



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

**“ESTUDIO DE LA CIRCULACIÓN SUPERFICIAL EN BAHÍA DE TODOS SANTOS,
BAJA CALIFORNIA, A TRAVÉS DE EXPERIMENTOS CON BOYAS DE DERIVA”**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

OCEANÓLOGO

PRESENTA:

CITLALLI ROMERO GONZÁLEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. RUBÉN CASTRO VALDEZ



ENSENADA BAJA CALIFORNIA, AGOSTO 2019.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

"ESTUDIO DE LA CIRCULACIÓN SUPERFICIAL EN BAHÍA DE TODOS SANTOS, BAJA CALIFORNIA, A TRAVÉS DE EXPERIMENTOS CON BOYAS DE DERIVA"

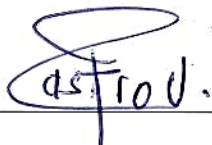
TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
OCEANÓLOGO

PRESENTA:

CITLALLI ROMERO GONZÁLEZ

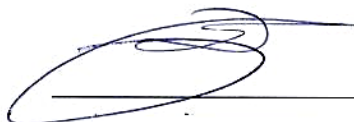
APROBADA POR:



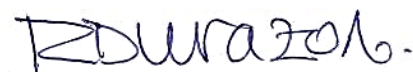
Dr. Rubén Castro Valdez
Director



Dr. Xavier Flores Vidal
Sinodal



Dr. Rafael Hernández Walls
Secretario



Dr. Reginaldo Durazo Arvizu
Sinodal

DEDICATORIA

A mis padres, Rinañ y Manrique.

Por su esfuerzo, apoyo y cariño.

A mi hermano, Khanek.

Por ser mi amigo de vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, Dr. Rubén Castro Valdez, por la paciencia y tiempo invertido. Gracias por todo su apoyo y confianza.

A los miembros del comité de tesis, Dr. Reginaldo Durazo Arvizu, Dr. Rafael Hernández Walls y Dr. Xavier Flores Vidal, por sus sugerencias y disposición en la culminación de este trabajo a pesar de los contratiempos.

Al proyecto interno UABC “Circulación Estacional en la Bahía de Todos Santos”, clave 401/1/C/89/17 y al Observatorio Oceanográfico Regional Costero OORCo.

Al Dr. Miguel Ángel Santarosa Del Río, por su apoyo, consejos y disposición durante la carrera. Gracias por estar presente y adoptarme como tutorada.

A mis profesores durante la carrera, por motivarnos de alguna forma para ser mejores. En especial a Mary Carmen Ruiz, Raúl Herrera, Patricia Alvarado, Concepción Arredondo, George Seingier, Jorge López Calderón, Denise Lubinsky ¡Y los que Faltan!, por desempeñar con gusto su profesión, mostrarnos que la ciencia vale la pena y ser un apoyo más allá del aula.

A mi facultad, alumnos, docentes y personal administrativo, por permitirme conocer a excelentes personas, que con su alegría y buen trato tienen el poder de cambiar tu día.

A los que compartieron esta etapa conmigo y me dejaron ser parte de sus historias. Hiram, Osvaldo, Sandy, Kike y Mariana, por hacerme sentir en confianza y seguir en contacto a pesar de haber tomado diferentes caminos ¡Me enseñaron a vivir!. A Noe, Mariana e Isaí por sus risas y todos los momentos juntos, los adoro e hicieron la carrera un poco más simple. A Diana, Isabela, Frida, Selene e Isabella por ser mi segunda familia y no dejarme sola, tienen mi corazón. A César, por no dejar que me rindiera en la realización de este trabajo y confiar en mí aún en los momentos donde yo no suelo hacerlo, te lo agradezco infinitamente. A Giovanni, Alfredo, Alam, Kevin, Kora por sus porras y palabras de ánimo.

A mi familia, incluyendo a los más pequeños, significan mucho. Mamá te agradezco toda tu paciencia, gracias por escuchar las muchas quejas de tu polluelo de cóndor, eres un ejemplo. Papá gracias por ayudar a formarme como persona, llevo mucho de ti. A mi hermano por ser mi primer amigo en la vida, espero poder apoyarte y ser un ejemplo para ti.

Contenido

1	Introducción	1
1.1	Área de Estudio	2
1.2	Antecedentes	4
2	Hipótesis	7
3	Objetivo	7
3.1	Objetivo general	7
3.2	Objetivos específicos	7
4	Datos y Método	8
4.1	Derivadores/boyas	8
4.2	Radares de Alta Frecuencia (HF)	11
4.3	Procesamiento de datos	13
4.3.1	Derivadores	13
4.3.2	Viento	14
4.3.3	Temperatura	15
4.3.4	Marea	15
4.3.5	Radares de Alta Frecuencia (HF)	15
4.3.6	Coeficiente de correlación de Pearson	16
4.3.7	Correlación vectorial compleja	16
4.3.8	Análisis espectral y armónico	17
5	Resultados	18
5.1	Condiciones generales de viento y temperatura	18
5.1.1	Temperatura	18
5.1.2	Viento sinóptico	20

5.1.3	Viento local	22
5.2	Trayectorias de los derivadores	25
5.2.1	Experimento 1	25
5.2.2	Experimento 2	26
5.2.3	Experimento 3	29
5.2.4	Experimento 4	31
5.2.5	Experimento 5	33
5.2.6	Experimento 6	35
5.2.7	Experimento 7	37
5.3	Circulación superficial promedio (Radares HF)	39
5.4	Viento	41
5.5	Correlación de los derivadores con el esfuerzo del viento	45
5.6	Influencia de la marea sobre los derivadores	48
5.7	Análisis espectral	52
6	Discusión	53
6.1	Rasgos generales	53
6.2	Efecto del Viento	54
6.3	Influencia de la marea y flujos inerciales.	57
6.4	Circulación superficial	58
7	Conclusión	59
8	Recomendaciones	61
9	Referencias	62
10	Anexo	66

Lista de tablas y figuras

Tabla

I. Características del periodo de medición de los instrumentos.	10
II. Parámetros de las elipses de variabilidad y vectores promedio del viento para los diferentes experimentos. Magnitud y dirección promedio del viento, desviación estándar del eje de mayor variabilidad y excentricidad del elipse.	24
III. Características de algunas de las trayectorias cerradas descritas por los derivadores pertenecientes al experimento 1.	25
IV. Características de la trayectoria cerrada descrita por el derivador 04 perteneciente al experimento 2.	27
V. Características de algunas de las trayectorias cerradas descritas por los derivadores pertenecientes al experimento 3.	30
VI. Características de algunas trayectorias cerradas descritas por los derivadores pertenecientes al experimento 4.	33
VII. Características de algunas trayectorias cerradas descritas por los derivadores pertenecientes al experimento 5.	34
VIII. Características de algunas trayectorias cerradas descritas por los derivadores pertenecientes al experimento 6.	36
IX. Características de algunas trayectorias cerradas descritas por los derivadores pertenecientes al experimento 7.	37

