar distintas estructuras que son de utilidad cuando se contrastan con las gráficas del flujo medio y las de distribución espacio-temporal de las partículas.

Para el invierno se observó que las trayectorias de las partículas (figura 7a) que iniciaron en la boca norte junto a las islas, llevaban principalmente dirección hacia el sureste y que algunas alcanzaban a salir por la boca sur cerca de Punta Banda. Se observó que varias de las trayectorias llegaban a tocar la frontera de Punta Banda y cerca de la costa, en el interior la dirección del transporte llegaba a ser normal a la barra del Estero de Punta Banda. En la parte norte frente a Punta Morro, se observó que las trayectorias de las partículas fueron normales a la costa desde la Playa Municipal hasta el Puerto de Ensenada.

Para primavera (figura 7b), los patrones de desplazamiento mostraron que las partículas que se encontraron en la boca norte y hasta Punta Morro, describieron trayectorias hacia Punta Banda, donde se observó que las trayectorias de las partículas eran

normales a la costa. Para la zona del Puerto de Ensenada y hasta la Playa Municipal se observaron trayectorias cerradas, lo cual pudiera estar indicando que las partículas advectadas estén quedando atrapadas en esa zona.

Durante el verano (figura 7c), las trayectorias de las partículas mostraron que el recorrido descrito desde la boca de la BTS hacia el interior, llegan hasta la costa donde cambian de dirección para orientarse paralelas a la costa frente al Estero de Punta Banda, con salida en la frontera entre Punta Banda y el Estero de Punta Banda. Se observó para la zona del Puerto de Ensenada que las trayectorias de partículas en ese punto eran normales a la costa. En la boca norte se notó que las trayectorias que describieron las partículas cercanas a las islas, mostraron evidencia de que algunas de estas alcanzaban a salir por la boca sur.

En otoño (figura 7d) las trayectorias muestran patrones de desplazamiento desde la boca norte de la BTS, hacia el Estero de Punta Banda, mientras que en la zona del Puerto de Ensenada estas describieron una estructura compleja, donde no se encontró un patrón definido. Para esta época se encontró evidencia de que partículas que entraron por la boca norte llegaron a salir por la boca sur.

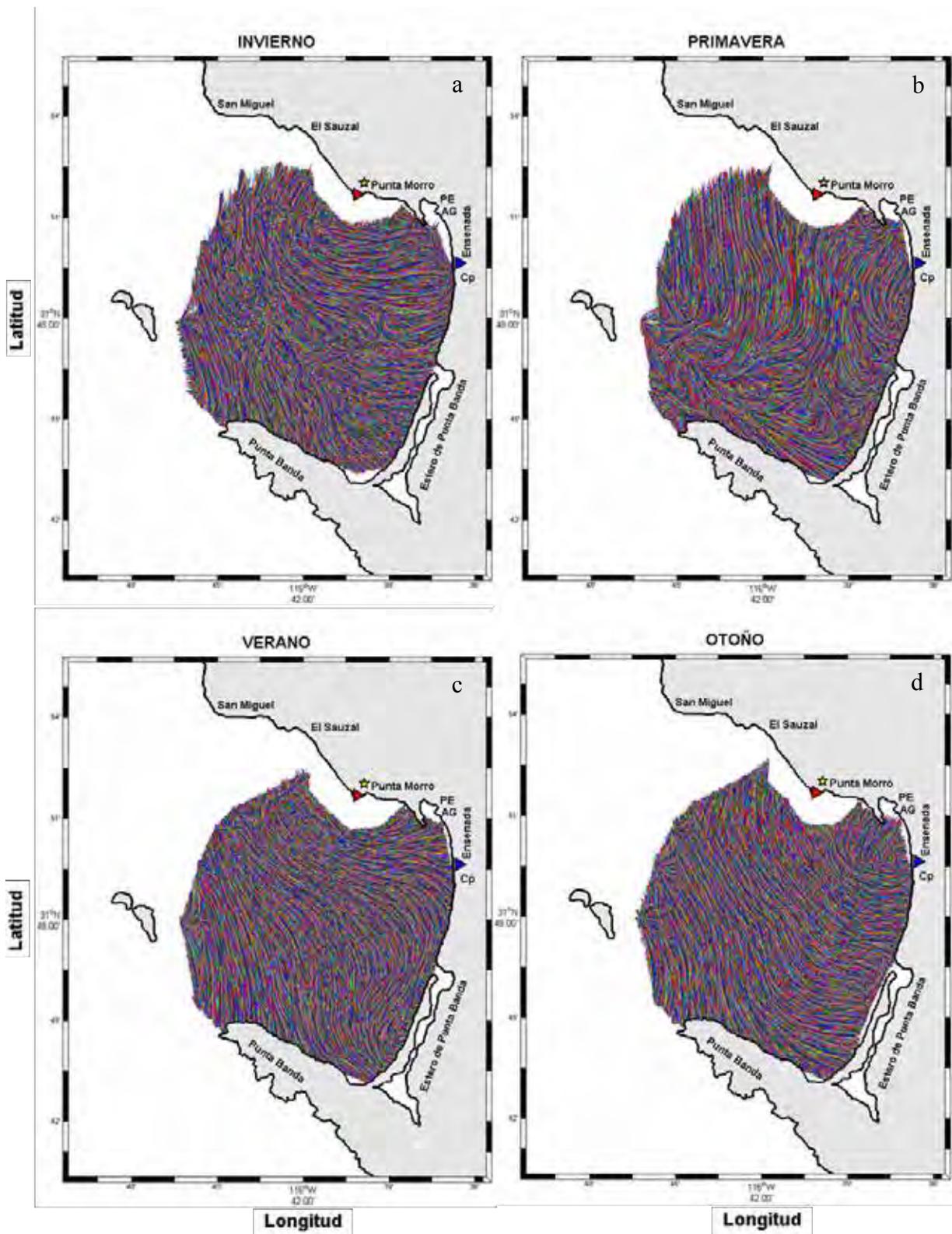


Figura 7. Trayectorias descritas por las partículas advectadas en la BTS, utilizando datos de radar de alta frecuencia. Las líneas de colores representan los trayectos realizados por cada una de las partículas advectadas.

Para obtener gráficos de distribución espacio-temporal de la concentración de partículas, se calculó el valor de ocurrencia (presencia) en cada una de las celdas de la malla. Con fines comparativos entre las distintas épocas del año, el valor máximo adquirido fue utilizado para obtener porcentajes de partículas en cada uno de los gráficos. El valor más alto se registró para la época de invierno y con base a éste, se normalizaron todas las celdas de los gráficos mostrados en la figura 8.

Para invierno (figura 8a) la mayor cantidad de partículas se observó en una franja costera de ~7 km en la parte norte de la bahía, desde el Puerto de Ensenada hasta la boca norte del Estero de Punta Banda. En los flujos medios de invierno (figura 6a) se observó una corriente débil hacia el este en la parte norte de la BTS, que inició en la boca norte de la bahía y aumentó de intensidad frente a Punta Morro, para finalmente debilitarse al acercarse a la costa. Esta zona costera donde la corriente se debilita coincide con la zona en la que se observaron porcentajes altos de partículas acumuladas.

