



# UNIVERSIDAD DEL MAR

Campus Puerto Ángel, Oaxaca

División de Estudios de Postgrado

## **Análisis de circulación y dispersión de partículas superficiales en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro  
en Ciencias: Ecología Marina

**Presenta:**

**Irving Geovanni Cervantes Audelo**

Director:

Dr. Reginaldo Durazo Arvizu

Co-director:

Dr. Xavier Flores Vidal

Puerto Ángel, Oaxaca, México, Diciembre de 2013

Puerto Ángel, Pochutla, Oaxaca a 21 de noviembre de 2013

DR. JUAN FRANCISCO MERAZ HERNANDO  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
DE LA UNIVERSIDAD DEL MAR  
P R E S E N T E

Después de haber analizado y evaluado la tesis “**Análisis de circulación y dispersión de partículas superficiales en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México**” que presenta el Lic. Oc. **Irving Geovanni Cervantes Audelo**, le comunicamos que dicho documento cumple con los requisitos académicos para su impresión y defensa en el examen profesional correspondiente.

Sin más por el momento, quedamos de usted.

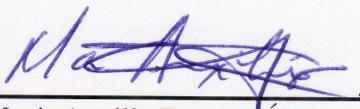
Atentamente:



Dr. Reginaldo Durazo Arvizu  
Director



Dr. Xavier Flores Vidal  
Co-director



Dra. María Auxilio Esparza Álvarez  
Revisor



M. en C. Bárbara Zavala Trujillo  
Revisor



M. en C. Pedro Cervantes Hernández  
Revisor

## 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

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 (143803).

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Reginaldo Durazo (el chief) por brindarme su apoyo, consejos, comentarios y los recursos necesarios para la culminación de este trabajo. Al Dr. Xavier Flores Vidal por la ayuda y comentarios a este trabajo. A la Dra. Auxilio Esparza Álvarez 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.

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

A todo el grupo OCOMEX (Observatorio de Corrientes Mexicanas) de UABC y al grupo de oleaje de CICESE.

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

A mis compas de la UMAR: Xo, Tatiana, Renata, Momia, Tania Ortiz, Cynthia Méndez, Aline Mejía, Ita, Yulang, Elder, Lobato, Almita Mendoza, Genobaby, Karen, Lalo Greñas, Lalo Gupy, Rafa Huerta, 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 Romero, 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.

## Resumen

La Bahía de Todos Santos (BTS) se localiza en el Océano Pacífico al noroeste del estado de Baja California México, entre los  $31^{\circ} 45'$  y  $31^{\circ} 54'$  de latitud norte y  $116^{\circ} 36'$  y  $116^{\circ} 48'$  de longitud oeste. La BTS cuenta con una superficie de  $\sim 200 \text{ km}^2$  y dos bocas: una con  $\sim 12 \text{ km}$  de ancho y profundidades menores a los  $50 \text{ m}$  y otra de  $\sim 5 \text{ km}$  con profundidades hasta de  $300 \text{ m}$  en el cañón submarino. Se obtuvieron mediciones de corrientes superficiales en la BTS con radares de alta frecuencia para el año de 2010. El objetivo de este trabajo es el estudiar la dispersión de partículas en la BTS utilizando las mediciones de corrientes superficiales, con el fin de determinar zonas de acumulación o de rápida dispersión de partículas como puede ser cualquier contaminante que flote en la superficie. En particular, la acumulación de contaminantes puede impactar de manera importante a especies marinas que habitan en la zona, y pueden degradar comunidades bénticas. Dicha degradación puede ocurrir en la estructura de la misma comunidad, como es la riqueza, dominancia, diversidad y abundancia de especies. A partir de los campos de corrientes superficiales se utiliza un esquema Runge-Kutta de segundo orden, para adveccionar partículas y obtener las posiciones de éstas; como apoyo se utilizan boyas de deriva para identificar zonas de acumulación de partículas, que no puedan ser resueltas por la advección de partículas simuladas. Se encontró que las estaciones climáticas de mayor a menor dispersión de partículas son verano, primavera, invierno y otoño. Espacialmente, se encontró que las zonas de mayor dispersión son las bocas de la BTS y las de menor dispersión son el Estero de Punta Banda, el Puerto de Ensenada y las Playas Municipales.

**Palabras clave:** *Dispersión de partículas, corrientes superficiales, Bahía de Todos Santos.*

# Contenido

	Página
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>iii</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>iv</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>vi</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>viii</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>10</b>
<b>2. Objetivo</b> .....	<b>15</b>
2.1. Objetivos particulares .....	15
<b>3. Área de estudio</b> .....	<b>16</b>
<b>4. Metodología</b> .....	<b>20</b>
4.1. Datos meteorológicos .....	20
4.2. Datos de corrientes .....	22
4.2.1. <i>Radares de alta frecuencia</i> .....	22
4.2.2. <i>Boyas de deriva</i> .....	25
4.3. Advección de partículas .....	27
<b>5. Resultados</b> .....	<b>29</b>
5.1. Meteorología .....	30
5.2. Corrientes .....	35
5.3. Patrones de dispersión de partículas .....	39
5.4. Eventos extraordinarios .....	46
5.5. Boyas de deriva .....	53
<b>6. Discusión</b> .....	<b>56</b>
<b>7. Conclusiones</b> .....	<b>61</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>62</b>
<b>Apéndice A</b> .....	<b>68</b>
<b>Apéndice B</b> .....	<b>69</b>

## 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..... 18
- 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. Las áreas sombreadas de color gris indican los periodos utilizados como representativos de cada una de las estaciones del año, la línea azul indica el tiempo donde existen datos y los espacios en blanco indican el tiempo donde no existen datos. .... 23
- 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)..... 26
- Figura 4.** Rosa de vientos que muestran las direcciones principales (en porcentaje) de las que proviene el viento para cada estación del año. Los triángulos de color azul muestran las direcciones y los círculos indican el porcentaje. .... 31
- 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 amarillas del Santana..... 34
- Figura 6.** Corrientes superficiales promedio 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  $15 \text{ cm s}^{-1}$ . .... 37

<b>Figura 7.</b> 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. ....	40
<b>Figura 8.</b> 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. ....	44
<b>Figura 9.</b> Corrientes superficiales promedio 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 $15 \text{ cm s}^{-1}$ . ....	48
<b>Figura 10.</b> 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. ....	50
<b>Figura 11.</b> 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. ....	52
<b>Figura 12.</b> 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. ....	54
<b>Figura 13.</b> 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. ....	55

### **Lista de tablas**

<b>Tabla 1.</b> Direcciones predominantes de los vientos en porcentaje y velocidades máximas ( $\text{m s}^{-1}$ ) alcanzadas para cada una de las estaciones del año. ....	32
<b>Tabla 2.</b> Velocidad promedio de las corrientes y tiempo de residencia máximo de las partículas para cada estación del año. ....	45

# 1. Introducción

La zona costera, una zona dinámica que constituye la interface entre el continente y el océano, abarca desde la plataforma continental hasta donde se observa la influencia de la brisa marina. Es considerada de gran importancia ya que cohabitan distintos ecosistemas marinos como son arrecifes de coral, bosques de algas, estuarios, marismas, bahías y lagunas costeras (Lalli y Parsons, 1997; Conabio, 2008). Alrededor de la zona costera también habitan cerca de dos terceras partes de la población mundial (Komar, 1998). Estos asentamientos humanos traen consigo el desarrollo de 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 de material orgánico y desechos industriales vertidos a estuarios, lagunas costeras, bahías o cualquier cuerpo de agua costero, pueden degradar seriamente la calidad del agua y ocasionar problemas por el enriquecimiento del agua por nutrientes, causando lo que se conoce como “*eutrofización o eutrofización*” (De Jonge y Elliot, 2001; Socolofsky y Jirka, 2005). En las áreas costeras, los ecosistemas marinos delicados (arrecifes de coral, bosques de algas, estuarios, etc.) son algunas veces impactados por desechos que les son lanzados, los cuales afectan a las especies marinas que habitan en la zona y degradan comunidades, que a su vez se manifiesta en la reducción del número de especies y diversidad (Zamora-Castro *et al.*, 2007; Lalli y Parsons, 1997; Venturini *et al.*, 2008). Las zonas contaminadas donde se encuentran sustancias o elementos tóxicos que son

perjudiciales para organismos marinos, pueden perder la estructura de sus comunidades, lo cual puede reflejarse en cambios de la riqueza, diversidad y dominancia 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 impacto sobre los ambientes frágiles y de gran diversidad biológica. Este impacto sobre los ecosistemas marinos puede llegar a ocasionar la pérdida de hábitats en zonas intermareales y dunas, debidos a la deforestación y al cambio del uso del suelo para desarrollos urbanos.

La Bahía de Todos Santos (BTS) se encuentra ubicada junto a la ciudad de Ensenada en 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).

La legislación mexicana “CE-CCA-001/89” ha establecido que las aguas para uso recreativo y protección de la vida acuática, deben tener como límites máximos permisibles de coliformes fecales (CF), determinadas por el método de número más probable (NMP), valores de 200 NMP CF/100 ml (Diario Oficial de la Federación, 1989). 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 marinos, que son reflejados en la abundancia relativa y diversidad de las especies marinas (Encalada-Fleites y Millán-Núñez, 1990). En la zona cercana al Puerto de Ensenada y las Playas Municipales se han determinado valores que van de  $\sim 3.1 \times 10^4$ - $2.5 \times 10^6$  NMP CF/100 ml para agosto a diciembre (Orozco-Borbón *et al.*, 1983; Orozco-Borbón y Zañudo-Wilhelmy, 1988). Para las localidades de El Sauzal, el Puerto de Ensenada y la desembocadura del arroyo El Gallo se han reportado valores de 16,000 NMP CF/100 ml de mayo a agosto (época turística), con influencia de estas hasta 5 km fuera de la costa (Zañudo-Wilhelmy *et al.*, 1984). A nivel de toda la bahía se han reportado valores de 350 NMP CF /100 ml para otoño e invierno (Orozco-Borbón *et al.*, 1994). Se han reportado 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). Un estudio más general sobre la calidad de agua en los

ecosistemas de México (INE-SEMARNAT, 2000), argumenta que la calidad de agua de la BTS tiene un impacto extremo por contener altos valores de coliformes fecales (~287 533 NMP/100 ml), coliformes totales (~5 756 NMP/100 ml), fosfatos (PO<sub>4</sub>), Nitritos (NO<sub>2</sub>) y Nitratos (NO<sub>3</sub>). Estos valores se encuentran por encima de lo establecido para ciertos usos del agua como áreas de cultivo, explotación pesquera de especies de escama, recreación, contacto primario y protección a la vida acuática. Nutrientes como fosfatos (PO<sub>4</sub>), nitratos (NO<sub>2</sub>) y nitritos (NO<sub>3</sub>) 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 µg g<sup>-1</sup> 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 especies de poliquetos (*Capitella capitata* y *Armandia bioculata*) 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 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 del estado 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 (~1 m de la superficie) medidas con radares de alta frecuencia. La dispersión de partículas 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 del estado del ecosistema acuático. Las corrientes son las encargadas de dispersar partículas en el océano, por lo que se espera que a través de las observaciones de las corrientes se establezcan los patrones espacio-temporales de la dispersión de partículas en la BTS. Las partículas en este trabajo son descritas como objetos infinitamente pequeños que se encuentran en la superficie del mar, que pueden representar substancias como grasas, aceites, nutrientes, coliformes, larvas de organismos, plancton así como cualquier material que se encuentre en la superficie marina.