Figura

1.1 Localización y batimetría de la Bahía de Todos Santos, Baja California, México.	2
4.1 Boya superficial tipo “ <i>Microstar</i> ” en el océano: elemento electrónico (esfera naranja), elemento de arrastre (armazón auzl). Imagen obtenida de la página www.pacificgyre.com .	9
4.2 Funcionamiento de un radar de alta frecuencia (HF) en el océano. Imagen obtenida de SOCIB: Balearic Islands Coastal Observing and Forecasting System (http://socib.es/).	11
5.1 Temperatura superficial promedio para el periodo de los experimentos del año 2012 (E1 a E4).	18
5.2 Temperatura superficial promedio para el periodo de los experimentos del año 2013 (E5 a E7).	19
5.3 Magnitud y dirección promedio del viento sinóptico para el periodo de los experimentos del año 2012 (E1 a E4). El cuadro rojo indica el área de estudio.	20
5.4 Magnitud y dirección promedio del viento sinóptico para el periodo de los experimentos del año 2013 (E5 a E7). El cuadro rojo indica el área de estudio.	21
5.5 Dirección y magnitud predominante del viento dentro de BTS durante A) Día y B) Noche.	22
5.6 Magnitud del viento típico dentro de BTS para el año 2012 y 2013 (hora GMT).	22

5.7 Elipses de variabilidad y vector promedio del viento local, para cada uno de los experimentos.	23
5.8 Trayectorias descritas por los derivadores durante el experimento 1.	25
5.9 Rapidez de los derivadores durante el experimento 1 (28 al 30 de junio de 2012).	26
5.10 Trayectorias descritas por los derivadores durante el experimento 2.	26
5.11 Rapidez de los derivadores durante el experimento 2 (5 al 8 de julio de 2012).	27
5.12 Trayectoria del derivador que ingreso en el Estero Punta Banda (EPB) durante el experimento 2.	28
5.13 Trayectorias descritas por los derivadores durante el experimento 3.	29
5.14 Rapidez de los derivadores durante el experimento 3 (28 de agosto al 1 de septiembre de 2012).	30
5.15 Trayectoria del derivador que ingreso en el Estero Punta Banda (EPB) durante el experimento 3.	31
5.16 Rapidez de los derivadores durante el experimento 4 (9 al 13 de octubre de 2012).	31
5.17 Trayectorias descritas por los derivadores durante el experimento 4.	32
5.18 Trayectorias descritas por los derivadores durante el experimento 5.	33

5.19 Rapidez de los derivadores durante el experimento 5 (01 al 06 de febrero de 2013).	34
5.20 Trayectorias de los derivadores que ingresaron en el Estero Punta Banda (EPB) durante el experimento 5.	35
5.21 Trayectorias descritas por los derivadores durante el experimento 6.	36
5.22 Rapidez de los derivadores durante el experimento 5 (29 de abril al 03 de mayo de 2013).	37
5.23 Trayectorias descritas por los derivadores durante el experimento 7.	38
5.24 Rapidez de los derivadores durante el experimento 5 (19 al 26 de septiembre de 2013).	38
5.25 Corrientes superficiales promedio en BTS para el periodo de los experimentos.	40
5.26 Rosas de viento que muestran la magnitud y las direcciones principales (en porcentajes) de las que proviene el viento para cada experimento del año 2012.	41
5.27 Rosas de viento que muestran la magnitud y las direcciones principales (en porcentajes) de las que proviene el viento para cada experimento del año 2013.	42
5.28 Series de tiempo de la magnitud y dirección del viento para cada experimento del año 2012 (periodo delimitado por líneas rojas).	43

5.29 Series de tiempo de la magnitud y dirección del viento para cada experimento del año 2013 (periodo delimitado por líneas rojas).	44
5.30 Nivel de correlación del esfuerzo del viento con respecto a la trayectoria de cada derivador para la componente zonal (U), la componente meridional (V) y la correlación vectorial compleja (C). La clasificación es independiente de si la correlación es positiva o negativa. La coloración indica el experimento de procedencia.	45
5.31 Ángulo de desfase entre el viento y los derivadores. El eje de las abscisas indica el nombre del derivador, y el color el experimento al que corresponde.	46
5.32 Correlación del esfuerzo del viento con respecto a la trayectoria de cada derivador para la componente zonal (U), la componente meridional (V) y la correlación vectorial compleja (C), presentados por experimento. Los vértices de cada figura indican la boya a la que corresponde el valor en ese eje.	47
5.33 Comparación del nivel del mar con la magnitud de los derivadores para cada experimento. Eje vertical izquierdo corresponde al nivel del mar en m, el eje vertical derecho a la magnitud de la boya en ms^{-1} .	48
5.34 Ajuste armónico de la velocidad de las componentes zonal (izquierda) y meridional (derecha) de dos derivadores del experimento 3 (agosto de 2012) con dos componentes de marea.	50
5.35 Ajuste armónico de la velocidad de las componentes zonal (izquierda) y meridional (derecha) de dos derivadores del experimento 5 (febrero de 2013) con dos componentes de marea	50
5.36 Ajuste armónico de la velocidad de las componentes zonal (izquierda) y meridional (derecha) de dos derivadores del experimento 7 (septiembre de 2013) con dos componentes de marea.	51

5.37 Análisis de densidad espectral para las componentes de algunos derivadores, la componente zonal del viento y la predicción de marea. La línea punteada en sentido vertical corresponde a la frecuencia del periodo inercial.	52
10.1 Corrientes superficiales promedio y trayectoria de las boyas durante el experimento 1.	66
10.2 Corrientes superficiales promedio y trayectoria de las boyas durante el experimento 2.	66
10.3 Corrientes superficiales promedio y trayectoria de las boyas durante el experimento 3.	67
10.4 Corrientes superficiales promedio y trayectoria de las boyas durante el experimento 4.	67
10.5 Corrientes superficiales promedio y trayectoria de las boyas durante el experimento 5.	68
10.6 Corrientes superficiales promedio y trayectoria de las boyas durante el experimento 6.	68

1 Introducción

Las corrientes superficiales del océano son altamente variables en escalas de tiempo y espacio debido a que se encuentran influenciadas por distintos procesos, como el forzamiento geostrófico, las mareas, el campo de oleaje y el viento local superficial (Durazo-Arvizu, 2003). Dichas corrientes son importantes tanto en la distribución de energía como de propiedades fisicoquímicas del agua, y son capaces de transportar materiales en suspensión como sedimentos, contaminantes tóxicos e incluso larvas de organismos, por lo que suelen tener repercusiones directas en procesos biogeoquímicos de relevancia tanto ecológica de una zona costera como de las actividades humanas que se desarrollan alrededor (Cervantes-Audelo, 2013).

La ciudad de Ensenada situada al noreste de la Bahía de Todos Santos, se caracteriza por desempeñar actividades de pesca, navegación, acuicultura, así como labores turísticas relacionadas con el uso recreativo de playas (CODEEN e IMIP, 2011). Estas actividades, generalmente dependen de procesos físicos que ocurren dentro de dicho cuerpo costero. El conocimiento de la circulación del agua (entre otras cosas) en la bahía, permitiría tener una planeación adecuada en beneficio de la población, por ejemplo rescates, manejo de contingencias, establecimiento de cultivos acuícolas, respuesta a florecimientos algales nocivos. Además, se podría tratar cuestiones como la conservación de la bahía relacionado con las descargas de aguas negras, aguas residuales tratadas o derrames accidentales de contaminantes.