Durante la primavera se observaron dos zonas donde ocurrió una alta concentración de partículas (figura 8b), una situada frente a la Playa Municipal en una franja costera de ~4 km, y la otra de ~3 km desde la zona sur de la boca del Estero de Punta Banda hasta los límites con Punta Banda. La zona frente a la Playa Municipal es de mayor extensión y contó con la presencia de una mayor cantidad de partículas, que coincide con una estructura cerrada en las trayectorias en la Playa Municipal (figura 7b), y que también es consistente con los flujos medios (figura 6b), donde se presenta una corriente bien definida y débil. En la zona sur se observaron corrientes intensas que se debilitaron cerca de la costa, principalmente frente al Estero de Punta Banda. La acumulación de partículas observadas

en ambas regiones indica zonas de convergencia que pueden estar directamente relacionadas con un debilitamiento de las corrientes cercanas a la costa.

En el verano se observó acumulación de partículas en la región frente a la rada portuaria de Ensenada y la Playa Municipal en una franja de ~3 km cerca de la costa (figura 8c). El flujo medio observado en verano (figura 6c) mostró que las corrientes más intensas ocurrieron en la zona sur de la BTS, mientras que las más débiles fueron observadas en la zona norte, coincidente con una estructura de circulación ciclónica que favorece la concentración de partículas en la zona cercana al Puerto de Ensenada. Para invierno y verano no existió evidencia de encontrar concentraciones altas de partículas en la zona frente a la barra del Estero de Punta Banda.

Durante el otoño (figura 8d) se observó que existe gran cantidad de partículas distribuidas en el interior, con tendencia de concentración hacia el centro de la bahía cerca de la costa. Las trayectorias durante esta estación del año (figura 7d) no muestran indicios de estructuras de acumulación de partículas en la región central, que puede ser debido a la gran cantidad de trayectorias mostradas en el gráfico, lo cual puede llegar a enmascarar estructuras importantes descritas por las partículas. Sin embargo, los flujos medios para la época de otoño (figura 6d) mostraron que las corrientes más débiles registradas ocurren en la zona cercana a la costa al norte de la BTS, entre Punta Morro y el Puerto de Ensenada. Los resultados no mostraron durante esta época grandes concentraciones de partículas, debido posiblemente a que frente a Punta Morro la corriente promedio (figura 6d) poseía dirección hacia el sur, lo que ocasionó que las partículas se acumularan más hacia el centro de la bahía. En la parte sur se observó una estructura en forma de remolino anticiclónico frente al Estero de Punta Banda, el cual pudo acumular partículas hacia esa zona. En

términos generales se observó que para el otoño los flujos medios (figura 6d) mostraron corrientes débiles menores a 5 cm s^{-1} , distribuidas en casi toda la bahía por lo que fue la época del año en donde se detectó la mayor concentración de partículas en la BTS.

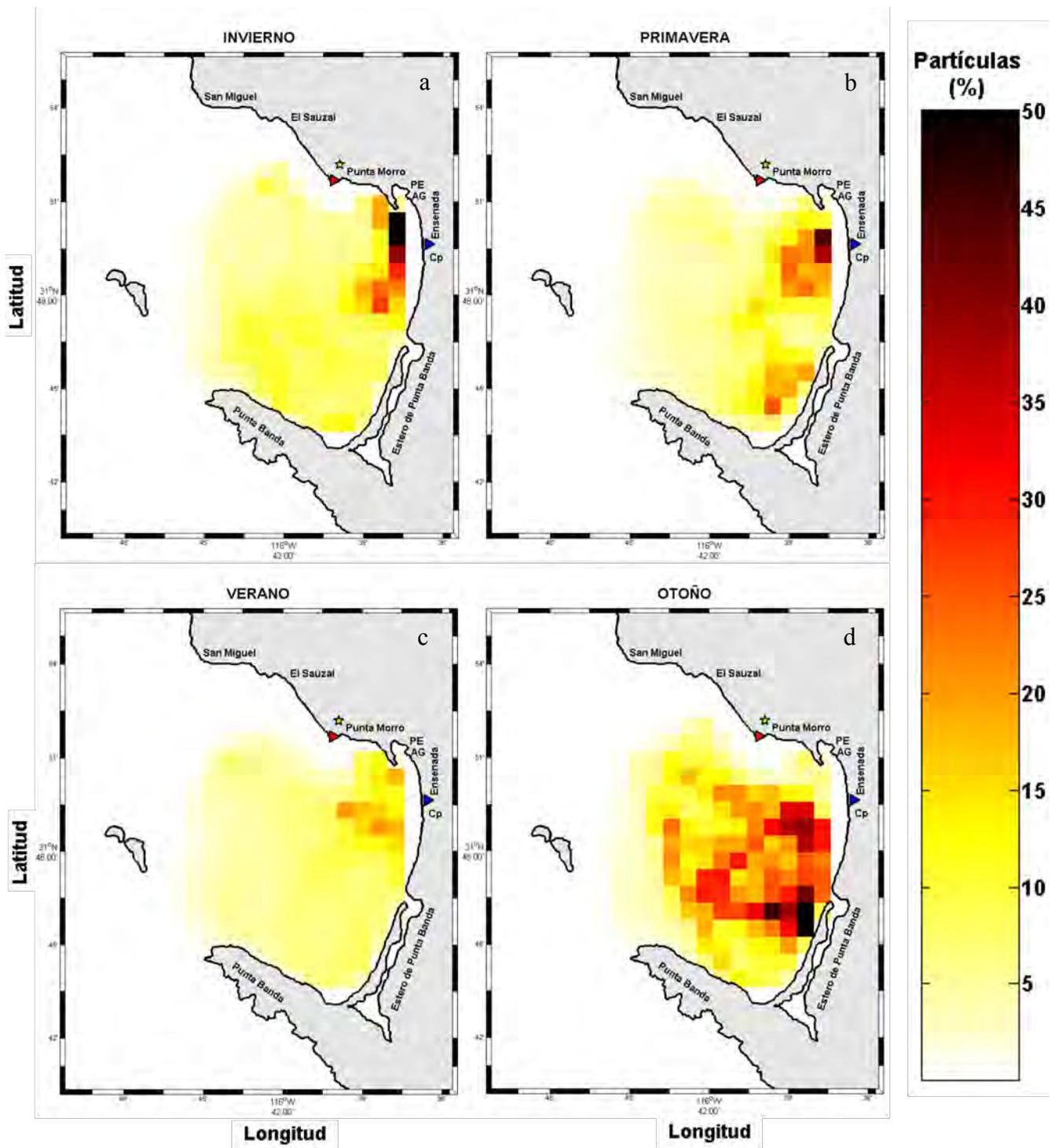


Figura 8. Distribución espacio-temporal de las partículas liberadas en la BTS, codificada en colores. La barra de colores representa el porcentaje (normalizado) de partículas observadas en cada localidad para cada una de las estaciones.