## 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 patrones estacionales de dispersión de partículas dentro de la BTS.
2. Obtener los tiempos de residencia de las partículas para cada estación del año.
3. Caracterizar la variabilidad estacional climática de la dispersión de partículas en la BTS.
4. Estudiar la conexión de los patrones de dispersión obtenidos con el estado de los ecosistemas marinos.

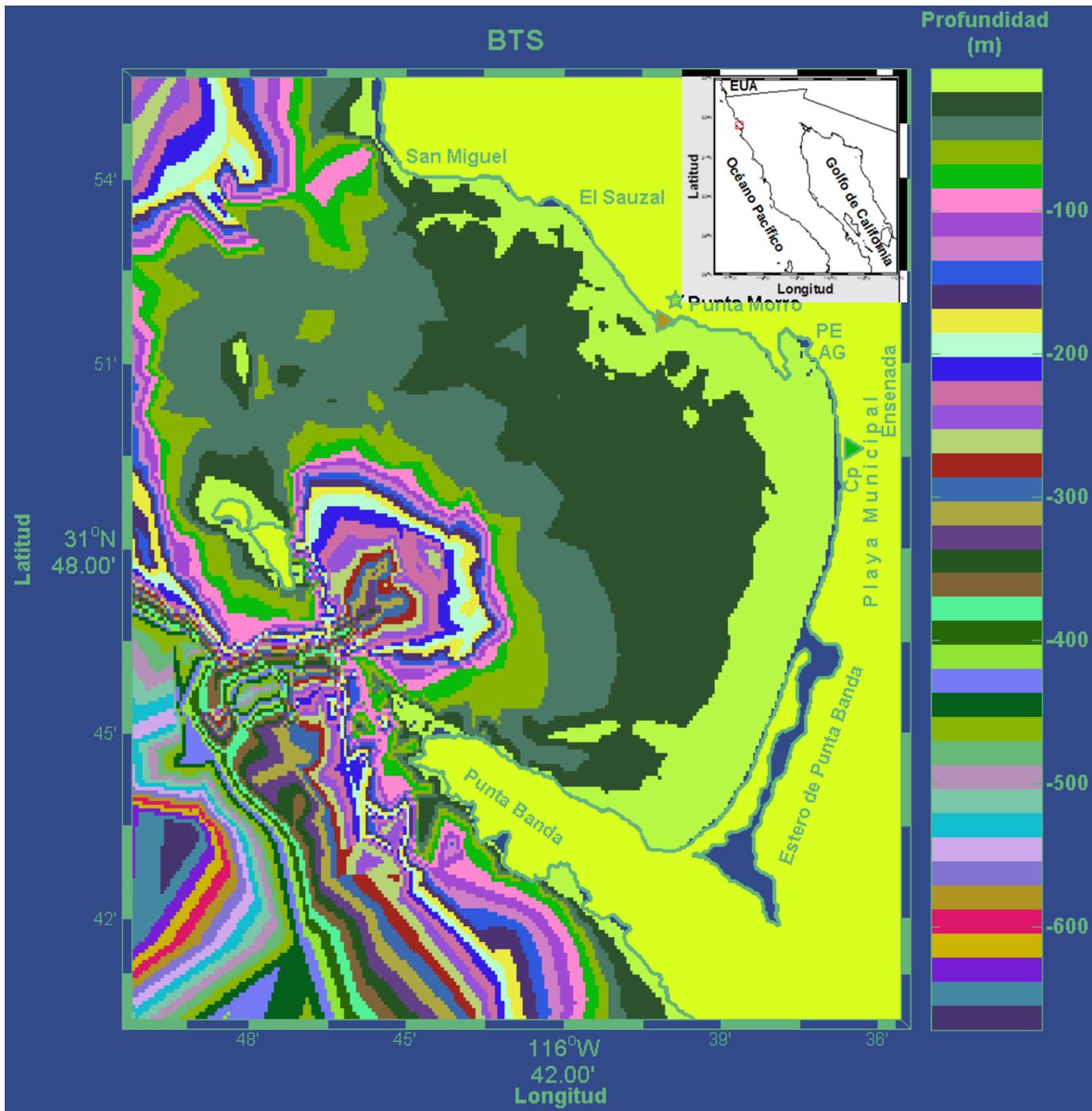
### 3. Área de estudio

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 km<sup>2</sup>, 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. Las temperaturas superficiales del agua de mar 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 el periodo de 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<sup>-1</sup> 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 por presentar velocidades de hasta 22 m s<sup>-1</sup>. 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).

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). Dicho sistema está compuesto por la Corriente de California con flujo hacia el ecuador, la Contracorriente de California (~100-400 m de profundidad) que fluye hacia el polo y la Contracorriente Costera Subsuperficial con dirección hacia el polo que se desplaza a lo largo del talud continental (Lynn y Simpson, 1978). 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 (Espinosa-Carreón *et al.*, 2001).



**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.

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 ( $1.5 \text{ cm s}^{-1}$ ) 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  $\sim 13$  a  $23 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  entre el océano abierto y la bahía.

## 4. Metodología

Este trabajo se basa en el análisis de datos correspondientes a dos periodos de muestreo, para el 2010 se obtuvieron datos meteorológicos y datos de corrientes con antenas de radar de alta frecuencia. Para el 2012 se obtuvieron mediciones de corrientes con boyas de deriva. La metodología aplicada a los datos se describe a continuación en este apartado.

### 4.1. Datos meteorológicos

Con el fin de relacionar la hidrodinámica de la BTS con el forzamiento atmosférico y llegar a identificar los meses que representan a cada una de las estaciones climáticas en la BTS. 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 a intervalos de una hora. Las mediciones horarias de las variables meteorológicas puntuales consistieron en datos de presión atmosférica, humedad relativa, temperatura del aire, velocidad y dirección del viento.

La serie de datos meteorológicos horarios, fueron llevados a promedios diarios para cada una de las variables y posteriormente se graficaron. Para obtener los promedios de la velocidad del viento, los datos fueron tratados de distinta manera, debido a que estos son datos circulares o direccionales, y cuentan con magnitud y dirección por lo que no pueden ser tratados como variables lineales (Apéndice A).

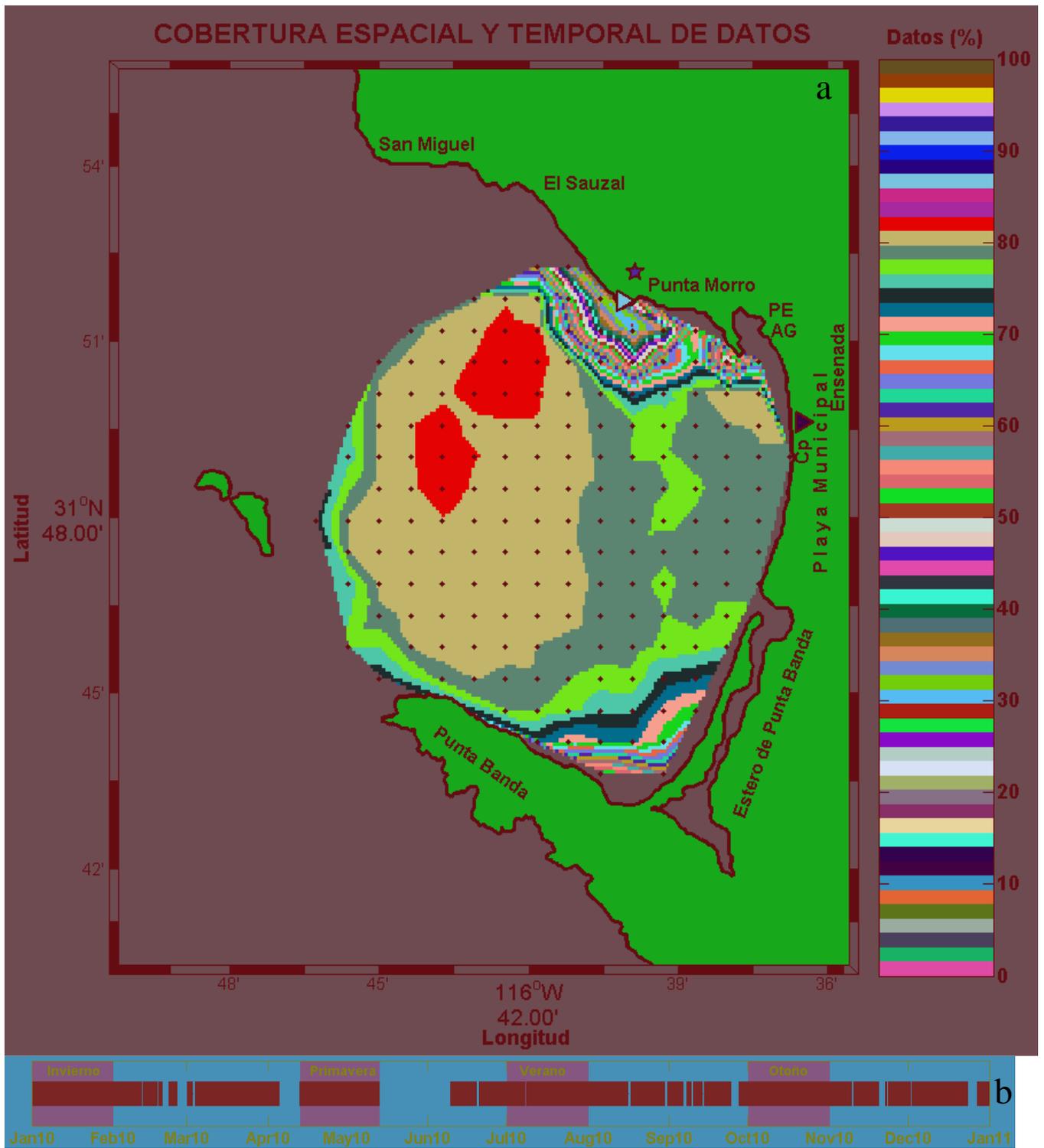
Los datos de promedios diarios del viento se utilizaron para obtener información sobre los porcentajes mensuales de las direcciones dominantes y poder conocer las condiciones atmosféricas a lo largo del año, y con esto llegar a caracterizar cada uno de los meses que componen las diferentes estaciones del año. La serie de datos de viento proporcionaron una mejor caracterización de las estaciones del año. Al obtener la agrupación de los meses antes mencionados, se elaboraron rosas de vientos para cada estación del año y los intervalos que se obtuvieron fueron utilizados para el análisis de las corrientes superficiales medidas con radares de alta frecuencia. Se encontró que los meses que representan a cada una de las estaciones del año son enero, febrero y marzo para invierno, abril, mayo y junio para primavera, julio, agosto y septiembre para verano y octubre, noviembre y diciembre para el otoño.