1.1 Área de Estudio

La Bahía de Todos Santos (BTS) está ubicada en la costa noroeste de la península de Baja California en el límite sur del Sistema de la Corriente de California (SCC) entre los $31^{\circ}40' - 31^{\circ}56' \text{ N}$ y $116^{\circ}36' - 116^{\circ}50' \text{ W}$ (Gavidia, 1988).

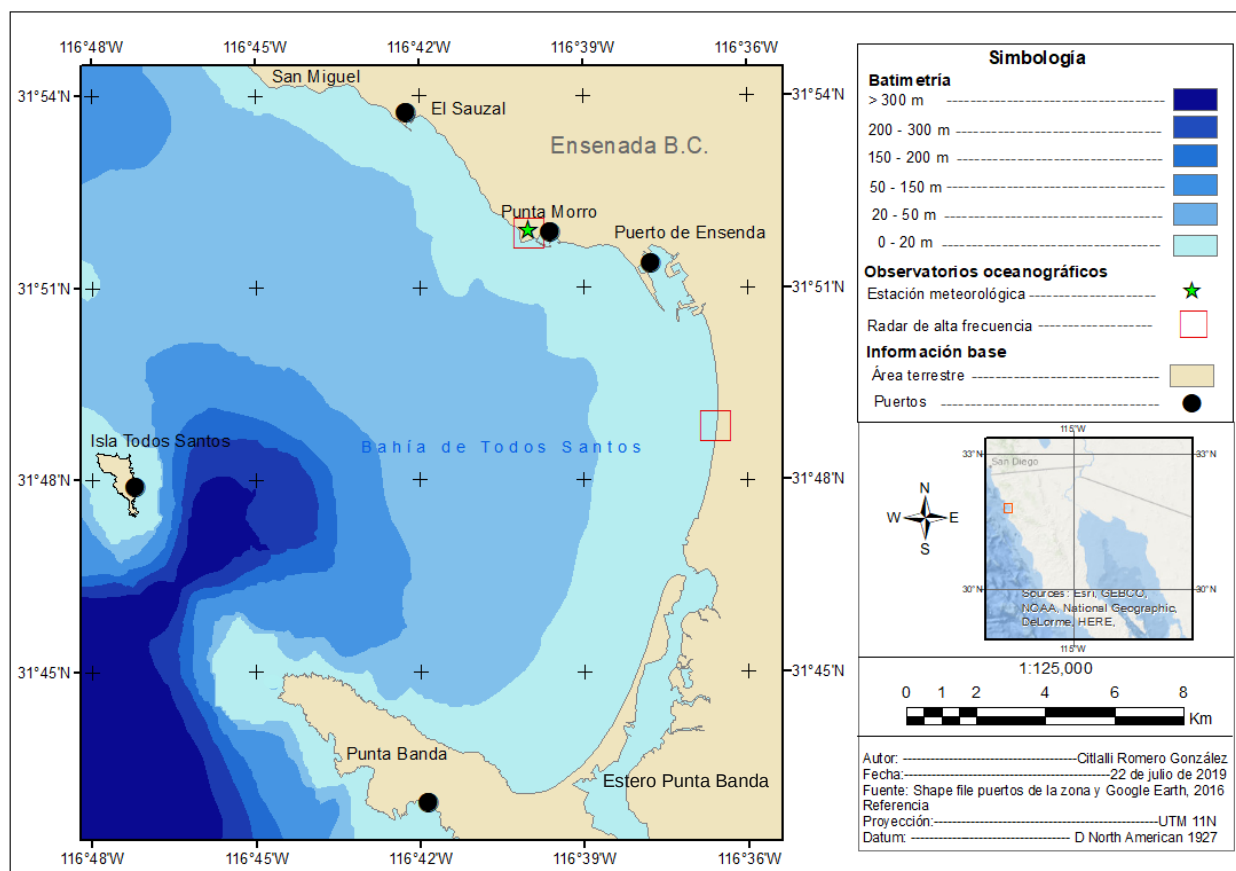


Figura 1.1 Localización y batimetría de la Bahía de Todos Santos, Baja California, México.

Es un cuerpo de agua semicerrado (Fig. 1.1) con una superficie aproximada de 230 km² con ~18 km de largo por ~15 km de ancho, que limita naturalmente al norte con Punta San Miguel (PSM), al sur con Punta Banda (PB), al este con la ciudad de Ensenada y al oeste con dos conexiones al Océano Pacífico (Cupul-Magaña y Cruz-Colín, 1997). La conexión norte, se encuentra entre la Isla Todos Santos (ITS) y PSM, tiene un ancho de alrededor de 11.7 km y su profundidad máxima es de ~50 m con excepción de bajo San Miguel de ~6 m

de profundidad. Por otro lado la conexión sur, entre PB e ITS, tiene un ancho de ~6.4 km, con profundidad máxima de aproximadamente 390 m en el Cañón Submarino de Todos Santos. La mayor parte del interior de la bahía presenta profundidades entre 0-50 m (Argote-Espinoza *et al.*, 1991; Mateos *et al.*, 2009).

En un ciclo anual, las temperaturas dentro de BTS se encuentran entre los 14.5 y 22°C para el agua superficial, y de 11 a 16.5°C en el fondo (Mancilla y Martínez, 1991). De acuerdo con Larrañaga-Fu (2013) el promedio anual de la temperatura presenta valores más elevados en la región cercana al Puerto de Ensenada que disminuyen hacia el exterior de la bahía, un poco menos notorio en el invierno donde el agua de la bahía adquiere mayor homogeneidad, presentando temperaturas menores a los 15°C.

La circulación en BTS depende en gran medida de la influencia del flujo hacia el ecuador del SCC, así como de la morfología de la bahía, las mareas y los vientos locales (Mateos *et al.*, 2009; Larrañaga-Fu, 2013; Flores-Vidal *et al.*, 2015). De acuerdo con Álvarez-Sánchez *et al.* (1988), los vientos son los principales forzadores de corrientes superficiales dentro de la bahía, puesto que éstas responden notablemente tanto a sus variaciones estacionales como a las variaciones diurnas provocadas por el sistema de circulación de brisa marina de la zona, la cual puede verse afectada tanto en dirección como en magnitud cuando existe la presencia de vientos sinópticos paralelos a la costa de la península de Baja California con dirección al sureste (Reyes y Parés, 1983).

En la BTS un 49% de la ocurrencia total de los vientos son predominantemente del noroeste con una intensidad media anual de 4 m s^{-1} , seguido de vientos del oeste con el 18.6% y un 10.5% restante proveniente del oeste-noroeste (Álvarez-Sánchez, 1977; Castro

y Martínez, 2010). Los vientos del Noroeste son predominantes durante primavera-verano, y tienden a conducir el agua hacia la bahía desde la entrada norte (Argote-Espinoza *et al.*, 1991), mientras que entre otoño e invierno se presentan vientos del Este conocidos como Santa Ana (Castro *et al.*, 2003), capaces de originar cambios en el campo de corrientes superficiales (Argote *et al.*, 1991, Mateos *et al.*, 2013).

El tipo de marea que se encuentra en la BTS es mixta, con dominio semidiurno (dos pleamares y dos bajamares diarias) con un intervalo de marea de $\sim 1.6\text{m}$ en el nivel del mar; su componente armónica más importante es la M_2 con un periodo de $\sim 12\text{h}$ y la K_1 con un periodo de ~ 24 (Sosa-Hernández, 2004; Flores-Vidal *et al.*, 2018). Anualmente, las mareas con un nivel del mar más alto se presentan en el verano, mientras que las más bajas son durante el invierno (Flores-Vidal *et al.*, 2015).