Con la finalidad de conocer el tiempo que pueden llegar a permanecer las partículas dentro de la BTS, se presentan en la tabla 2 los valores de velocidad promedio de las corrientes y tiempo máximo de residencia de las partículas para cada una de las estaciones del año. Las velocidades mayores de las corrientes se observaron en la época de primavera y verano, mientras que las más débiles fueron en otoño e invierno, consistente con los mayores y menores tiempos de residencia, respectivamente.

Los resultados descritos anteriormente muestran que el tiempo de residencia de las partículas es inversamente proporcional a la intensidad de las corrientes, con mayores tiempos de residencia durante el otoño y menores durante la primavera.

Tabla 2. Velocidad promedio de las corrientes y tiempo de residencia máximo de las partículas para cada estación del año.

Estación	Velocidad de la corriente (cm s⁻¹)	Tiempo de residencia máximo (días)
Invierno	5.1	13.3
Primavera	6.0	10
Verano	5.6	10.5
Otoño	2.8	16.4

5.4. Eventos extraordinarios

A continuación se describen las condiciones de circulación dominantes durante el paso de dos eventos atmosféricos, un evento extremo entre el 17 y 23 de enero (invierno, figura 5) cuando se registró un descenso drástico en la presión atmosférica y vientos intensos ($> 4 \text{ m s}^{-1}$) del suroeste. El segundo evento se suscitó durante condiciones de viento Santana en otoño entre el 3 y el 12 de noviembre, con vientos del este, descenso (aumento) drástico de humedad relativa (temperatura ambiente) y vientos débiles ($\sim 2 \text{ m s}^{-1}$).

5.4.1. Corrientes

El flujo medio de las corrientes superficiales en la bahía para los dos eventos extraordinarios se presenta en la figura 9. Los vectores codificados en color indican la magnitud y la dirección de las corrientes superficiales y la flecha que se ubica en la parte superior izquierda de cada panel, representa la escala de un vector de 15 cm s^{-1} . El flujo medio de las corrientes superficiales durante el evento extremo (figura 9a), presentó corrientes intensas con velocidades mayores a los 15 cm s^{-1} . Las corrientes durante este evento indican un flujo neto hacia el interior de la bahía con una fuerte corriente hacia el sureste en la boca sur y un cambio de dirección hacia el noreste en el interior. Frente a Punta Banda, las corrientes fueron relativamente débiles ($\sim 10 \text{ cm s}^{-1}$) asociadas probablemente a una zona de calma de vientos causado por la barrera orográfica de la península. A pesar de la corta duración del evento, las condiciones descritas pueden dar luz

en el tipo de circulación esperado durante las tormentas de invierno cuando es frecuente observar el paso de tormentas con vientos con una componente importante del sur.

El flujo medio durante la condición Santana mostró dos remolinos (figura 9b) bien definidos, uno con circulación ciclónica en la boca norte de la bahía y el otro de circulación anticiclónica frente a la boca del Estero de Punta Banda. Ambos remolinos presentaron velocidades menores a los 5 cm s^{-1} . Alrededor del remolino ciclónico se observó una corriente costera hacia el noreste desde la zona del Puerto de Ensenada hacia El Sauzal, en dirección hacia la boca norte. Para el remolino anticiclónico se advirtió una corriente costera con dirección hacia el sur desde el Puerto de Ensenada hasta el Estero de Punta Banda y la Península de Punta Banda.

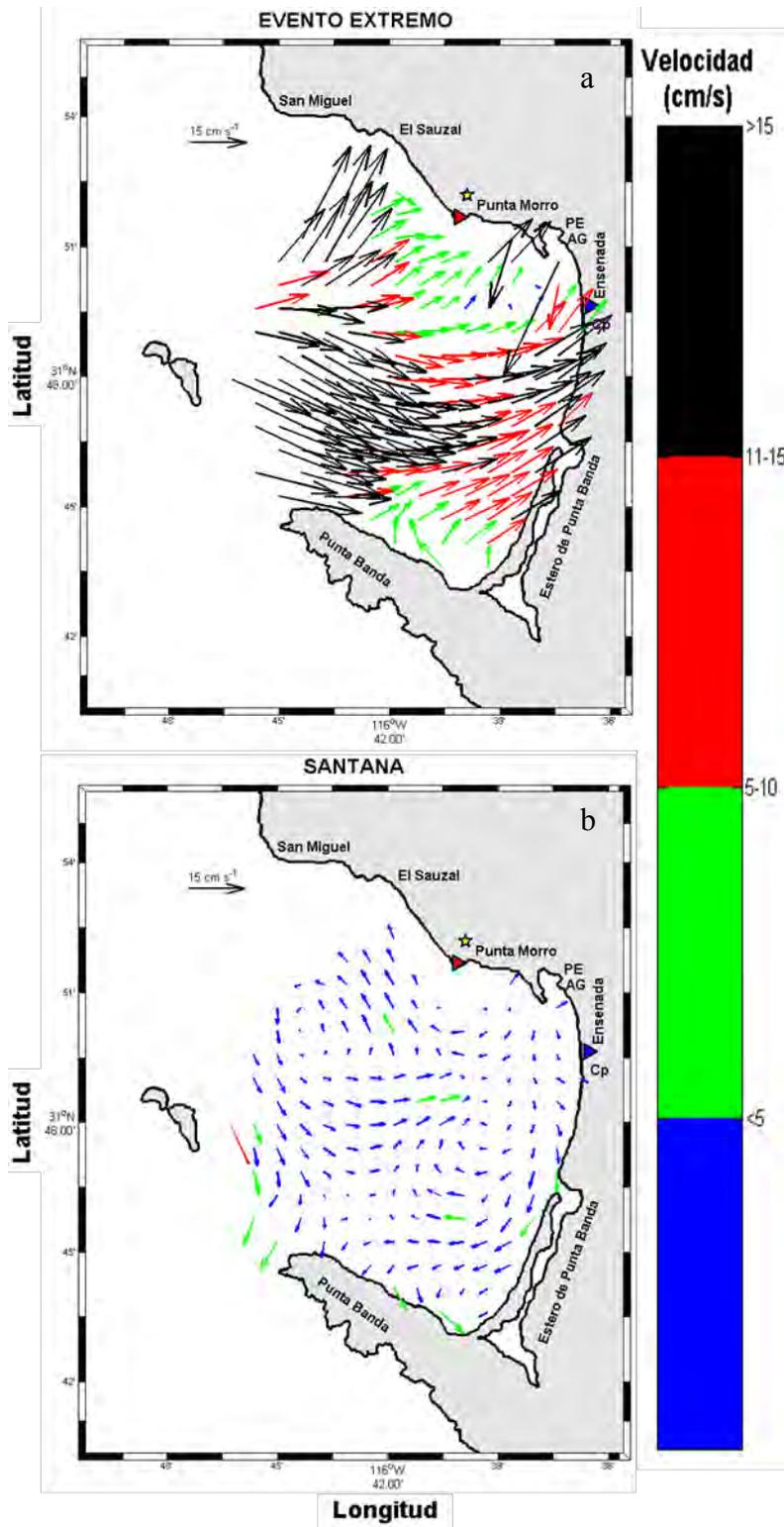


Figura 9. Flujo medio de las corrientes superficiales de la BTS para el evento extremo y el evento Santana, calculado a partir de datos horarios. Los vectores de color indican la magnitud y el sentido de las corrientes. La flecha en la parte superior izquierda de cada panel, representa la escala de un vector con magnitud de 15 cm s^{-1} .