## 4.2. Datos de corrientes

### 4.2.1. Radares de alta frecuencia

Mediante dos radares de alta frecuencia CODAR (acrónimo en inglés para *Coastal Ocean Dynamics Applications Radar*, [www.codar.com](http://www.codar.com)) instalados en la BTS se obtuvieron mediciones de corrientes superficiales. Estos instrumentos transmiten ondas electromagnéticas que se propagan por la superficie del océano y son reflejadas por las olas. El corrimiento Doppler de la señal reflejada se utiliza para deducir la corriente superficial (Barrick *et al.*, 1977; Paduan y Graber, 1997), obteniendo así por cada antena una corriente radial, es decir, corrientes que se acercan o se alejan de la antena. Se requiere por tanto contar con al menos dos estaciones de radar para obtener mediciones de corrientes en dos dimensiones sobre el área de cobertura (Barrick *et al.*, 1977), ya que al combinar los vectores radiales de dos o más antenas de radar se pueden obtener las corrientes totales referidas en un sistema de coordenadas norte-sur, este-oeste (Flores-Vidal *et al.*, 2011).

En la BTS se obtuvieron mediciones de vectores 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 linealmente para obtener una resolución espacial más gruesa de 1 km, con esto se obtuvo un valor de corriente cada hora en cada uno de los nodos de la malla (figura 2a). Esto se realizó debido a que al obtener información de las corrientes en cada uno de los nodos, estos cuentan con espacios sin datos, debidos a limitaciones de los instrumentos al realizar las mediciones.



**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. Las áreas sombreadas de color gris indican los periodos utilizados como representativos de cada una de las estaciones del año, la línea azul indica el tiempo donde existen datos y los espacios en blanco indican el tiempo donde no existen datos.

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 a calcular, la caracterización estacional de los patrones de corrientes superficiales se obtuvo utilizando solo aquellos meses donde el intervalo sin datos fuera menor a un día, para cubrir los espacios donde no existieron datos, se aplicó una interpolación lineal. Los datos obtenidos fueron utilizados para el cálculo las corrientes superficiales promedio.

Con base en el análisis de viento descrito en la sección anterior se eligieron las condiciones atmosféricas representativas de cada estación del año. Los principales meses que constituyeron a cada una de las estaciones climáticas fueron utilizados para seleccionar un mes que representara a cada una de las estaciones y con esto obtener una serie típica de corrientes, de tal manera que cada uno de los meses seleccionados, es considerado como representativo de cada una de las estaciones climáticas. 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) ver figura 2b.

A cada una de las series mensuales representativas de la temporada del año correspondiente se les aplicó un filtro Lanczos pasa bajas, ver apéndice B (Duchon, 1979; Cetina *et al.*, 2006; Emery y Thomson, 2011), con una frecuencia de corte de  $1/36$  cph (0.0277 Hz). Con la finalidad de eliminar señales de alta frecuencia o componentes de mayor energía, como son las corrientes generadas por la marea y las corrientes inerciales. Se filtraron las corrientes de marea debido a que se ha demostrado con modelos numéricos

que en la BTS (Gavidia-Medina, 1988; Argote-Espinoza *et al.*, 1991), éstas son despreciables para la circulación y por ende para la dispersión de partículas.

Los campos de corrientes horarias se obtuvieron con la metodología antes descrita y los datos adquiridos fueron utilizados para generar gráficos de vectores promedio (corrientes promedio) representativos de cada una de las estaciones. Los campos de corrientes horarios fueron utilizados posteriormente para la advección de partículas en la BTS, como se detalla más adelante en la sección 4.3.

#### *4.2.2. Boyas de deriva*

Se realizaron tres experimentos con boyas a la deriva durante el periodo del 5 al 8 de junio, 28 al 30 de julio y 28 al 31 de agosto de 2012, representativos de condiciones de verano. Estos experimentos sirven como apoyo para conocer otras zonas donde se pudieran estar acumulando partículas, que no puedan ser resueltas, a partir de la advección de partículas simuladas en los campos de corrientes superficiales medidas con los radares de alta frecuencia.

Las boyas utilizadas en los tres experimentos son conocidas como boyas Microstar ([www.pacificgyre.com](http://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, 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 derivan con la corriente 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. Cabe mencionar que las boyas que fueron levantadas y puestas nuevamente en el agua, se consideraron como una nueva trayectoria. Con la metodología descrita anteriormente, se representaron 23 boyas lanzadas a la BTS (figura 12) que abarcaron los tres periodos descritos anteriormente.

Las posiciones fueron graficadas obteniendo las trayectorias descritas para cada una de las boyas (figura 12). Una vez obtenidas las trayectorias, se realizó un conteo del número de veces que se observaron en cada una de las retículas de malla (figura 2a), y se obtuvieron gráficos de la distribución espacio-temporal de las boyas (figura 13). 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).



**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).

### 4.3. Advección de partículas

Una vez aplicado el filtro pasa bajas a los datos de corrientes obtenidos con los radares de alta frecuencia (sección 4.2.1), se procede a la advección de partículas. A partir de los campos vectoriales promedio de corrientes obtenidos, 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. La ecuación (13) fue utilizada para obtener la posición de las partículas advectadas en la BTS. En los mapas vectoriales de corrientes superficiales se advectaron partículas cada hora, para todos los nodos de la malla de la BTS (figura 2a), durante un mes que fuera representativo de cada estación del año. Se obtuvieron las posiciones de las partículas cada hora, para conocer la velocidad de las partículas fuera de los nodos, se realizó una interpolación lineal con la que se obtuvo la velocidad en ese punto.

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

## 5. Resultados

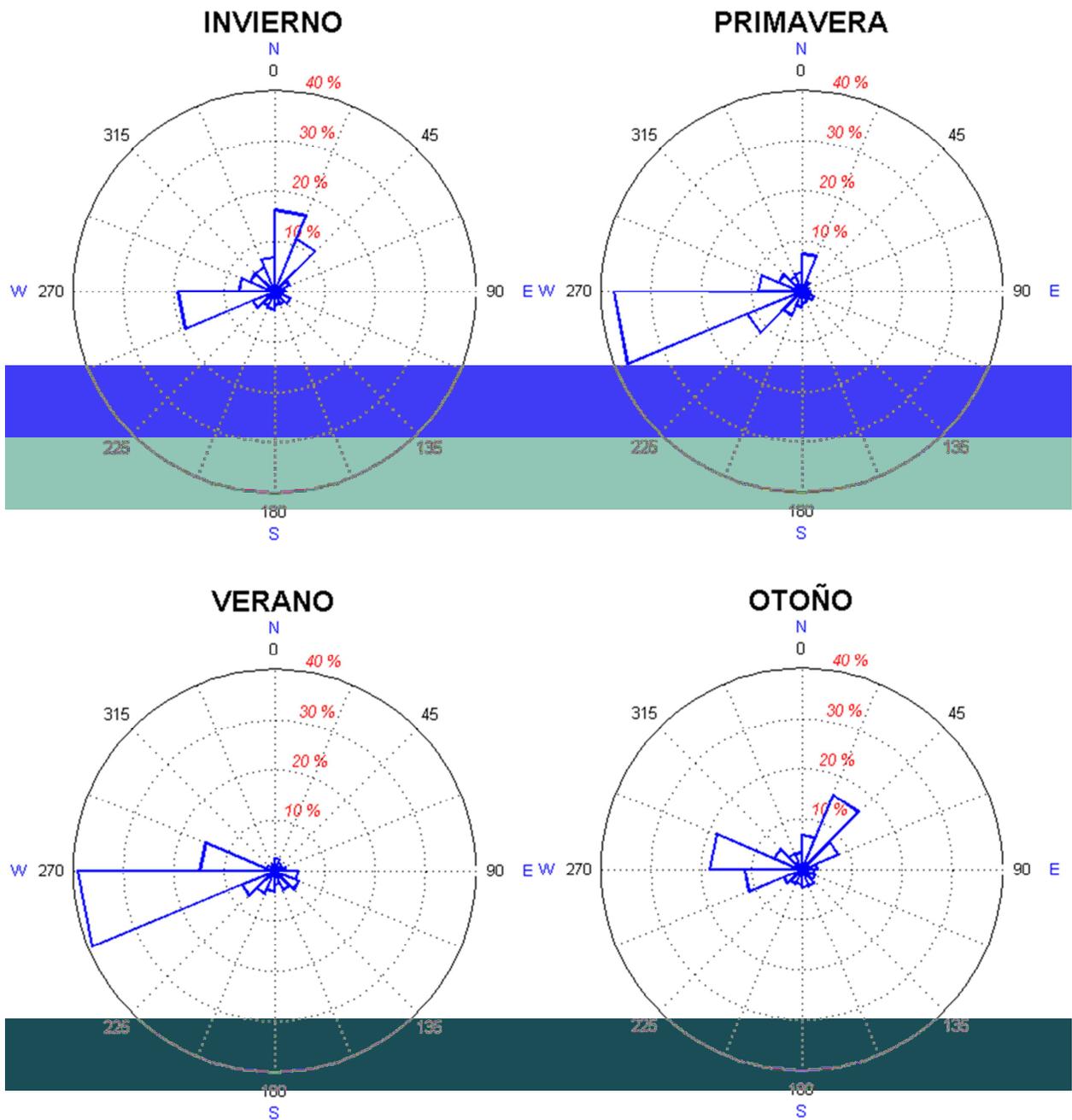
El presente capítulo se divide en cinco apartados, el primero describe las variables meteorológicas observadas (presión atmosférica, humedad relativa, temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento) y las direcciones principales del viento. El segundo apartado muestra las corrientes superficiales promedio para cada una de las estaciones 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 para cada una de las estaciones del año. En esta sección además se presenta una tabla con información referente a las velocidades de las corrientes y los tiempos de residencia. En el cuarto apartado se hace referencia a dos eventos extraordinarios de viento: un evento que se denominó como evento extremo y otro en condiciones de vientos Santana. Así también se presentan las corrientes superficiales promedio, las trayectorias observadas y mapas de distribución espacio-temporal de las partículas durante cada uno de los eventos extraordinarios. En el apartado

final se observan las trayectorias descritas por las boyas de deriva y su distribución espacio-temporal en la BTS.