1.2 Antecedentes

Las investigaciones sobre la circulación superficial frente a las costas de California y Baja California, se iniciaron con el estudio de corrientes oceánicas hace más de 75 años. A lo largo de esos años la acumulación de datos ha permitido determinar a grandes rasgos las direcciones y velocidades con que se desplazan las masas de agua, así como sus variaciones espaciales y estacionales (Álvarez-Sánchez, 1971).

Las primeras observaciones directas de las corrientes en la Bahía de Todos Santos (BTS), fueron hechas frente al rompeolas del Puerto de Ensenada por el Ingeniero Sergio Carvallo Samperio (1944). Siguiendo la trayectoria de flotadores por periodos de una a cuatro horas, obtuvo trayectorias y velocidades muy variables con las que concluyó que el

desplazamiento se debía al oleaje próximo a romper y a vientos momentáneos (Álvarez-Sánchez, 1971).

En 1964 la escuela superior de ciencias marinas realizó mediciones de corrientes producidas por marea mediante cruces de deriva en el puerto de Ensenada Baja California. Las intensidades registradas para esas corrientes presentaron intensidades máximas de 2.67 cm s^{-1} y de 0.9 cm s^{-1} como promedio (Gallagher *et al.* 1965).

Argote-Espinoza y colaboradores (1975) realizaron una serie de cruceros mensuales de octubre de 1973 a septiembre de 1974 dentro de BTS, donde obtuvieron datos de la distribución de temperatura, salinidad y densidad a 10 y 30 m. Con esos datos, en conjunto con observaciones de viento y topografía realizaron una descripción de la circulación de las corrientes.

Estudios con trazadores Lagrangeanos realizados entre 1980 y 1986 en la Bahía Todos Santos, reportaron corrientes superficiales con velocidades de $\sim 15\text{ cm s}^{-1}$ en temporadas de verano y de $\sim 5\text{ cm s}^{-1}$ durante otoño e invierno (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1988). El patrón de circulación promedio obtenido consistió en flujos de agua hacia dentro de la bahía frente a las costas de Punta San Miguel y la Península de Punta Banda, y corrientes paralelas a la costa que convergen cerca de la boca del Estero de Punta Banda.

Posteriormente estudios más detallados de la región SW de la bahía, entre la Península de Punta Banda y la boca del Estero de Punta Banda (Durazo-Arvizu, 1983), mostraron dos patrones de circulación predominantes; el primero con una corriente paralela a la costa de la Península de Punta Banda que fluye hacia fuera de la bahía, y el segundo con

una corriente paralela a la costa que fluye desde la zona de Punta Banda hasta la boca del Estero de Punta Banda.

En 1991 Argote-Espinoza y colaboradores realizaron una descripción de la circulación de las corrientes dentro de BTS en relación a diferentes condiciones de viento local:

a) Cuando los vientos locales tienen fuerte componentes del Norte como en los meses de octubre-noviembre, las aguas fluyen hacia el interior de la bahía por la parte Norte siguiendo el perfil de la costa y giran hacia el exterior de la bahía a la altura de las islas.

b) Si los vientos presentan una componente fuerte proveniente del Oeste o Suroeste como ocurre en los meses de enero, mayo, julio y agosto las aguas tienden a fluir de la zona de las islas hacia el exterior de la bahía formándose dos giros uno hacia el norte, el cual fluye hacia el exterior por Punta San Miguel, y otro hacia el sur que fluye por afuera de Punta Banda.

c) Cuando los vientos locales son de poca intensidad y su dirección es variable como en los meses de diciembre, marzo, abril y septiembre, la circulación presenta estructuras complicadas y sin patrones definidos.

2 Hipótesis

La variabilidad a diferentes escalas del viento y las mareas, intensifican y/o desvían las corrientes superficiales dentro de la Bahía de Todos Santos, B.C.

3 Objetivo

3.1 Objetivo general

Describir y analizar la circulación superficial dentro de BTS mediante el análisis del comportamiento de cuerpos de deriva.

3.2 Objetivos específicos

- Describir la trayectoria de los derivadores en cada uno de los experimentos.
- Evaluar la influencia del viento y la marea en el comportamiento de los derivadores.

4 Datos y Método

Dentro de la medición directa de corrientes en el océano, existen dos técnicas fundamentales. La técnica *Euleriana* (nombrada así por el matemático *Leonhart Euler*, 1707-1783), consiste en medir la velocidad en punto fijo de la columna de agua a través del tiempo y pueden realizarse con correntímetros o Perfiladores de Corrientes Acústico Doppler. Por otro lado, la técnica *Lagrangiana* (llamada así por el matemático *Joseph-Louis Lagrange* 1736-1813) mide las corrientes a través del desplazamiento de un objeto que se mueve con la misma, generalmente esta técnica incluye el uso de flotadores, o trazadores que siguen el movimiento de una porción móvil de agua y al mismo tiempo sean capaces de informar la trayectoria que dibujó en un intervalo de tiempo específico (Ulanski, 2012; Pendón G. 2017).

4.1 Derivadores/boyas

El estudio de las corrientes superficiales mediante el seguimiento de boyas de deriva ha evolucionado mucho en las últimas décadas. Esta técnica para medir las corrientes ha permitido obtener las primeras observaciones que se tienen acerca del flujo del océano. La observación del océano con boyas de deriva comenzó a documentarse sistemáticamente en la Expedición del *Challenger* (1875-1876), pero no fue hasta principios de los años 70 cuando se desarrollaron las técnicas de posicionamiento vía satélite que se produjo un salto cuantitativo en el estudio de las corrientes y sus trayectorias. Resolver el problema de localización de estos dispositivos permitió la capacidad de desplegar operativamente amplias redes de boyas y detectarlas desde cualquier punto (Cardona-Díaz, 2015).

Los datos de la trayectoria y velocidad de las corrientes superficiales en la BTS utilizados en este trabajo fueron obtenidos con el método Lagrangiano mediante la liberación de cuerpos de deriva o boyas superficiales de tipo “*Microstar*” (Fig. 4.1); este tipo de boyas permiten rastrear corrientes a 1 m debajo de la superficie, con un registro de posición vía GPS por intervalo de 10 minutos (Pacific Gyre, 2019).

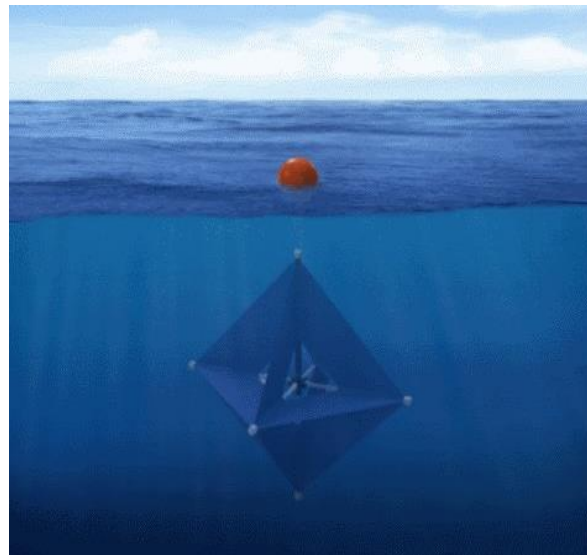


Figura 4.1 Boya superficial tipo “*Microstar*” en el océano: elemento electrónico (esfera naranja), elemento de arrastre (armazón auzl). Imagen obtenida de la página www.pacificgyre.com.