Es importante conocer el comportamiento de las corrientes en eventos extraordinarios debido a que estas proveen información acerca de condiciones que no son típicas a las descritas anteriormente para cada estación del año, ya que estos eventos pueden llegar a suscitarse durante tiempos cortos, del orden de horas a días. Las condiciones Santana muestran evidencia que en la BTS se presentan dos remolinos bien definidos (durante vientos débiles $\sim 2 \text{ m s}^{-1}$), lo que no se observa durante ninguna de las épocas. Las condiciones de tormenta con vientos $\sim 4 \text{ m s}^{-1}$ o mayores, muestran que estos dominan la circulación dentro de la BTS, y que la batimetría influye en gran medida cuando las corrientes son relativamente intensas, mientras que para corrientes menores a 5 cm s^{-1} , la batimetría parece no tener gran influencia (figura 9b).

Las trayectorias de las partículas reconstruidas a partir de las medidas de corrientes en cada uno de los eventos se presentan en la figura 10. Para el caso del evento extremo (figura 10a) las trayectorias que describieron las partículas mostraron una dirección predominante hacia el sureste, con una zona de convergencia hacia el centro de la bahía. En la región de convergencia, la dirección de transporte cambia al noreste, hacia el Puerto de Ensenada. Durante el evento Santana (figura 10b), las partículas se desplazan hacia el interior desde la boca norte, y describen una estructura en forma de remolino desde la Playa Municipal hasta el Estero de Punta Banda. Se encontró que las trayectorias cercanas al Puerto de Ensenada y la Playa Municipal fueron perpendiculares a la costa. Asimismo, el patrón de transporte muestra evidencia de que partículas que entran por la boca norte, pueden llegar a salir por la boca sur.

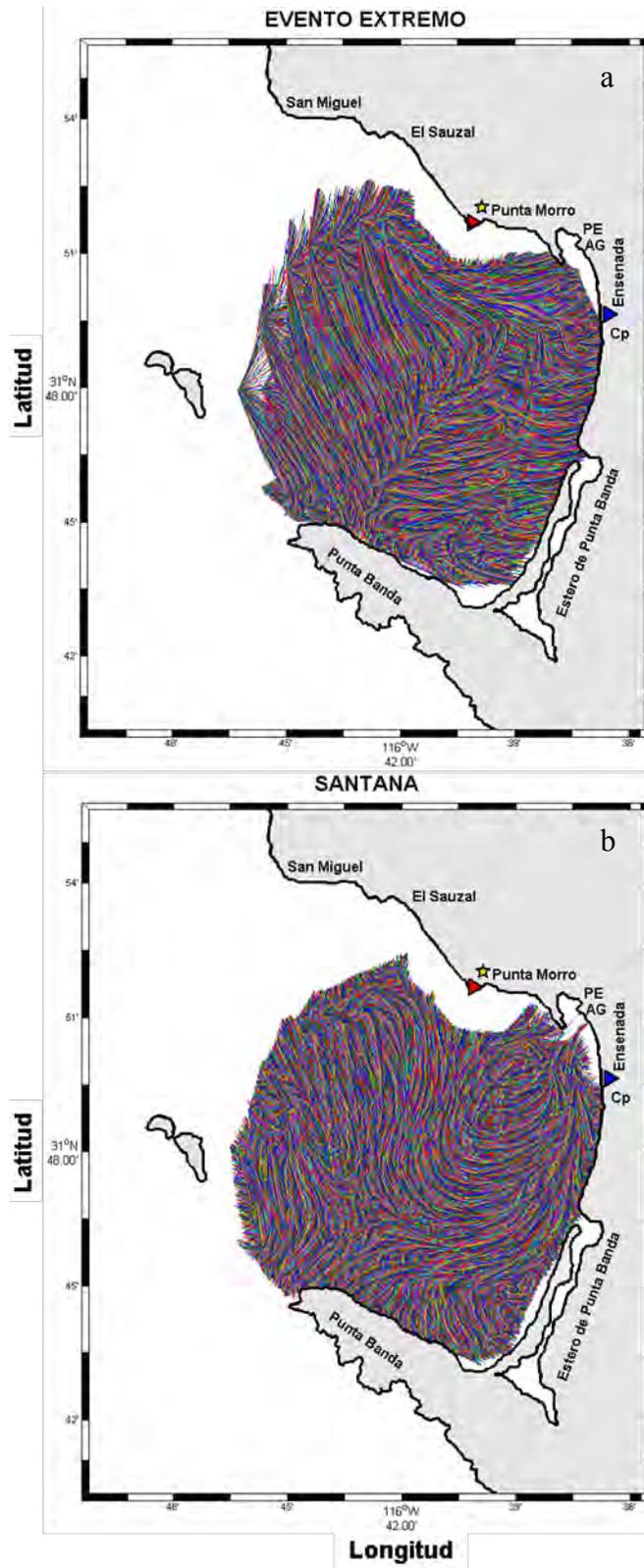


Figura 10. Trayectorias descritas por las partículas advectadas en la BTS para el evento extremo y el evento Santana, utilizando datos de radar de alta frecuencia. Las líneas de colores representan los trayectos realizados por cada una de las partículas advectadas.

Los mapas de acumulación de partículas para cada evento extraordinario se muestran en la figura 11. Para cada evento el número de partículas se normalizó respecto al valor máximo de acumulación observado. Para el caso del evento extremo (figura 11a) se observó una zona de acumulación de partículas en una franja costera de ~5 km frente al Puerto de Ensenada, desde Punta Morro hasta la Playa Municipal y otra de menor acumulación en forma de pluma, que abarcó desde Punta Banda hasta la boca norte del Estero de Punta Banda. Durante el evento Santana (figura 11b) se observó que la acumulación de partículas coincidió con las zonas donde se detectó el remolino anticiclónico, cerca de la Playa Municipal y el remolino ciclónico, cerca de la boca norte de la bahía (figura 9b). El remolino anticiclónico coincidió con la estructura observada en las trayectorias de las partículas situada frente a la Playa Municipal (figura 10b). En las zonas donde aparecen los remolinos se observó una alta concentración de partículas en una región de ~6 km de largo, desde la boca del Estero de Punta Banda hasta la Playa Municipal. Estas observaciones coinciden dinámicamente con la idea de que los remolinos representan barreras físicas, que atrapan partículas, de particular importancia en el interior de la BTS.