## 5.1. Meteorología

En este trabajo se obtuvo que los meses que representan a cada una de las estaciones del año son las siguientes: invierno (enero, febrero y marzo), primavera (abril, mayo y junio), verano (julio, agosto y septiembre) y otoño (octubre, noviembre y diciembre).

Las rosas de viento que se presentan a continuación (figura 4) muestran información acerca de la dirección predominante de los vientos en la BTS. 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 muestran que las direcciones de las que proviene el viento durante el invierno ( $> 10\%$  de ocurrencia) son principalmente del W, NNE y NE. 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.



**Figura 4.** Rosa de vientos que muestran las direcciones principales (en porcentaje) de las que proviene el viento para cada estación del año. Los triángulos de color azul muestran las direcciones y los círculos indican el porcentaje.

Se observó que en invierno y otoño los vientos alcanzaron las velocidades más intensas con magnitudes de hasta  $16.3 \text{ m s}^{-1}$  (durante invierno, tabla 1) y direcciones más variables, con componentes provenientes principalmente del norte y del oeste. En primavera y verano los vientos presentaron velocidades menores, que alcanzaron los  $7.9 \text{ m s}^{-1}$ , más persistentes y con dirección predominante del oeste.

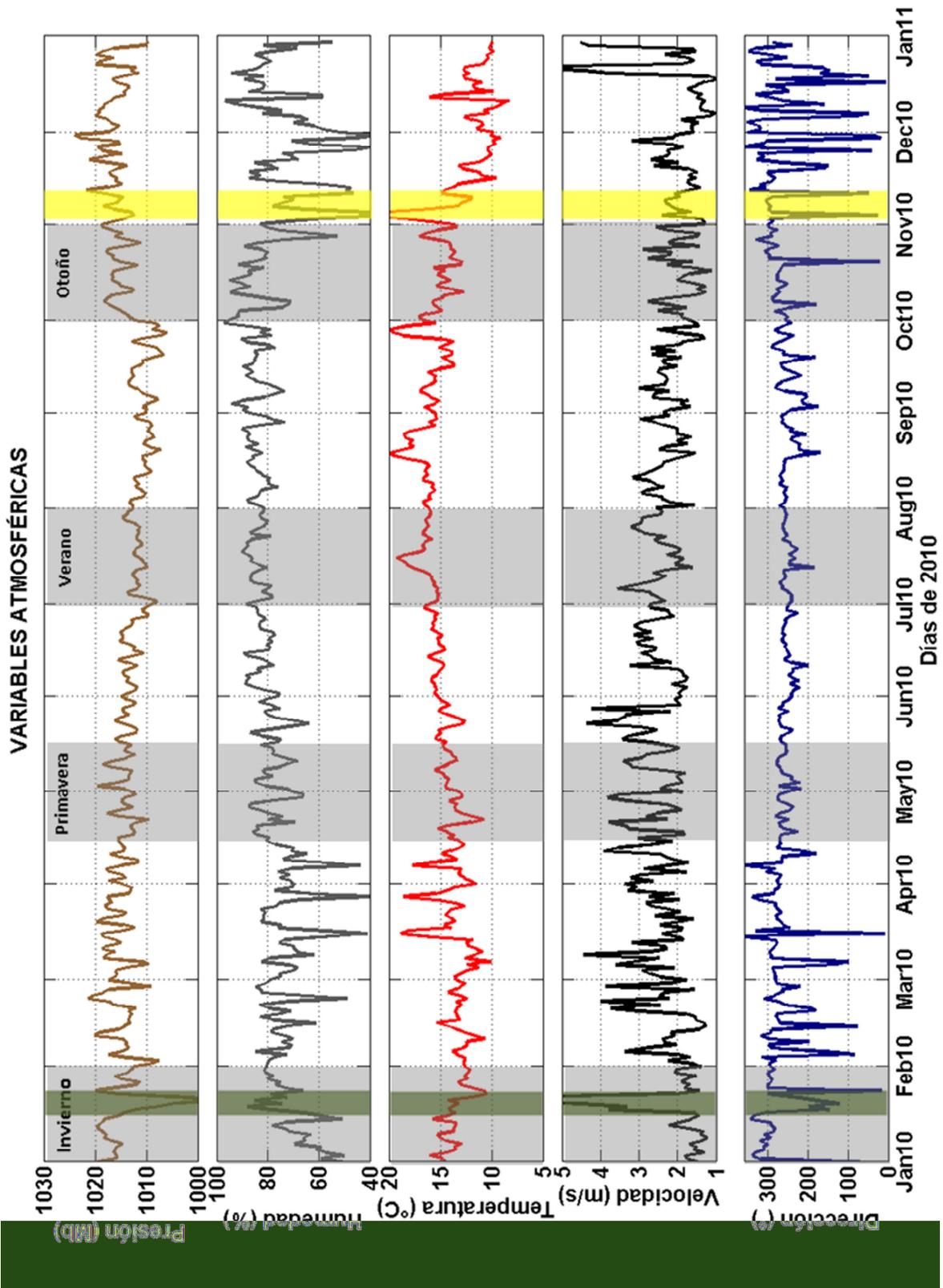
**Tabla 1.** Direcciones predominantes de los vientos en porcentaje y velocidades máximas ( $\text{m s}^{-1}$ ) alcanzadas para cada una de las estaciones del año.

Estación	Dirección	Porcentaje	Velocidad máxima ( $\text{m s}^{-1}$ )
<b>Invierno</b>	W	19.2%	16.3
	NNE	16.3%	
	NE	11.8%	
<b>Primavera</b>	W	37.5%	7.9
	WSW	11.7%	
<b>Verano</b>	W	39.2%	6.9
	WNW	14.8%	
<b>Otoño</b>	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. 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 amarillo 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 estaciones del año que en invierno y otoño, mientras que en contraste la humedad relativa y las temperaturas fueron mayores. Los vientos predominantes del oeste en estos periodos 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 reinante del viento durante primavera y verano es del oeste (proviene del mar hacia el continente), la humedad relativa asociada fue mayor.

Para invierno y otoño se notaron condiciones atmosféricas variables, la presión atmosférica 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 amarillas del Santana

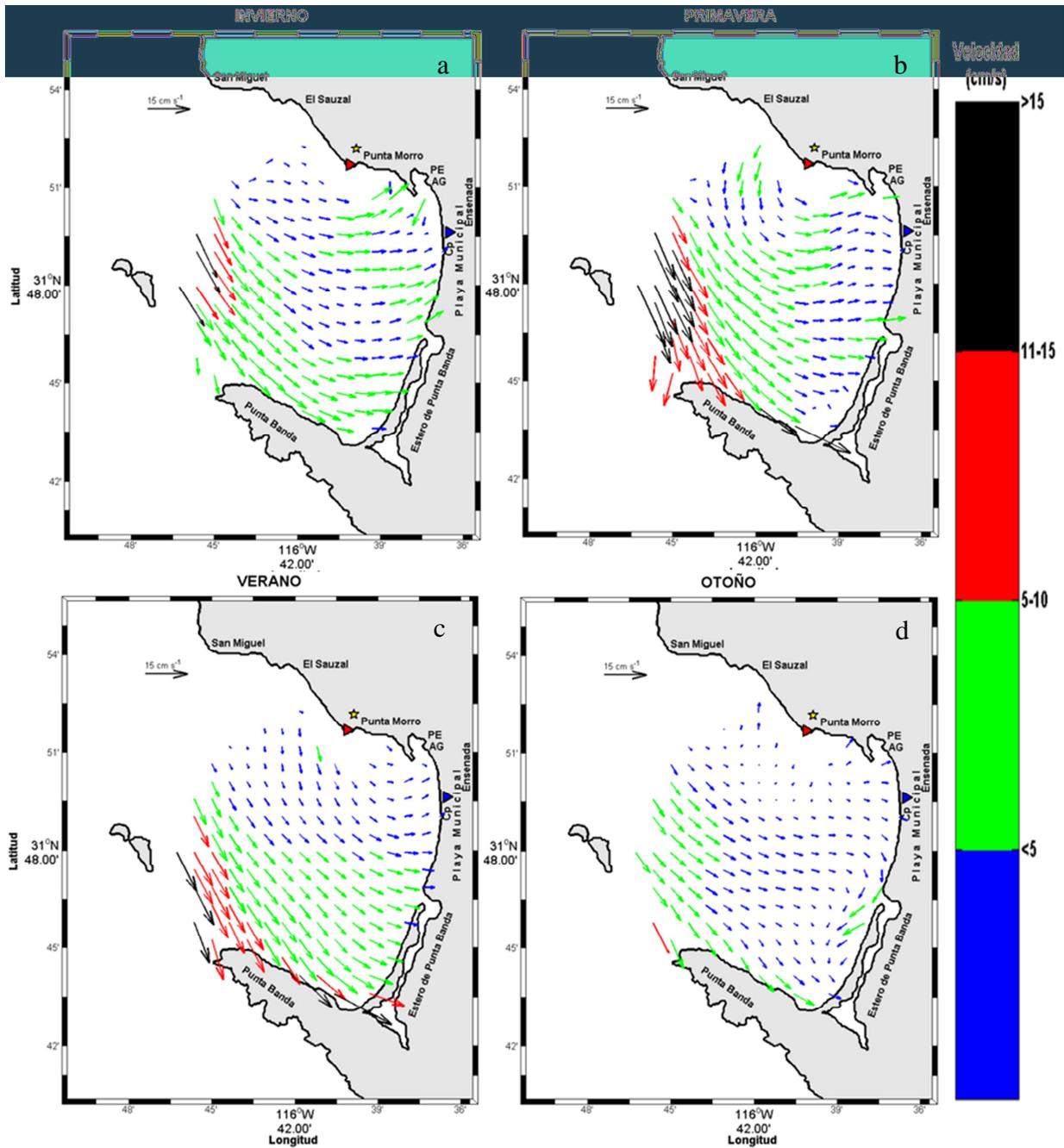
## 5.2. Corrientes

Con la finalidad de brindar un panorama de la circulación en la BTS, se presentan a continuación las velocidades promedio de las corrientes superficiales representativas de cada estación del año. En un trabajo reciente, Larrañaga-Fu (2013) describe a detalle los mapas mensuales de la circulación en la BTS.