Este estudio utiliza los datos del monitoreo vía satelital (sistema *GlobalStar*) a través de internet de siete experimentos con periodos de medición de entre 2 y 8 días, que constan de la liberación de grupos de derivadores desde diferentes ubicaciones dentro de BTS para diferentes épocas del año, las características de cada uno de los experimentos pueden observarse en la Tabla I. Para complementar el estudio de la circulación superficial en la BTS se utilizarán los datos de radares de alta frecuencia CODAR (Tabla I).

Tabla I. Características del periodo de medición de los instrumentos.

Equipo	Periodo de medición	Intervalo de medición	Tipo de medición
5 Derivadores (Experimento 1)	28 de junio de 2012 16:00 h al 30 de junio de 2012 13:30 h (2 días)	10 min	Posición y fecha (GMT)
6 Derivadores (Experimento 2)	05 de julio de 2012 15:00 h al 08 de julio de 2012 15:40 h (3 días)	10 min	Posición y fecha (GMT)
6 Derivadores (Experimento 3)	28 de agosto de 2012 15:00 h al 01 de septiembre de 2012 15:50 h (4 días)	10 min	Posición y fecha (GMT)
5 Derivadores (Experimento 4)	09 de octubre de 2012 15:00 h al 12 de octubre de 2012 18:10 h (3 días)	10 min	Posición y fecha (GMT)
7 Derivadores (Experimento 5)	01 de febrero de 2013 16:30 h al 06 de febrero de 2013 18:10 h (5 días)	10 min	Posición y fecha (GMT)
8 Derivadores (Experimento 6)	29 de abril de 2013 17:20 h al 03 de mayo de 2013 19:00 h (5 días)	10 min	Posición y fecha (GMT)
5 Derivadores (Experimento 7)	19 de septiembre de 2013 16:30 h al 26 de septiembre de 2013 22:40 h (6 días)	10 min	Posición y fecha (GMT)
Radar HF	Periodo de los experimentos (excepto experimento 7)	1h	Mapa de corrientes en función del tiempo (GMT)
Anemómetro	Anual	1 h	Rapidez y dirección del viento en función del tiempo

4.2 Radares de Alta Frecuencia (HF)

Las observaciones de las corrientes superficiales con radar de alta frecuencia (HF) por sus siglas en inglés han permitido mejoras en el estudio de la dinámica de las zonas costeras (Prandle, 1991). Los radares HF son capaces de estimar corrientes superficiales en el primer metro de la superficie del océano mediante la emisión de pulsos electromagnéticos con frecuencias de 3 a 30 MHz y la posterior medición de la intensidad del eco reflejado en la rugosidad de la superficie del mar (Paduan y Graber, 1997).

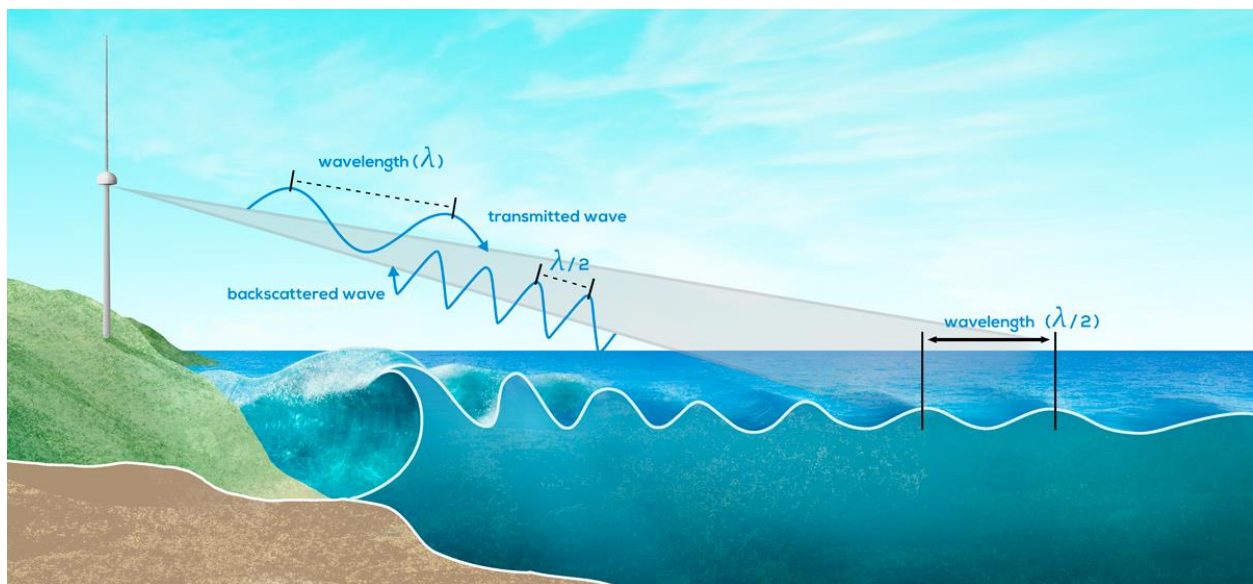


Figura 4.2 Funcionamiento de un radar de alta frecuencia (HF) en el océano. Imagen obtenida de SOCIB:

Balearic Islands Coastal Observing and Forecasting System (<http://socib.es/>).

Esta interacción entre la señal electromagnética y las ondulaciones de la superficie del mar es conocida como retroesparcimiento Doppler o *backscattering* y genera una diferencia (corrimiento Doppler) entre la frecuencia de la señal emitida y la frecuencia de la señal recibida, la cual es utilizada para estimar la velocidad de las corrientes superficiales (que se alejan o se acercan al transmisor) en dirección radial (Lipa and Barrick, 1977).

Al combinar los vectores radiales de dos o más estaciones de radares (Fig. 4.3) es posible calcular las corrientes totales referidas a un sistema coordenado norte-sur, este-oeste; la distancia a la que se localiza una estación con respecto de la otra está en función de la frecuencia del radar y de las condiciones morfológicas de la costa. (Flores-Vidal *et al.* 2011).