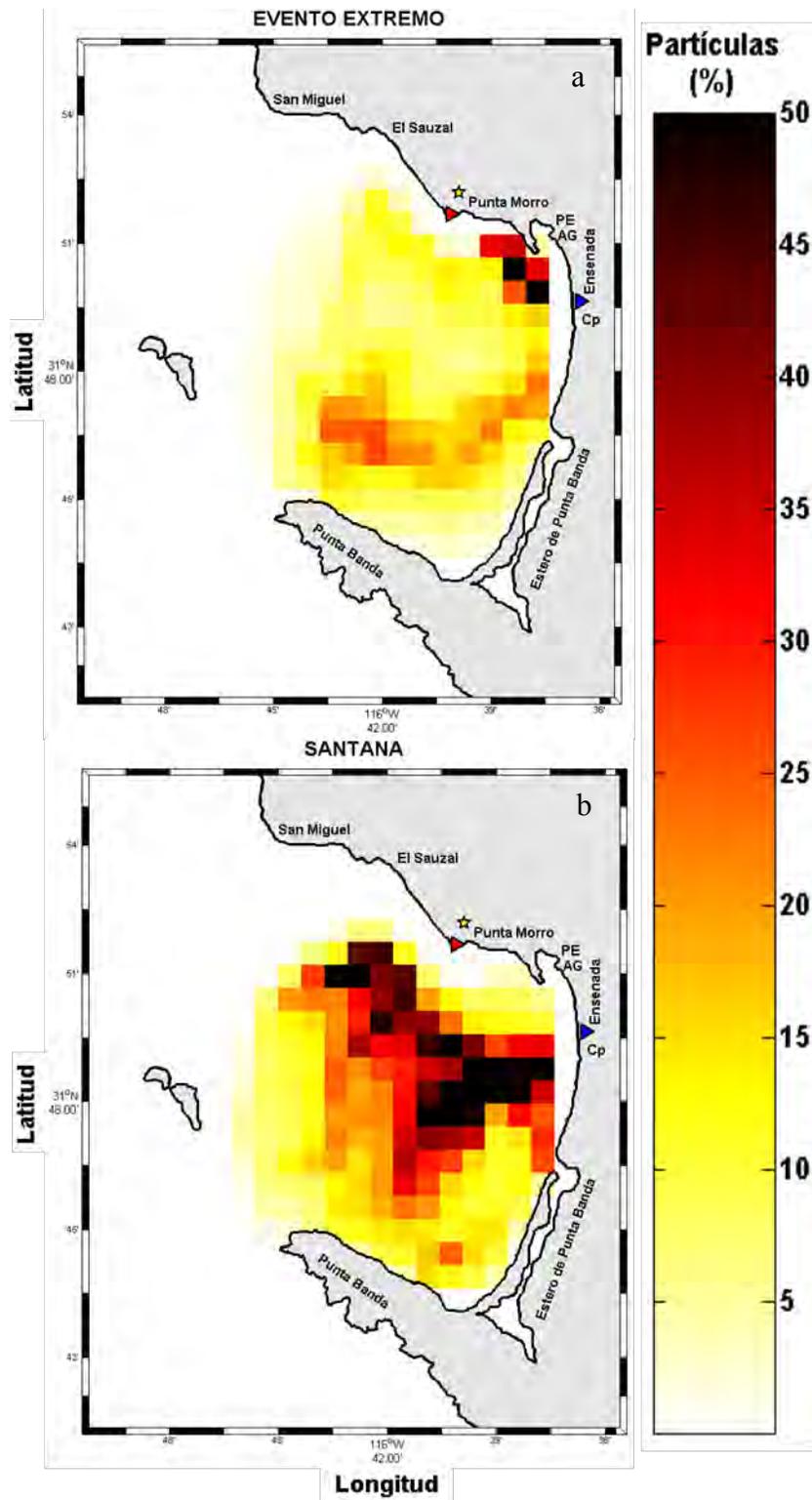


Figura 11. Distribución espacio-temporal de las partículas liberadas en la BTS para el evento extremo y el evento Santana, codificada en colores. La barra de colores representa el porcentaje de partículas observadas en cada localidad, para cada evento.

5.5. Boyas de deriva

En base a las condiciones meteorológicas descritas para cada estación del año en la sección 5.1 más arriba, los muestreos realizados con boyas de deriva durante los tres periodos fueron tomados como representativos de la época de verano. Para cada experimento se presentan en la figura 12 las trayectorias descritas por las boyas de deriva. Los puntos de color azul muestran las posiciones donde fueron liberadas las boyas y las líneas rojas con puntos negros muestran las trayectorias descritas por estas.

Con la metodología descrita anteriormente, se representaron 23 boyas lanzadas a la BTS (figura 12) que abarcaron los tres periodos descritos anteriormente. En términos generales la mayoría de las boyas de deriva tendieron a permanecer por más tiempo en la parte norte de la bahía, y posteriormente se dirigieron hacia la costa, donde permanecieron y se dirigieron paralelos a esta. Se observó en dos de los experimentos la entrada de dos boyas al Estero de Punta Banda, el primer caso sucedió cuando una de las boyas colocada en la parte sur entró al Estero de Punta Banda y salió con dirección hacia el noreste, permaneciendo frente a la Playa Municipal y consecutivamente siguió la línea de costa hasta la altura de Punta Morro. El otro cuando una de las boyas colocada en la parte sur de la BTS permaneció frente a la boca del Estero de Punta Banda entró y salió de este para terminar su desplazamiento frente a la Playa Municipal.

Con las boyas de deriva se pudo observar que estas lograron entrar y salir del Estero de Punta Banda, esto no se pudo observar con los radares, ya que no se tiene cobertura para esta zona de la costa. Por tanto, las boyas nos pueden ayudar a obtener mayor resolución de la dispersión cerca de la costa y dentro del Estero de Punta Banda. Las boyas mostraron

evidencia que estas llegaron a salir de la bahía por la zona de la Playa Municipal y la barra del Estero de Punta Banda. Se registró que tres de estas abandonaron la BTS por la costa; una frente a Punta Morro, otra en la parte sur de la boca del Estero de Punta Banda sobre la barra, y la última sobre la barra del Estero de Punta Banda en la zona sur. Cabe mencionar que son las principales zonas de la BTS donde se han encontrado que existe la mayor acumulación de partículas.

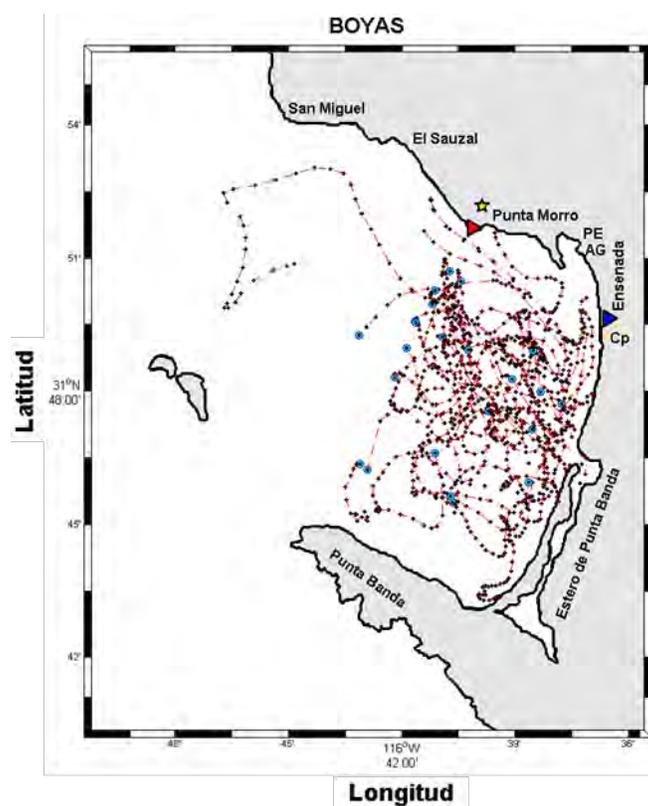


Figura 12. Trayectorias descritas por boyas de deriva en la BTS, el Punto de color azul muestra el punto de inicio de las boyas y las líneas rojas con puntos negros, representan los trayectos de cada boya, para la estación de verano.