La corriente superficial promedio para la temporada de invierno (figura 6a) describe una circulación ciclónica que abarca toda la bahía, donde las corrientes más intensas se dieron en la parte sur y las menos intensas en la parte norte. Se observó un flujo en la boca norte junto a las islas que alcanzó velocidades mayores de  $15 \text{ cm s}^{-1}$  y que disminuyó hasta  $\sim 5 \text{ cm s}^{-1}$  conforme se internó 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  $5 \text{ cm s}^{-1}$  se dirige 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 la corriente promedio (figura 6b) muestra cercano a las islas, en las bocas norte y sur, una corriente intensa con velocidades mayores a los  $15 \text{ cm s}^{-1}$  y dirección sureste. El flujo se adentra en la BTS y disminuye de intensidad hasta velocidades menores a  $5 \text{ cm s}^{-1}$  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  $10 \text{ cm s}^{-1}$ .

Para el verano la corriente superficial promedio (figura 6c) consiste en corrientes más homogéneas. En esta estación también se detectaron corrientes intensas en la boca sur y norte cercano a las islas, con dirección sureste y velocidades mayores a los  $15 \text{ cm s}^{-1}$ . Estas corrientes disminuyen en intensidad cerca de la costa hasta alcanzar velocidades de entre  $5$  y  $10 \text{ cm s}^{-1}$ . Similar a primavera, se encontró otro flujo con velocidades menores a los  $5 \text{ cm s}^{-1}$  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.** Corrientes superficiales promedio 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  $15 \text{ cm s}^{-1}$ .

Para el otoño (figura 6d), la corriente superficial promedio 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  $\text{cm s}^{-1}$ , las cuales se debilitaron al interior. Se detectaron corrientes menores a  $5 \text{ cm s}^{-1}$  en la boca norte cerca de El Sauzal y toda la parte norte de la BTS (figura 6d).

Temporalmente, las corrientes de mayor intensidad fueron observadas en la estación 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 estaciones 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).

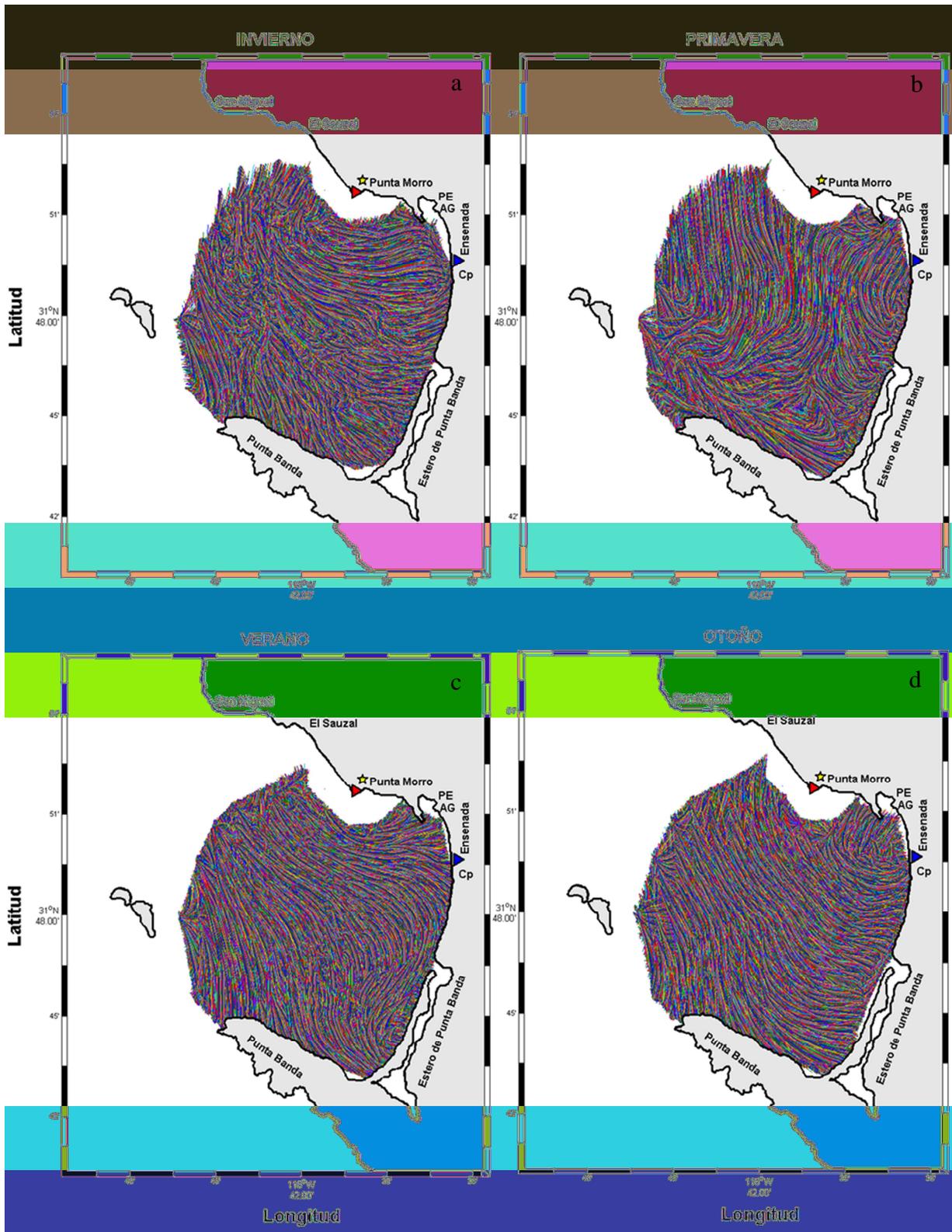
La distribución espacial de la circulación en la BTS mostró que las corrientes más intensas ( $>15 \text{ cm s}^{-1}$ ) se observaron cerca de las islas en las bocas sur y norte, mientras que las corrientes más débiles ( $<11 \text{ cm s}^{-1}$ ) se localizaron en el interior de la BTS cercano a la boca norte (junto a Punta Morro), y desde la parte sur de la boca 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

Para cada una de las estaciones del año, se presentan mapas de las trayectorias descritas por cada una de las partículas advectadas (figura 7), así también se muestran los tiempos de residencia de las partículas en la tabla 2. Igualmente, se exhiben 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).

Para el invierno las trayectorias de las partículas (figura 7a) que iniciaron en la boca norte junto a las islas, llevaron principalmente dirección hacia el sureste y algunas alcanzaban a salir por la boca sur cerca de Punta Banda. Se observó que varias de las trayectorias llegaron 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, 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 de las partículas que se encontraron en la boca norte y hasta Punta Morro, describieron trayectorias hacia el sur de la BTS, estas al llegar a Punta Banda, tomaron trayectorias normales a la costa (paralelo a Punta Banda). 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 se estén quedando atrapadas en esa zona.



**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.

Durante el verano (figura 7c), las trayectorias de las partículas mostraron un recorrido desde la boca norte de la BTS hacia el interior, con un cambio de dirección paralelo a la costa frente al Estero de Punta Banda, donde llegan a tocar la frontera entre Punta Banda y el Estero de Punta Banda. Para la zona del Puerto de Ensenada 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 éstas 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 describieron una estructura compleja, donde no se halló un patrón definido. Para esta estación se observó que partículas que entraron por la boca norte llegaron a salir por la boca sur.

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 estaciones 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 estación de invierno y con base a éste, se normalizaron todas las celdas de los gráficos mostrados en la figura 8.