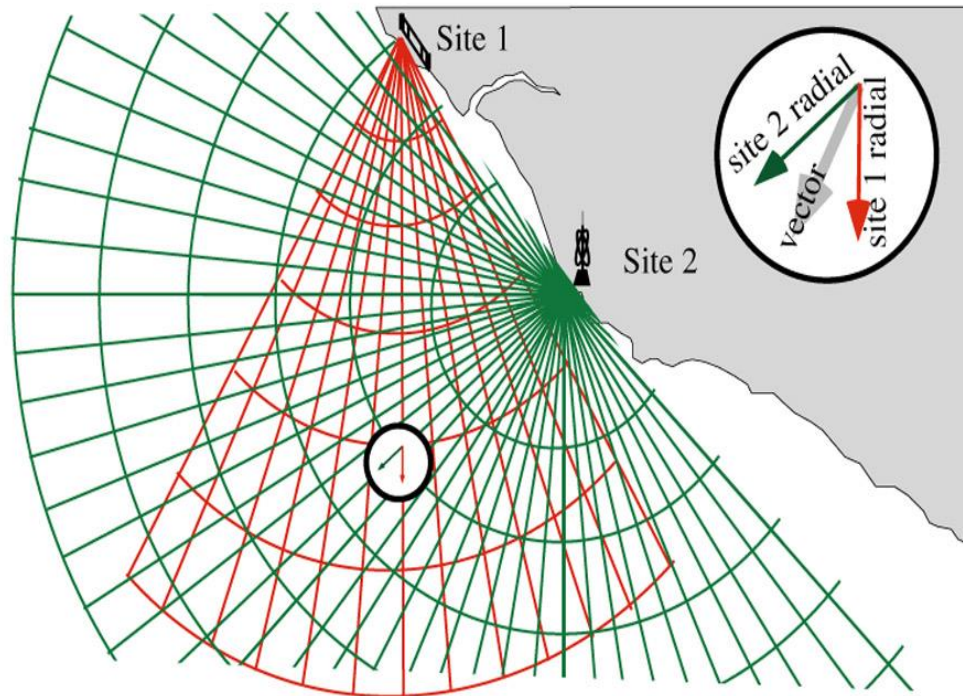


Figura 4.3. Sistema de dos radares de alta frecuencia (HF). Imagen obtenida de WERA Remote Ocean Sensing (<https://helzel-messtechnik.de/de/6035-wera-remote-ocean-sensing>).

Para el periodo de tiempo en que se desarrollaron los experimentos de las boyas, se realizaron mediciones con un arreglo de dos Radares de alta frecuencia (CODAR) con transmisión de 25 MHz y resolución espacial de 1 km x 1 km cada hora, provenientes de las estaciones Punta Morro y CONALEP (Fig. 1.1) en la BTS (Flores *et al.*, 2015).

4.3 Procesamiento de datos

4.3.1 Derivadores

El procesamiento de los datos registrados para los derivadores consistió en eliminar datos en tierra, así como las posiciones erróneas por mal geoposicionamiento o por ser registradas a bordo de una embarcación. Los datos de la posición (Latitud y Longitud) de cada una de las boyas se interpolaron linealmente cada 20 minutos para tener una serie uniforme a través del tiempo. Para cada boya, se calculó la distancia que se desplazó entre cada posición interpolada y se utilizó el esquema de diferencias centradas (Poulain *et al.*, 2009) para calcular las componentes de velocidad (u , v), donde:

$$u = \frac{dx}{dt} \quad v = \frac{dy}{dt}$$

dx = La diferencia en metros de las longitudes del punto anterior y el posterior.

dy = La diferencia en metros de las latitudes entre el punto anterior y posterior.

dt = Para todos los casos fue un intervalo de 20 minutos, en segundos.

Con los componentes de velocidad (u , v) se calculó la magnitud de la misma como:

$$V = \sqrt{u^2 + v^2}$$

Es importante señalar que no se corrigió el efecto directo de arrastre debido al viento en los derivadores (Murray, 1975), por lo que los resultados son una aproximación a la circulación superficial.

4.3.2 Viento

4.3.2.1 Viento local

Para el periodo de tiempo en que se desarrollaron los experimentos (Tabla 1) se utilizaron las mediciones horarias de magnitud y dirección del viento de una estación meteorológica (AANDERAA) ubicada en Punta Morro en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) (Fig. 1) para generar series de tiempo. A partir de los datos del viento se obtuvieron las componentes del esfuerzo del viento (τ_x, τ_y) de acuerdo con Gill (1982), con coeficientes de arrastre (C_d) no lineales (Trenberth *et al.*, 1990).

Con los datos obtenidos de la estación meteorológica, se calcularon los valores medios para cada hora del día de las componentes vectoriales del viento durante 2012 y 2013, para observar su comportamiento típico. Así mismo se obtuvo la elipse de variabilidad del viento para cada experimento mediante la metodología propuesta por Emery y Thompson (1998).

4.3.2.2 Viento sinóptico

Para tener un panorama de la variabilidad espacial y temporal del viento cercano a la región de estudio, se utilizó la base de datos horarios del Reanálisis Climático ERA5 del año 2012 y 2013, generado por el Servicio de Cambio Climático Copernicus (Copernicus Climate Change Service Information, <http://climate.copernicus.eu/products/climate-reanalysis>). Los datos constan de una malla de viento (u, v) a 10 m sobre la superficie del mar con una resolución espacial de 25 km x 25 km. Se obtuvieron imágenes promedio de los días que dura cada uno de los experimentos (Tabla I).

4.3.3 Temperatura

Para observar la cobertura espacial de la temperatura cercana a la región de estudio, se utilizó la base de datos diarios de Reanálisis de la temperatura superficial GHR SST -MUR (Group for High Resolution Sea Surface Temperature - Multiscale Ultrahigh Resolution, <http://podaac.jpl.nasa.gov>) del año 2012 y 2013. Los datos constan de una malla de temperatura con una resolución espacial de 1 km x 1 km. Se obtuvieron imágenes promedio de los días que dura cada uno de los experimentos (Tabla I).

4.3.4 Marea

Se obtuvieron las variaciones del nivel del mar de las predicciones de marea de la red de monitoreo de CICESE (<http://redmar.cicese.mx/>) y se generaron series de tiempo para el periodo en que se desarrollaron los experimentos (Tabla 1), así mismo se realizó un análisis armónico de dichos datos utilizando el paquete de MATLAB *t_tide* (Pawlowicz *et al.*, 2002), con el propósito de conocer las principales componentes de marea que actúan en la zona durante los periodos de estudio.

4.3.5 Radares de Alta Frecuencia (HF)

En cuanto a las corrientes superficiales obtenidas de los radares HF, se obtuvieron imágenes promedio de los campos vectoriales de los días que dura cada uno de los experimentos (Tabla I) para comparar con el patrón de las boyas. Los datos obtenidos por el radar tienen intervalos de una hora.

4.3.6 Coeficiente de correlación de Pearson

Para evaluar la dependencia lineal del desplazamiento de cada uno de los derivadores (u, v) con respecto al forzamiento del esfuerzo de viento $(\tau x, \tau y)$ se calculó el coeficiente de correlación de cada uno de ellos. Si cada variable (A, B) tiene N observaciones escalares, el coeficiente de correlación se define como:

$$Corrcoef(A, B) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left(\frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right)$$

Donde μ_A y σ_A son la media y la desviación estándar de A , respectivamente, y μ_B y σ_B son la desviación media y estándar de B (Fisher, 1958).

El coeficiente de correlación matriz de dos variables es la matriz de coeficientes de correlación para cada combinación de variables:

$$R = \begin{pmatrix} Corrcoef(A, A) & Corrcoef(A, B) \\ Corrcoef(B, A) & Corrcoef(B, B) \end{pmatrix}$$

A y B están siempre directamente correlacionados a sí mismos, las entradas diagonales son sólo 1, esto es:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & Corrcoef(A, B) \\ Corrcoef(B, A) & 1 \end{pmatrix}$$

4.3.7 Correlación vectorial compleja

Se evaluó la respuesta de cada uno de los derivadores (u, v) al forzamiento del esfuerzo de viento $(\tau x, \tau y)$ mediante la correlación vectorial compleja propuesta por Kundu (1976). Esta correlación permite conocer las similitudes de la magnitud entre series de tiempo y el ángulo de desfase entre ellas.