Se muestra a continuación un gráfico de la distribución espacio-temporal de las boyas de deriva (figura 13), representativo de la época de verano, éste se encuentra codificado en colores. Para obtener el gráfico se calculó el valor de ocurrencia (presencia) para cada una de las celdas de la malla. El valor máximo calculado fue utilizado para obtener porcentajes de las observaciones de las boyas en cada malla (figura 13). Se observó que las boyas se distribuyeron principalmente desde la parte norte de la boca del Estero de Punta Banda abarcando gran parte de la Playa Municipal (~6 km), y la zona frente a Punta Morro. Se observó también, frente a la barra del Estero de Punta Banda una zona de acumulación de partículas que abarcó aproximadamente 3 km (figura 13).

La comparación de las trayectorias de las boyas a la deriva cercanas a la superficie y los resultados de la advección de partículas para la época de verano, muestran que existe una zona de acumulación de partículas en la parte norte de la bahía cerca de la costa, que abarca desde la Playa Municipal hasta el Puerto de Ensenada. En términos generales las boyas llegan a mostrar la misma zona de acumulación de partículas en la parte norte en la zona de la Playa Municipal. Sin embargo se observó que con las boyas de deriva existe una distribución más hacia fuera de la costa y esto puede ser debido a que es la zona donde se colocaron las boyas en un tiempo inicial.

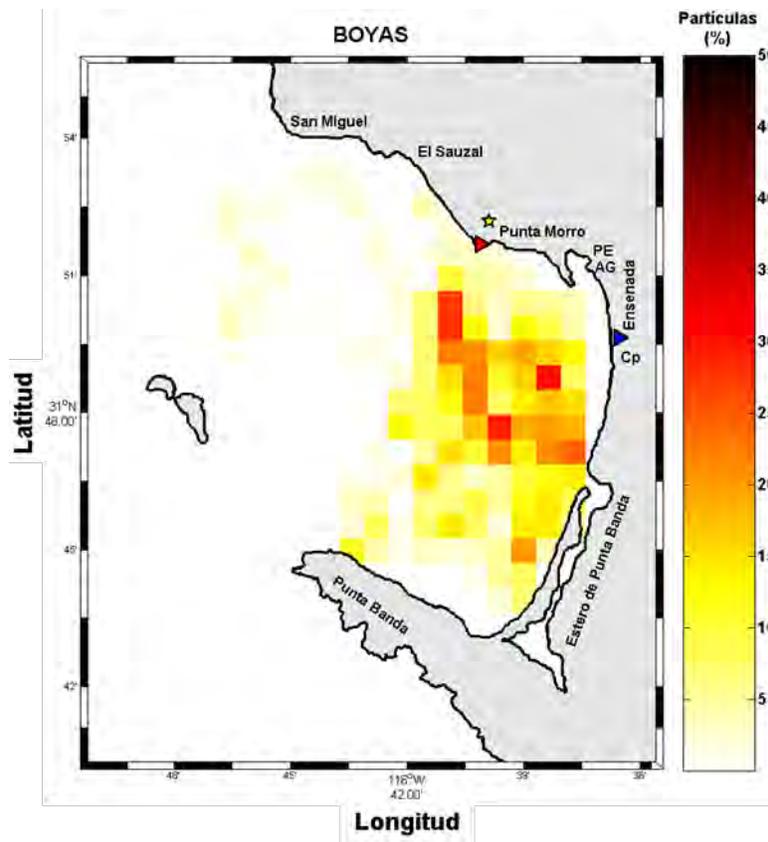


Figura 13. Distribución espacio-temporal de las boyas liberadas en la BTS, codificada en colores. La barra de colores representa el porcentaje de partículas observadas en cada localidad, para la estación de verano.

6. Discusión

En este trabajo se presenta un análisis de los patrones de circulación superficial medidos con radares de alta frecuencia para obtener los patrones espacio-temporales de la distribución de partículas en la Bahía de Todos Santos (BTS). El análisis pretende el caracterizar estacionalmente aquellas zonas en el interior de la bahía donde partículas vertidas puedan permanecer por más tiempo. Aún cuando las aguas residuales vertidas al medio marino reciban un tratamiento previo, la mayor de las veces contienen nutrientes en exceso que promueven el desarrollo de algas y bacterias, las cuales afectan los niveles de oxígeno (condiciones anóxicas) y promueven la eutroficación del ambiente marino (Socolofsky y Jirka, 2005). También propician ambientes variados que causan que los ecosistemas bentónicos tengan poca diversidad (Encada-Fleites y Millán-Núñez, 1990; Segovia-Zavala *et al.*, 1988). Estudios como el desarrollado en este trabajo permiten entender la dinámica de sustancias vertidas en el medio marino, conocer el destino final de estas, y con este conocimiento eventualmente coadyuvar a lograr un mejor manejo de los ecosistemas con una fuerte influencia antropogénica. Los estudios pueden servir para caracterizar zonas donde se puedan dispersar rápidamente partículas y áreas donde estas lleguen a acumularse. Como se estableció anteriormente, la importancia de conocer estas zonas radica en que la BTS es receptora de descargas domésticas e industriales (Gutiérrez-Galindo *et al.*, 2010; Muñoz-Barbosa *et al.*, 2012), por lo que la acumulación de sustancias vertidas puede ocasionar problemas de tipo ecológico (como cambiar la riqueza y abundancia de las especies, Oberholster *et al.*, 2008; de-la-Ossa-Carretero *et al.*, 2012) y de salud.

Los flujos promedio en la bahía (figura 6) mostraron que la dirección principal de las corrientes superficiales a lo largo del año es hacia el sureste, con una entrada preferencial por la boca norte. Se encontró que la circulación superficial es principalmente ciclónica, a excepción de la época de otoño donde se observa que parte de la circulación es anticiclónica en la región sur cerca de la costa (figura 6d), con corrientes más débiles ($< 5 \text{ cm s}^{-1}$) y menor variabilidad espacial. En términos generales se observó en los flujos medios que las corrientes superficiales entran a la bahía por la boca norte, lo que a su vez origina que la mayor acumulación de partículas se produzca en la zona a lo largo de la costa. Bajo condiciones atípicas (no estacionales, Fig. 8) las corrientes durante condiciones de viento intenso ($>4 \text{ m s}^{-1}$) fueron intensas ($>15 \text{ cm s}^{-1}$) hacia el interior de la BTS por ambas bocas (norte y sur). Durante condiciones de vientos Santana cuando el viento es débil ($\sim 2 \text{ m s}^{-1}$) el flujo predominante fue una corriente que sale por ambas bocas, y en el caso de la boca norte, el flujo bordea la costa. Las trayectorias de las boyas de deriva proporcionaron evidencia de que esta corriente existe.