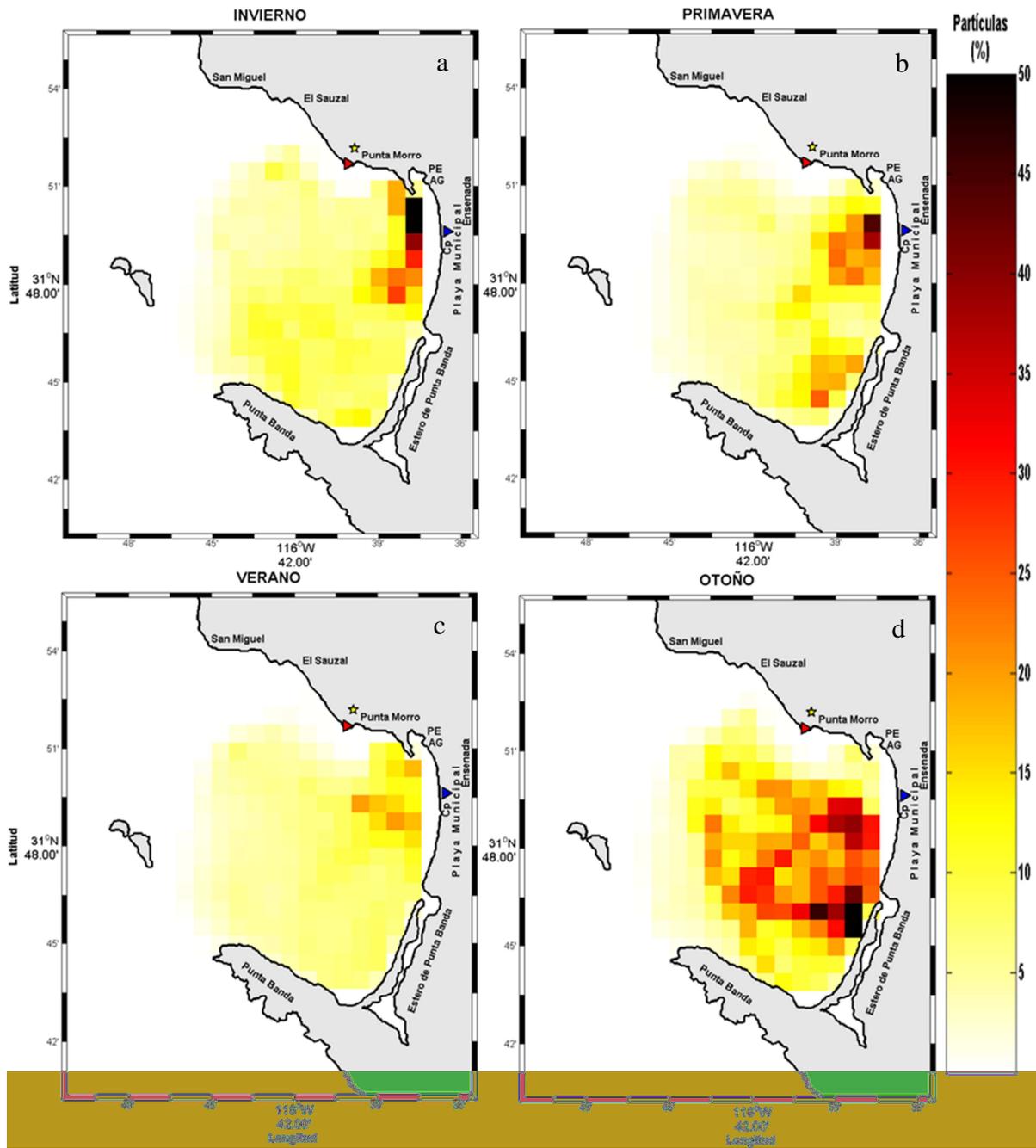
Para invierno (figura 8a) la mayor cantidad de partículas se obtuvo en una franja costera de ~7 km en la parte norte de la bahía, desde el Puerto de Ensenada hasta la boca norte del Estero de Punta Banda. El promedio de la circulación estacional de invierno (figura 6a) evidenció una corriente débil hacia 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 obtuvieron 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 frente a la Barra del Estero de Punta Banda. La zona frente a la Playa Municipal contó con la presencia de una mayor concentración de partículas, que coincide con una estructura cerrada en las trayectorias en la Playa Municipal (figura 7b), y que también es consistente con la circulación superficial promedio (figura 6b), donde se presenta una corriente bien definida y débil. Por su parte, la concentración de partículas en la zona sur puede estar relacionada con corrientes que se debilitaron cerca de la costa, principalmente frente al Estero de Punta Banda. La acumulación de partículas observadas en ambas regiones indica zonas donde convergen las partículas, que pueden estar directamente relacionadas con un debilitamiento de las corrientes cercanas a la costa.

En el verano la 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). La corriente superficial promedio en verano (figura 6c) mostró que las corrientes 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) existe gran cantidad de partículas distribuidas en el interior de la BTS, con tendencia a concentrarse 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, las velocidades promedio de las corrientes superficiales para la estación 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 temporada altas concentraciones de partículas, Punta Morro y el Puerto de Ensenada, 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 la circulación superficial promedio (figura 6d) mostró corrientes débiles menores a  $5 \text{ cm s}^{-1}$ , distribuidas en casi toda la bahía por lo que fue la estación 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.

La velocidad promedio de las corrientes y el tiempo máximo de residencia de las partículas para cada estación del año se presentan en la tabla 2. Debido a que las velocidades mayores de las corrientes se observaron en la temporada de primavera y verano, mientras que las más débiles fueron en otoño e invierno, los tiempos de residencia muestran una relación inversa 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.

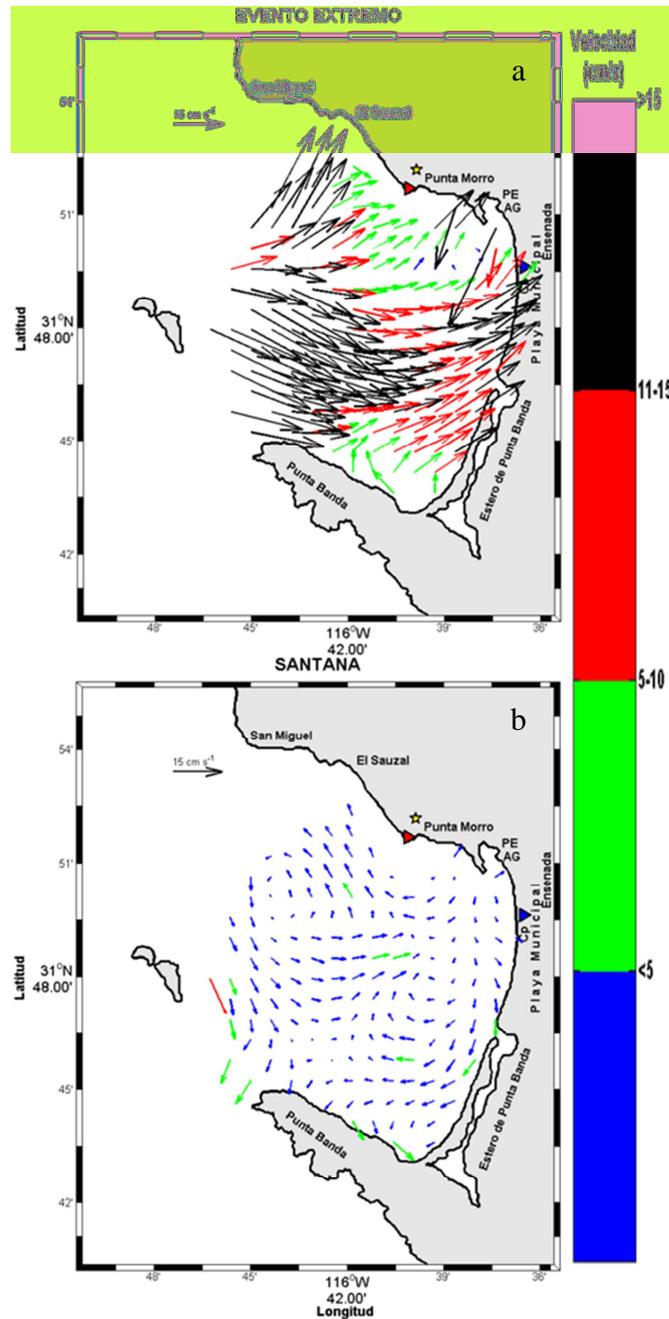
<b>Estación</b>	<b>Velocidad de la corriente (cm s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Tiempo de residencia máximo (días)</b>
<b>Invierno</b>	5.1	13.3
<b>Primavera</b>	6.0	10
<b>Verano</b>	5.6	10.5
<b>Otoño</b>	2.8	16.4

## 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 ( $> 4 \text{ m s}^{-1}$ ) 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 relativamente débiles ( $\sim 2 \text{ m s}^{-1}$ ).

Las corrientes superficiales promedio en la bahía para los dos eventos extraordinarios se presentan 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  $15 \text{ cm s}^{-1}$ . La circulación superficial promedio durante el evento extremo (figura 9a), presentó corrientes intensas con velocidades mayores a los  $15 \text{ cm s}^{-1}$ . 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. En la costa de 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.

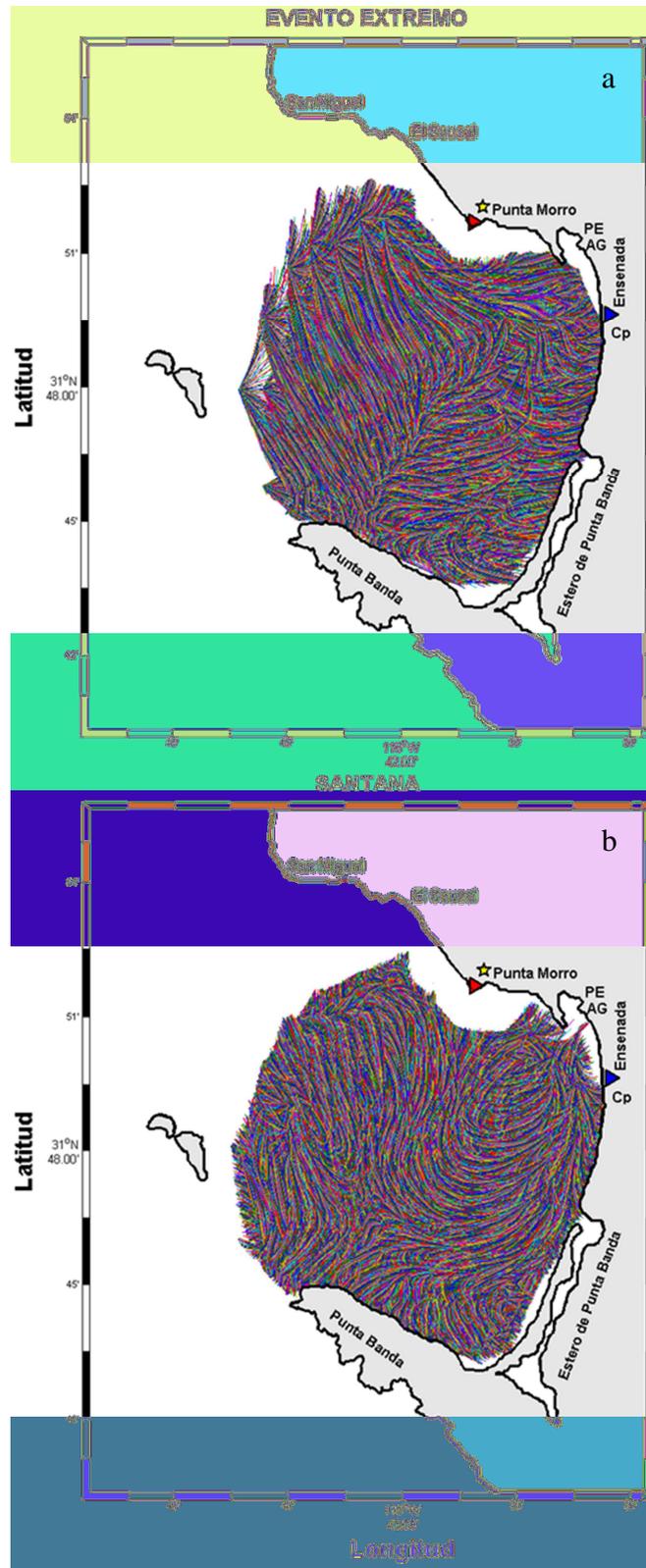
La corriente superficial promedio durante la condición Santana mostró dos remolinos bien definidos, uno con circulación ciclónica en la boca norte de la bahía y el otro de circulación anticiclónica frente a la boca del Estero de Punta Banda (figura 9b). Ambos remolinos presentaron velocidades menores a los  $5 \text{ cm s}^{-1}$ . 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.** Corrientes superficiales promedio 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  $15 \text{ cm s}^{-1}$ .