4.3.8 Análisis espectral y armónico

Con la finalidad de identificar que frecuencias introducen mayor energía en una serie de tiempo, se utilizaron análisis espectrales mediante la transformada discreta de Fourier por medio del periodograma promedio de Welch (Emery y Thompson 1998), que consiste en fraccionar una serie de tiempo en segmentos con el mismo número de datos, para posteriormente calcular los periodogramas en cada segmento.

Por otro lado, para determinar la contribución de las principales frecuencias astronómicas de la marea sobre la bahía, se realizó un análisis armónico sobre la serie de tiempo del nivel del mar con el paquete de MATLAB R2014a T_Tide (Pawlowicz *et al.*, 2002).

5 Resultados

5.1 Condiciones generales de viento y temperatura

Se presenta espacialmente tanto la temperatura como el viento promedio para el periodo de cada uno de los experimentos cercano a la región de estudio. Posteriormente se muestra el comportamiento típico del viento dentro de BTS durante 2012-2013.

5.1.1 Temperatura

El promedio de la temperatura que se presentó durante los experimentos, mostró que los valores más elevados generalmente se encuentran dentro de BTS en la región cercana al puerto de Ensenada (Fig. 1.1) y disminuyen hacia el exterior de la misma. Con excepción de los meses de octubre de 2012 (Fig. 5.1), febrero y septiembre de 2013 (Fig. 5.2).

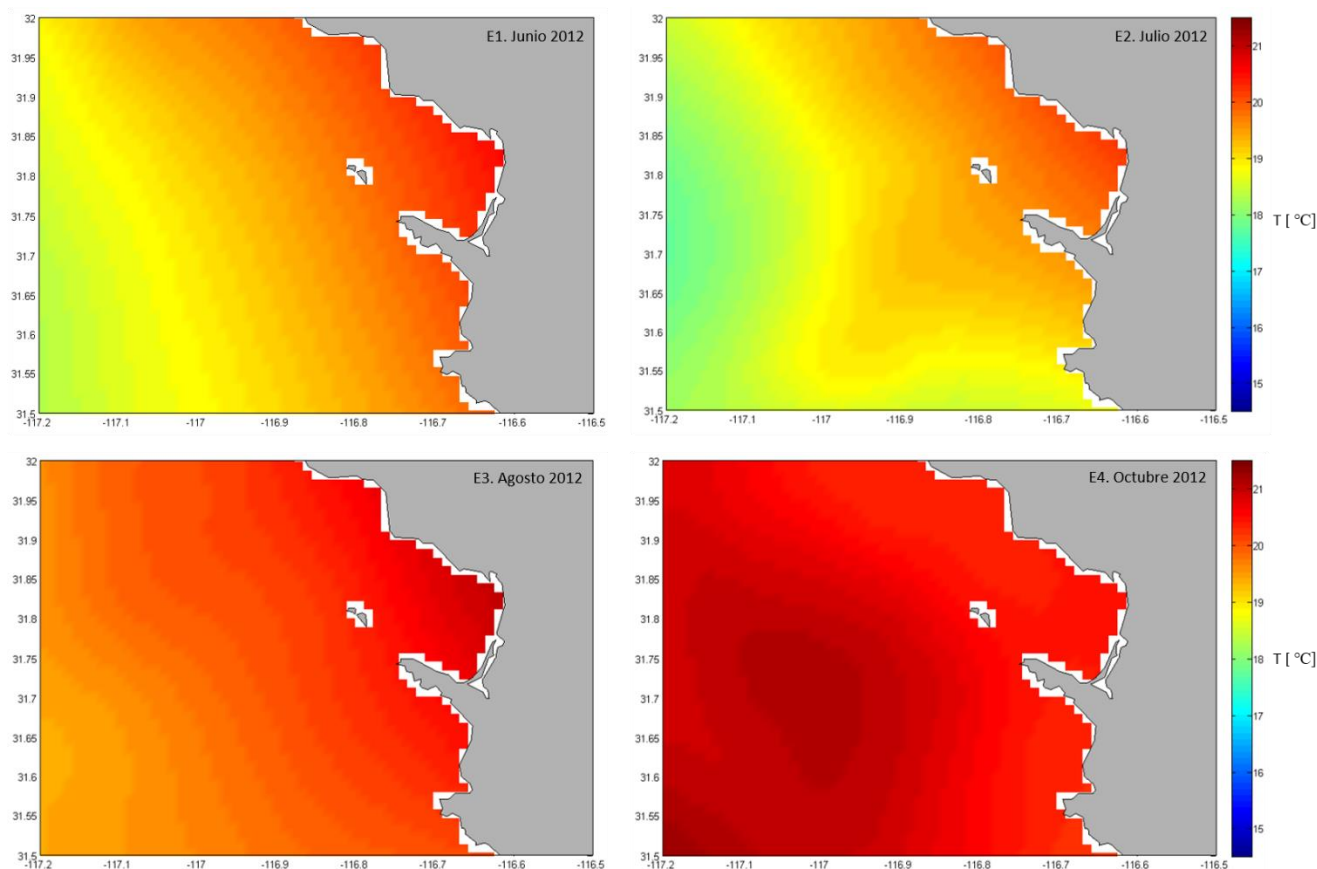


Figura 5.1 Temperatura superficial promedio para el periodo de los experimentos del año 2012 (E1 a E4).

La temperatura máxima registrada dentro de BTS en el periodo de los experimentos se presentó en el mes de agosto de 2012 (Fig. 5.1) durante el experimento 3 ($\sim 21^{\circ}\text{C}$), mientras que la mínima se presentó en febrero de 2013 (Fig. 5.2) durante el experimento 5 ($\sim 15^{\circ}\text{C}$).