Espacialmente se observó que las corrientes son más intensas en la parte sur de la BTS, cerca de las bocas y más débiles en la zona norte. Así mismo se observó que son más intensas cerca de las bocas y más débiles cercanas a la costa. Estacionalmente las velocidades de las corrientes son intensas en verano y primavera (cuando los vientos son más persistentes) y débiles en invierno y otoño (cuando los vientos son variables).

Para obtener los patrones de dispersión y trayectorias de partículas dentro de la BTS, los campos vectoriales promedio por estación del año se utilizaron para liberar artificialmente partículas y obtener las trayectorias y posiciones para realizar un conteo de acumulación y la evaluación de los parámetros de dispersión para determinar las zonas de mayor acumulación. Este análisis también permitió obtener una estimación de los tiempos de residencia de las partículas dentro de la BTS. Se encontró que las partículas tienden a permanecer por menos tiempo en una región cuando la velocidad de las corrientes es mayor, y viceversa. Se observó que los mayores tiempos de residencia de las partículas ocurren en la época de otoño e invierno cuando las corrientes son más débiles, y menores en verano y primavera cuando las velocidades de las corrientes son más intensas. Para cada época del año se identificaron las principales zonas donde las partículas pueden llegar a permanecer por tiempos prolongados dentro de la BTS. Especialmente las zonas principales de alta concentración de partículas está relacionada con zonas donde las corrientes son más débiles ($< 5 \text{ cm s}^{-1}$), principalmente en las zonas cercanas a la costa, mientras que las zonas de mayor dispersión de partículas ocurrieron en las bocas (norte y sur) de la bahía donde las corrientes son más intensas. Para la época de verano (figura 8a) cuando las corrientes son más intensas se encontró que la acumulación sólo ocurre para la zona del Puerto de Ensenada, mientras que para la época de otoño cuando las corrientes en casi toda la BTS son débiles ($< 5 \text{ cm s}^{-1}$) las principales zonas de acumulación se observan en la zona de la Playa Municipal y frente al Estero de Punta Banda.

Los resultados obtenidos con las mediciones descritas anteriormente son de alta relevancia ya que diversos estudios advierten que para el Puerto de Ensenada y el Arroyo El Gallo, se han encontrado evidencias de contaminación como organismos marinos

(poliquetos, Encalada-Fleites y Millán-Núñez, 1990; Jiménez-Pérez *et al.*, 1992), valores altos de nutrientes (Segovia-Zavala *et al.*, 1988), coliformes y bacterias (Portillo-López y Lizárraga-Partida, 1997). Adicionalmente, son la zona del Puerto de Ensenada y la Playa Municipal zonas donde se encuentra la mayor cantidad de descargas domésticas, industriales y escorrentías agrícolas hacia la bahía (Lubinsky-Jinich y Victoria-Cota, 2006; Zamora-Castro *et al.*, 2007; Gutiérrez-Galindo *et al.*, 2010; Muñoz-Barbosa *et al.*, 2012). El hecho de que las zonas de retención obtenidas en este trabajo son a su vez los receptáculos de las descargas aledañas, sugiere que se deben tomar medidas adicionales de mitigación para evitar causar un mayor impacto ante la creciente presión del incremento de población. Las medidas pueden incluir la desviación de las descargas hacia regiones de evaporación y/o sedimentación, hacia áreas con mayor dispersión por medio de emisarios submarinos (por ejemplo hacia la boca sur entre las islas y Punta Banda), o al incremento en la capacidad en el tratamiento y reuso de aguas residuales. El establecimiento de estas u otras acciones corresponde a las autoridades de los diferentes niveles de gobierno, las cuales pueden utilizar la información aquí generada para la toma de decisiones.

Referencias

- Álvarez-Sánchez L. G., 1977. Vientos en la Bahía de Todos Santos, Baja California. *Ciencias Marinas*, **4**: 81-89.
- Álvarez-Sánchez L. G., R. Hernández-Walls, R. Durazo-Arvizu, 1988. Patrones de deriva de trazadores Lagrangeanos en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*, **14**: 135-162.
- Argote-Espinoza M. L., F. J. Gavidia-Medina, A. Amador-Buenrostro, 1991. Wind-induced circulation in Todos Santos Bay, B. C. México. *Atmósfera*, **4**: 101-115.
- Bolt E. M., A. Luttmann, S. Kramer, R. Basnayake, 2012. Measurable dynamics analysis of transport in the Gulf of Mexico during the oil spill. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, **22**:1-13.
- Castro R., A. Pares-Sierra, S. G. Marinone, 2003. Evolución y extensión de los vientos Santa Ana de febrero de 2002 en el océano, frente a Baja California. *Ciencias Marinas*, **29**: 275-281.
- Cetina P., J. Candela, J. Sheinbaum, J. Ochoa, A. Badan, 2006. Circulation along the Mexican Caribbean coast. *Journal of Geophysical Research*, **111**:1-19.
- Conabio, 2008. Capital natural de México, Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. México, 300 pp.
- Contreras-Espinosa F., B. G. Warner, 2004. Ecosystem characteristics and management considerations for coastal wetlands in Mexico. *Hydrobiologia*, **511**:233-245.
- Coulliette C., F. Lekien, J. D. Paduan, G. Haller, J. E. Marsden, 2007. Optimal pollution mitigation in Monterey Bay based on coastal radar data and nonlinear dynamics. *Environmental Science and Technology*, **41**:6562-6572.
- De Jonge V. N., M. Elliot, 2001. EUTROPHICATION. (En Steele J. H., Thorpe S. A. and Turekian K. K. Encyclopedia of Ocean Science. San Diego, *Academic Press*, 852-870).
- de-la-Ossa-Carretero J. A., Y. Del-Pilar-Ruso, F. Giménez-Casalduero, J. L. Sánchez-Lizaso, 2012. Sensitivity of amphipods to sewage pollution. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **96**:129-138.
- Duchon C. E., 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions. *Journal of Applied Meteorology*, **18**:1016-1022.