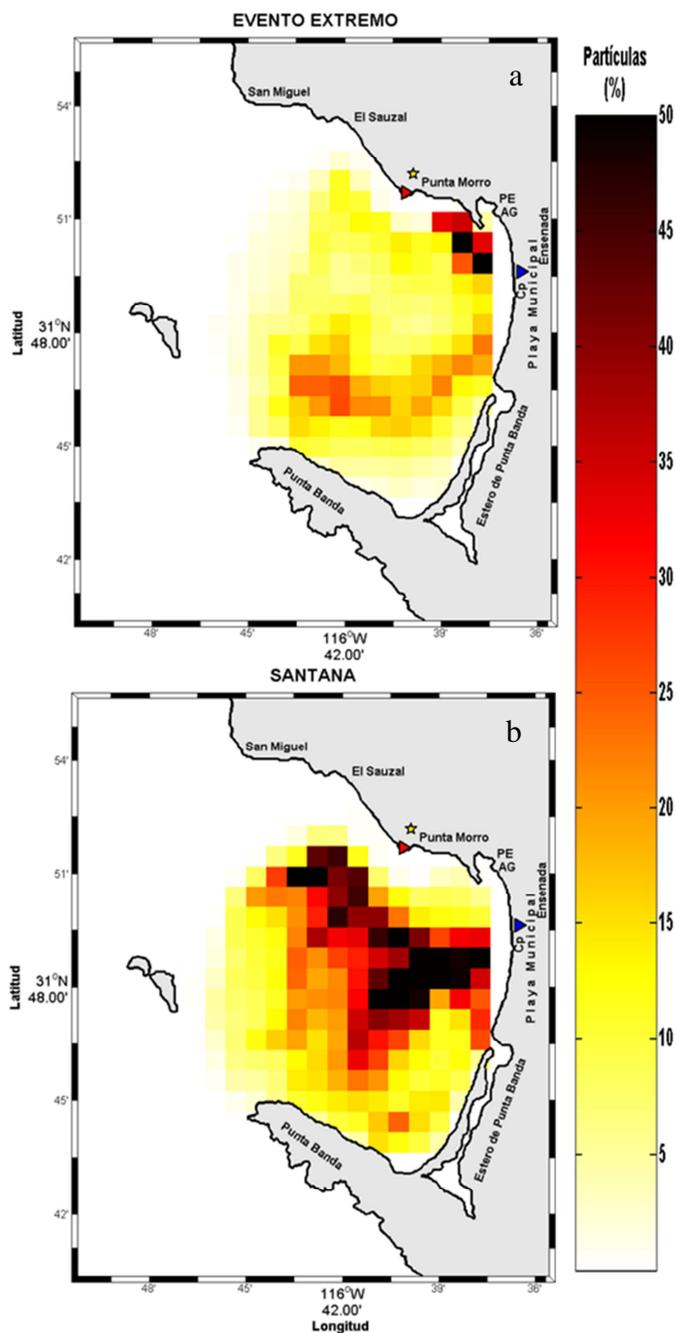
Es importante conocer el comportamiento de las corrientes en eventos extraordinarios debido a que estas proveen información acerca de condiciones que no son típicas a las descritas anteriormente para cada estación del año, ya que estos eventos pueden llegar a suscitarse durante tiempos cortos, del orden 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 temporadas. 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  $5 \text{ cm s}^{-1}$ , 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.

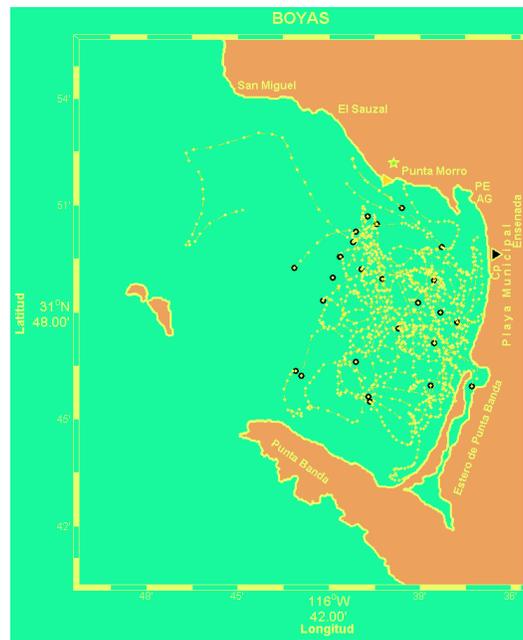
## 5.5. Boyas de deriva

En base a las condiciones meteorológicas descritas para cada estación del año en la sección 5.1, los muestreos realizados con boyas de deriva fueron tomados como representativos de la temporada de verano. Las trayectorias descritas por las boyas de deriva de cada experimento se presentan en la figura 12, en ella 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.

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 ésta (figura 12). 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 experimento 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 (figura 12).

Con las boyas de deriva se pudo observar que algunas de 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

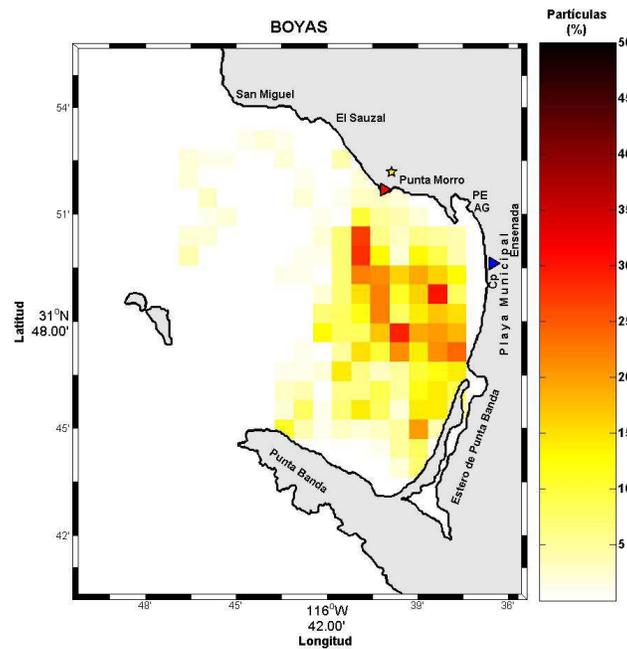
Municipal y la barra del Estero de Punta Banda. Se registró que tres de estas abandonaron la BTS por la costa; una frente a Punta Morro, otra en la parte sur de la boca del Estero de Punta Banda sobre la barra, y la última sobre la barra del Estero de Punta Banda en la zona sur (figura 12). Cabe mencionar que son estas las principales zonas de la BTS donde se han encontrado que existe la mayor acumulación de partículas (figuras 8 y 11).



**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.

En el gráfico de la distribución espacio-temporal de las boyas de deriva (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. Además existe una zona de acumulación de partículas que abarcó aproximadamente 3 km frente a la barra del Estero de Punta Banda.

Las trayectorias de las boyas a la deriva cercanas a la superficie y los resultados de la advección de partículas para la temporada 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). Con este análisis se pretende caracterizar estacionalmente, aquellas zonas en el interior de la bahía donde partículas vertidas que se encuentren en la superficie marina (como aceites, coliformes, etc.) puedan permanecer por más tiempo. Debido a que en la BTS se descargan aguas domésticas, industriales y ocurren escorrentías de origen agrícola (Gutiérrez-Galindo *et al.*, 2010; Muñoz-Barbosa *et al.*, 2012), la calidad del agua en el interior tiene un impacto extremo para usos como áreas de cultivo, explotación pesquera de especies de escama, recreación, contacto primario y protección a la vida acuática, ya que pueden sobrepasar de 1 a 5 veces los valores que establecen las normas mexicanas (INE-SEMARNAT, 2000). Aun cuando las aguas residuales vertidas al medio marino reciben 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). Las escorrentías durante la temporada de lluvias y las aguas residuales de la ciudad de Ensenada contribuyen a la eutroficación de las aguas de la BTS (Peña-Manjarrez *et al.*, 2009). 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. También propician ambientes variados que causan que los ecosistemas marinos tengan poca

diversidad, como se ha observado previamente en la bahía (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 eventualmente con este conocimiento, coadyuvar a lograr un mejor manejo de los ecosistemas marinos con una fuerte influencia antropogénica. Además nos permite caracterizar zonas donde se puedan dispersar rápidamente partículas o conocer donde estas se acumulan.

Las mediciones de corrientes han representado un esfuerzo que sólo resuelven la variabilidad en un punto aislado pero que proporcionan resolución en profundidad (Miranda-Bojórquez, 2012) o en eventos de corta duración pero que permiten observar las corrientes cerca de la costa (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1988). Los radares de alta frecuencia permiten obtener mediciones de corrientes superficiales con una resolución espacial de 1 km y temporal de 1 hora, por lo que es posible implementar este modelo de dispersión de partículas en tiempo cuasi-real dentro de la BTS, que puede ser aplicado por ejemplo en caso de algún derrame de hidrocarburo.

En este trabajo se encontró que en el interior de la bahía, las velocidades de las corrientes son intensas en verano y primavera (cuando los vientos son más persistentes y las condiciones atmosféricas más estables) y débiles en invierno y otoño (cuando los vientos y las condiciones atmosféricas son variables). Estos resultados son congruentes con los reportados por Álvarez-Sánchez *et al.* (1988). Las corrientes superficiales promedio en la bahía (figura 6) mostraron que la dirección principal a lo largo del año son hacia el sureste, con una entrada preferencial por la boca norte. Se encontró que la circulación superficial es

principalmente ciclónica, a excepción de la temporada 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 la circulación promedio las corrientes entran a la bahía por la boca norte, resultado que contrasta con los reportados Miranda-Bojórquez (2012) y Larrañaga-Fu, (2013). Sánchez *et al.* (2009) sugieren que al ser arrojadas partículas a la BTS como contaminantes, estas quedarían estancadas en el centro. Las trayectorias promedio presentadas aquí permiten sugerir que esto es posible en el otoño, donde se observa que la mayor concentración de partículas se presenta en el centro de la BTS cerca de la costa. Sin embargo a lo largo del año la mayor concentración de partículas prevalece cerca de la costa (figura 8).

Bajo condiciones atípicas (no estacionales, figura 9a) 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). Este comportamiento puede ocurrir debido a que se ha evidenciado que las corrientes superficiales en la BTS son dominadas principalmente por el viento (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1988; Gavidia-Medina, 1988; Larrañaga-Fu, 2013), por lo que a mayor intensidad del viento mayor magnitud de la corriente. Durante condiciones de vientos Santana (figura 9b) cuando el viento es débil ( $\sim 2 \text{ m s}^{-1}$ ) el flujo predominante resultó en 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 (figura 12) proporcionaron evidencia de que esta corriente existe. Una estructura similar a la observada en la figura 9b fue reportada a 1 m de la superficie (en ausencia de viento) con modelos numéricos, por Mateos-Farfán (2010). Así, en ausencia de viento o vientos débiles, existe una tendencia a

la formación de remolinos en la BTS. Larrañaga-Fu (2013) argumenta que esto se suscita principalmente por las noches cuando los efectos de la brisa diurna.

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 y cercanas a la costa lo cual puede deberse posiblemente a la batimetría de la BTS ya que en la parte sur existe mayor profundidad y la batimetría es más abrupta, mientras que en la parte norte la profundidad es menor y la batimetría es más suave (figura 1).

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 temporada 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 estación del año se identificaron las principales zonas donde las partículas pueden llegar a permanecer por tiempos prolongados dentro de la BTS. Espacialmente 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 temporada 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 el 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. Cercano al Puerto de Ensenada y el Arroyo El Gallo, se han encontrado organismos marinos (poliquetos) que dan evidencia de

contaminación (Encalada-Fleites y Millán-Núñez, 1990; Jiménez-Pérez *et al.*, 1992), así como valores altos de nutrientes (Segovia-Zavala *et al.*, 1988), coliformes y bacterias (Portillo-López y Lizárraga-Partida, 1997). El Puerto de Ensenada y la Playa Municipal son 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). Adicionalmente estas zonas han sido reportada como localidades afectadas o muy afectadas por contaminación orgánica (Lubinsky-Jinich y Victoria-Cota, 2006).

Los resultados de las mediciones descritas en este trabajo son de alta relevancia debido a que las zonas de retención obtenidas en este trabajo son a su vez los receptáculos de las descargas aledañas, y sugieren 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.

## 7. Conclusiones

Durante las cuatro estaciones del año se observó que las zonas de acumulación de partículas coincidieron con zonas donde las corrientes fueron débiles, principalmente las que se encuentran cercanas a la costa como la zona de las Playas Municipales, el Puerto de Ensenada y frente a la barra del Estero de Punta Banda. Mientras que la zona en la que se observa la mayor dispersión de partículas se encuentra entre las Islas Todos Santos y Punta Banda.

La estación de mayor dispersión de partículas (menor tiempo de residencia), se observa en verano, cuando la rapidez de la corriente es relativamente mayor y el viento es más persistente en dirección, mientras que la de menor dispersión se observa en otoño (mayor tiempo de residencia) cuando la rapidez de la corriente es menor y el viento es más variable en dirección.

Las estaciones del año de mayor a menor dispersión de partículas son verano, primavera, invierno y otoño. Mientras que las zonas de mayor a menor concentración de partículas son las Playas Municipales, el Puerto de Ensenada y el Estero de Punta Banda. Las zonas donde se dispersan más rápidamente las partículas son la boca norte y la boca sur de la BTS, donde las velocidades de las corrientes son más intensas.

## 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.
- Barrick, D. E., M. W. Evans, B. L. Weber, 1977. Ocean surface currents mapped by radar. *Science*, **198**: 138-144.
- 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.

Diario Oficial de la Federación, 1989. Acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89.

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<sup>a</sup> 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.

Flores-Vidal, X., R. Durazo, C. Chavanne, P. Flament, 2011. Circulación costera en ausencia del viento en el Golfo de Tehuantepec, México: Observaciones con radares de alta frecuencia. *Ciencias Marinas*, **37**:493-512.

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.
- INE, SEMARNAT, 2000. La calidad del agua en los ecosistemas costeros de México. 1<sup>a</sup> ed., México, 407 pp.
- 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 benthica 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<sup>a</sup> ed., Boca Raton, USA, CRC Press, 876 pp.
- Komar P. D., 1998. Beach Processes and Sedimentation, 2<sup>da</sup> ed., New Jersey, Prentice Hall, 544 pp.
- Lalli C. M., T. R. Parsons, 1997. Biological oceanography: an introduction. 2<sup>da</sup> 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. Variabilidad de la circulación superficial en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México., *Tesis de licenciatura*, Universidad Autónoma de Baja California, 64 pp.
- 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.
- Lynn R. J., J. J. Simpson, 1987. The California Currents system: the seasonal variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*, **10**: 12947-12966.

- 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.
- Orozco-Borbón M. V., E. A. Gutiérrez-Galindo, 1983. Contaminación fecal costera en la zona del puerto de Ensenada, Baja California. *Ciencias Marinas*, **9**:27-34.
- Orozco-Borbón M. V., J. A. Segovia-Zavala, F. D. Delgadillo-Hinojosa, A Muñoz-Barbosa, 1994. Estudio bacteriológico de agua de mar para el cultivo de moluscos bivalvos en Baja California. *Ciencias Marinas*, **20**:183-198.
- Orozco-Borbón M. V., S. A. Sañudo-Wilhelmy, 1988. Estudio de coliformes, estreptococos y bacterias patógenas a lo largo de la costa de Baja California. *Ciencias Marinas*, **14**:1-8.
- Paduan J. D., H. C. Graber, 1997. Introduction to high-frequency radar: reality and myth. *Oceanography*, **10**:36-39.
- 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.

- Peña-Manjarrez J. L., G. Gaxiola-Castro, J. Helenes-Escamilla, 2009. Factores ambientales que influyen en la variabilidad de la producción de quistes de *Lingulodinium polyedrum* y *Scrippsiella trochoidea* (Dinophyceae). *Ciencias Marinas*, **35**:1-14.
- 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.
- Sánchez A., J. Carriquiry, J. Barrera, B. E. López-Ortiz, 2009. Comparación de modelos de transporte de sedimentos en la Bahía Todos Santos, Baja California, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **61**:13-24.
- 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**:19-26.
- 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<sup>ta</sup> 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.

## Apéndice A

Los datos de viento se obtuvieron en coordenadas geográficas o también conocido como sistema verdadero, en el que los ángulos son medidos en sentido de las manecillas del reloj relativo al norte geográfico. La serie de datos de viento se pasó a un sistema matemático para su manipulación, en donde los ángulos se miden en contra de las manecillas del reloj y el cero se encuentra en el este.

Se obtuvieron porcentajes de las direcciones predominantes del viento para conocer los principales patrones del viento, representativos de cada una de las estaciones del año. Primero se calculó el vector promedio diario del viento ( $\bar{V}$ ), que tiene componentes cartesianas a lo largo del eje  $x$  y  $y$  (14 y 15):

$$\bar{V}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \cos(\theta_i) \quad (14)$$

$$\bar{V}_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \sen(\theta_i), \quad (15)$$

donde  $n=24$  representa el número de datos por día,  $V_i$  es cada una de las velocidades y  $\theta_i$  es cada una de las direcciones en el día. La velocidad promedio diaria del viento (vector) es obtenida con (16) y el ángulo promedio está dado por (17).

$$|\bar{V}| = \sqrt{\bar{V}_x^2 + \bar{V}_y^2} \quad (16)$$

$$\theta_v = \arctan\left(\frac{\bar{V}_y}{\bar{V}_x}\right) \quad (17)$$

## Apéndice B

### *Filtro Lanczos*

La serie de datos de corrientes  $\vec{u} = u + iv$  con componentes  $u$  (este) y  $v$  (norte), es una serie discreta obtenida a intervalos de tiempo  $\Delta t$ , que puede ser filtrada o suavizada de manera que queden sólo las variaciones a determinadas frecuencias. Un filtro involucra datos de entrada y de salida tal que

$$y_t = \sum_{k=-\infty}^{\infty} w_k x_{t-k} \quad (1)$$

donde  $x_t$  es la serie de tiempo original (entrada),  $y_t$  la serie filtrada (salida),  $w_k$  los pesos o coeficientes de Fourier,  $k$  el número de pesos del filtro y  $t$  es el tiempo. El efecto del filtro se puede ver de una manera mejor en el dominio de las frecuencias.

La principal característica del filtro Lanczos es el uso de un factor sigma que reduce significativamente las amplitudes de las oscilaciones del fenómeno de Gibbs el cual está dado por

$$\sigma = \frac{\text{sen}(\pi k/n)}{\pi k/n} . \quad (2)$$

El filtro o suavizado se realizó mediante la función

$$R(f) = \frac{f_c}{f_n} + 2 \sum_{k=1}^n \overline{w_k} \cos(2\pi f k \Delta), \quad (3)$$

donde  $R$  es la serie filtrada en función de la frecuencia  $f$ ,  $R(f)$  representa la razón entre la serie de tiempo antes y después de filtrar,  $f_c$  la frecuencia de corte,  $f_n$  la frecuencia de Nyquist,  $n$  es el número de muestras y  $\Delta$  es el intervalo de muestreo (Duchon, 1979; Emery y Thomson, 2001).  $W_k$  de la ec (2) se promedia en el tiempo y se multiplica por el factor sigma que es lo que corresponde a  $\overline{w_k}$

$$\overline{w_k} = \left( \frac{\text{sen}(2\pi f_c k)}{\pi k} \right) \sigma. \quad (4)$$