- Durazo-Arvizu R., L. G. Álvarez-Sánchez, 1988. Cinemática de la región sur de la Bahía de Todos Santos, B. C. *Ciencias Marinas*, **14**: 95-114.
- Emery W. J., R. E. Thomson, 2011. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. 2^a ed., New York, Elsevier, 619 pp.
- Encalada-Fleites R. R., E. Millán-Núñez, 1990. Impacto de las aguas residuales industriales y domésticas sobre las comunidades bentónicas de la Bahía de Todos Santos, Baja California, México. *Ciencias Marinas*, **16**:121-139.
- Espinosa-Carreón T. L., G. Gaxiola-Castro, J. M. Robles-Pacheco, S. Nájera-Martínez, 2001. Temperatura, salinidad, nutrientes y clorofila *a* en aguas costeras de la Ensenada Sur de California. *Ciencias Marinas*, **27**:397-422.
- Falco P., A. Griffa, P. M. Poulain, E. Zambianchi, 2000. Transport properties in the Adriatic Sea as deduced from drifter data. *Journal of Geophysical Oceanography*, **30**:2055-2071.
- Gavidia-Medina F. J., 1988. Simulación numérica de la circulación barotrópica en la Bahía de Todos Santos B. C., *Tesis de Maestría*, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California, 95 pp.
- Grijalva-Chon J. M., R. Castro-Longoria, M. Gregory-Hamman, 1985. Temperatura y visibilidad en la Bahía de Todos Santos, B. C., México, octubre de 1982 a septiembre de 1983. *Ciencias Marinas*, **11**: 39-48.
- Gutiérrez-Galindo E. A., A. Muñoz-Barbosa, 2001. Variabilidad temporal de corto periodo de Ag, Cd y Cu en *Mytilus californianus* y la efectividad de este organismo como biomonitor. *Ciencias Marinas*, **27**:269-288.
- Gutiérrez-Galindo E. A., A. Muñoz-Barbosa, M. R. Mandujano-Velasco, L. W. Daesselé, M. V. Orozco-Borbón, 2010. Distribution and enrichment of silver and cadmium in coastal sediments from Bahía Todos Santos, Baja California, México. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **85**:391-396.
- Heemink A. W. 1990. Stochastic modelling of dispersion in shallow waters. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, **4**:161-174.
- James I. D. 2002. Modelling pollution dispersion, the ecosystem and water quality in coastal water: a review. *Environmental Modelling and Software*, **17**:363-385.
- Jiménez-Pérez L. C., F. M. Molina-Peralta, E. Núñez-Fernández, 1992. Efecto de las aguas residuales sobre la macrofauna bentónica de las playas arenosas en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*, **18**:35-54.

- Kennish M. J., 2001. Practical Handbook of Marine Science, 3^a ed., Boca Raton, USA, CRC Press, 876 pp.
- Lalli C. M., T. R. Parsons, 1997. Biological oceanography: an introduction. 2^{da} ed., Vancouver, Elsevier, 314 pp.
- Lares M. L., S. G. Marinone, I. Rivera-Duarte, A. Beck, S. Sañudo, 2009. Spatial variability of trace metals and inorganic nutrients in surface waters of Todos Santos Bay, México in the summer of 2005 during a red tide algal bloom. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **56**:707-716.
- Larrañaga-Fu M. J., 2013. Circulación superficial de la Bahía Todos Santos Baja California, México, estimada mediante radares de alta frecuencia., *Tesis de licenciatura*, Universidad Autónoma de Baja California, (en proceso).
- Lekien F., C. Coulliete, A. J. Mariano, E. H. Ryan, L. K. Shay, G. Haller, J. Marsden, 2005. Pollution release tied to invariant manifold: A case study for the coast of Florida. *Physica D.*, **210**:1-20.
- Lubinsky-Jinich D., Victoria-Cota N. L., 2006. Un análisis preliminar sobre la etno-oceanografía de la Bahía Todos Santos y la percepción de los usuarios de dos playas de Ensenada, Baja California, México., *Tesis de Licenciatura*, Universidad Autónoma de Baja California, 111 pp.
- Mateos E., S. G. Marinone, A. Parés-Sierra, 2009. Towards the numerical simulation of the summer circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, B. C. Mexico. *Ocean Modelling*, **27**:107-112.
- Mateos-Farfán E., 2010. Modelación de la circulación costera estacional en la región norte de Baja California y sur de California y de la Bahía de Todos Santos. *Tesis de doctorado*, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California, 121 pp.
- Miranda-Bojórquez L. E., 2012. Caracterización de las corrientes en las entradas y alrededores de la Bahía de Todos Santos., *Tesis de Maestría*, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California, 57 pp.
- Morales-Zúñiga C., 1977. Variaciones estacionales de la temperatura en la Bahía de Todos Santos, B. C. *Ciencias Marinas*, **4**: 23-33.
- Muñoz-Barbosa A., E. A. Gutiérrez-Galindo, L. W. Daesslé, M. V. Orozco-Borbón, J. A. Segovia-Zavala, 2012. Relationship between metal enrichments and a biological

- adverse effects index in sediments from Todos Santos Bay, northwest coast of Baja California, México. *Marine Pollution Bulletin*, **64**:405-409.
- Oberholster P. J., A. M. Botha, T. E. Cloete, 2008. Biological and chemical evaluation of sewage water pollution in the Rietvlei nature reserve wetland area, South Africa. *Environmental pollution*, **156**:184-192.
- Pavía E., S. Reyes, 1983. Variaciones espaciales y estacionales del viento superficial en la Bahía de Todos Santos, B. C., *Ciencias Marinas*, **9**:151-167.
- Poje A. C., M. Toner, A. D. Kirwan Jr., C. K. R. Jones, 2002. Drifter launch strategies based on Lagrangian templates. *Journal of physical Oceanography*, **32**:1855-1869.
- Portillo-López A., M. L. Lizárraga-Partida, 1997. Detección de *Vibrio cholerae* O1 en diferentes hábitats de la Bahía de Todos Santos, Baja California, México. *Ciencias Marinas*, **23**: 435-447.
- Poulain P. M., P. P. Niiler, 1989. Statistical analysis of the surface circulation in the California Current System using satellite-tracked drifters. *Journal of Physical Oceanography*, **19**:1588-1603.
- Sañudo-Wilhelmy S. A., A. Morales-Chávez, J. A. Vargas-Flores, 1984. Contaminación fecal en la Bahía de Ensenada, Baja California, México. *Ciencias Marinas*, **10**: 7-17.
- Segovia-Zavala J. A., I. Rivera-Duarte, F. J. del Valle Villorín, 1988. Efectos de desechos orgánicos en las zonas adyacentes a los afluentes en la Bahía de Todos Santos: nutrientes. *Ciencias Marinas*, **14**: 81-94.
- Segovia-Zavala J. A., M. S. Galindo-Bect, 1984. Fuentes de contaminación por materia orgánica en la Bahía de Todos Santos, Baja California. I. Caracterización y eficiencia de la planta de tratamiento de aguas negras de la ciudad de Ensenada, Baja California. *Ciencias Marinas*, **10**:19-32.
- Shadden S. C., F. Lekien, J. D. Paduan, F. P. Chavez, J. E. Marsden, 2009. The correlation between surface drifters and coherent structures based on high-frequency radar data in Monterey Bay. *Deep-Sea Research*, **56**:161-172.
- Socolofsky S. A., G. H. Jirka, 2005. Special topics in mixing and transport processes in the environment, 5^{ta} ed. Texas, A & M University, 172 pp.
- Sommers W. T., 1978. LFM Forecast variables related to Santa Ana wind occurrences. *Monthly Weather Rev.*, **106**:1307-1316.

Venturini N., P. Muniz, M. C. Bicego, C. C. Martins, L. R. Tommasi, 2008. Petroleum contamination impact on macrobenthic communities under the influence of an oil refinery: Integrating chemical and biological multivariate data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **78**:457-467.

Zamora-Castro J., J. Paniagua-Michel, C. Lezama-Cervantes, 2007. A novel approach for bioremediation of a coastal marine wastewater effluent based on artificial microbial mats. *Marine biotechnology*, **10**:181-189.