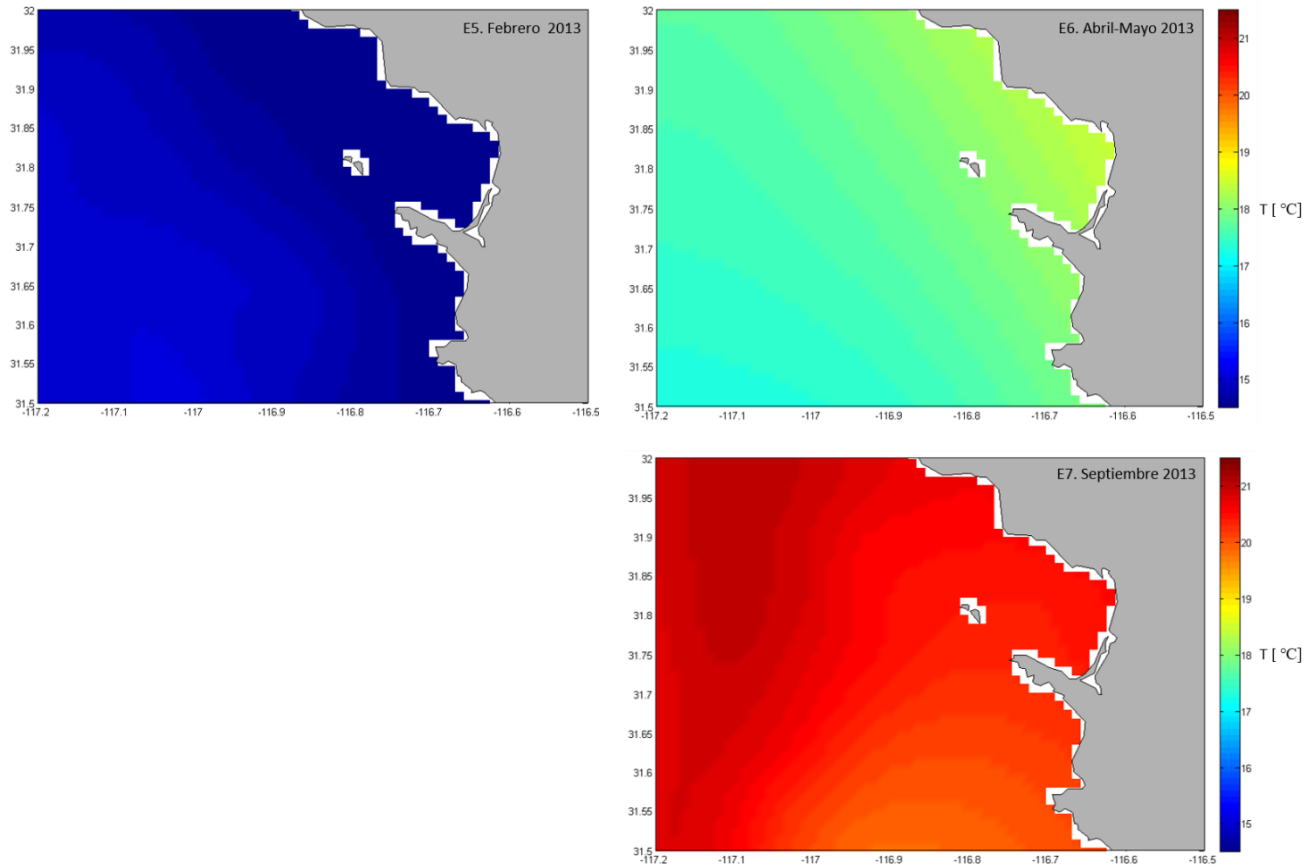


Figura 5.2 Temperatura superficial promedio para el periodo de los experimentos del año 2013 (E5 a E7).

5.1.2 Viento sinóptico

El viento sinóptico promedio cercano a la zona de estudio y presente durante los experimentos mostró magnitudes de entre 2-5 ms^{-1} aproximadamente, con los valores más altos registrados en los meses de junio y julio de 2012 (Fig. 5.3) correspondientes a los experimentos 1 y 2. La magnitud más baja registrada en los periodos de estudio se observó durante el experimento 5 (Fig. 5.4) en el mes de febrero de 2013 ($\sim 2 \text{ ms}^{-1}$).

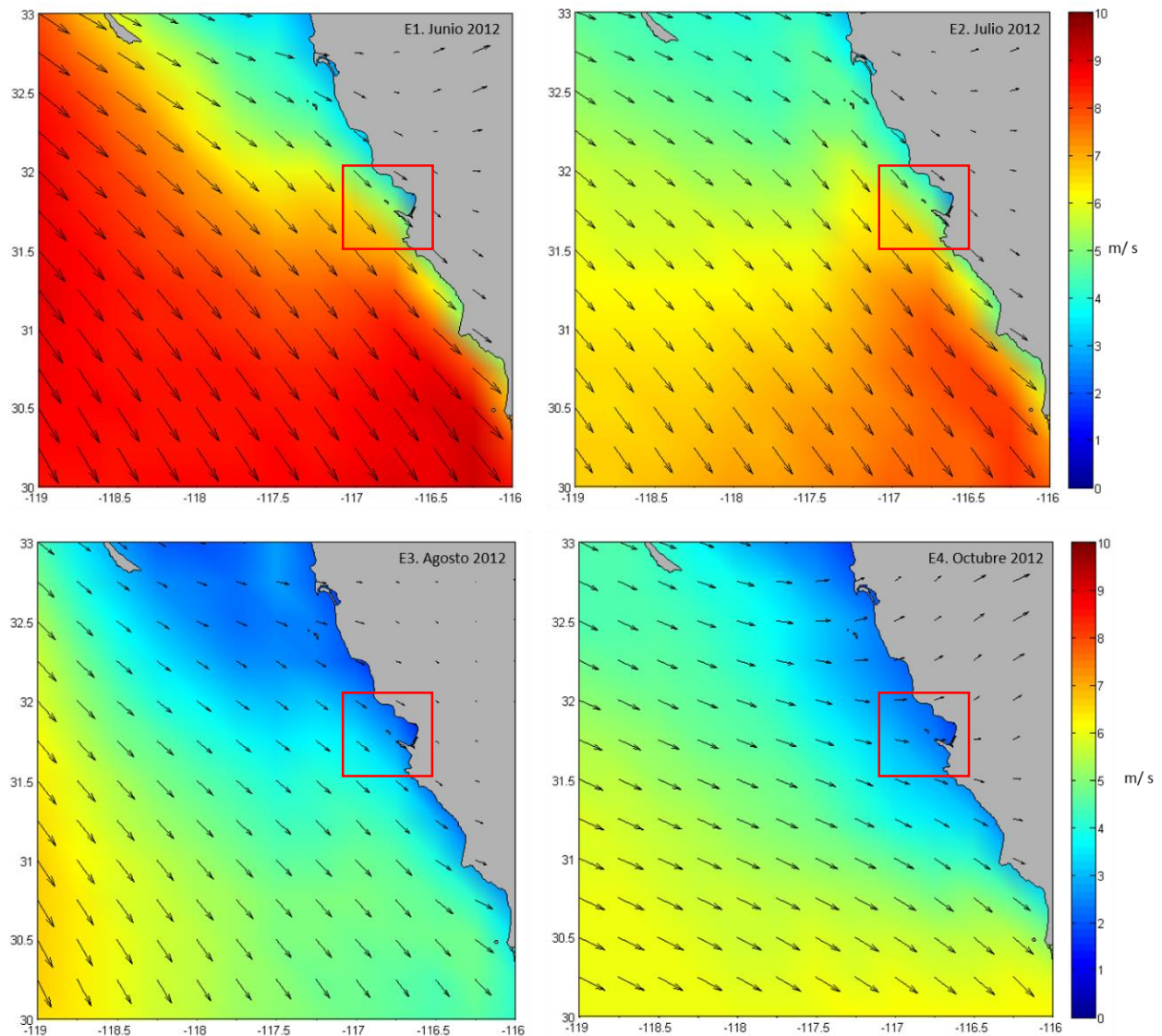


Figura 5.3 Magnitud y dirección promedio del viento sinóptico para el periodo de los experimentos del año 2012 (E1 a E4). El cuadro rojo indica el área de estudio.

En cuanto a la dirección del viento observado, para los meses de junio, julio de 2012 y febrero de 2013 este proviene del Noroeste y es paralelo a la costa de Baja California. Por otro lado, durante los meses de octubre de 2012, abril-mayo y septiembre de 2013 el viento proviene del Oeste-Noroeste (WNW) con aparente divergencia cercano a la costa, ya que al Norte y al Sur de $\sim 31.7^\circ$ N, los vientos se dirigieron al Noreste y Sureste respectivamente. Cercano a BTS el viento llega desde el Oeste, perpendicular a la línea de costa.

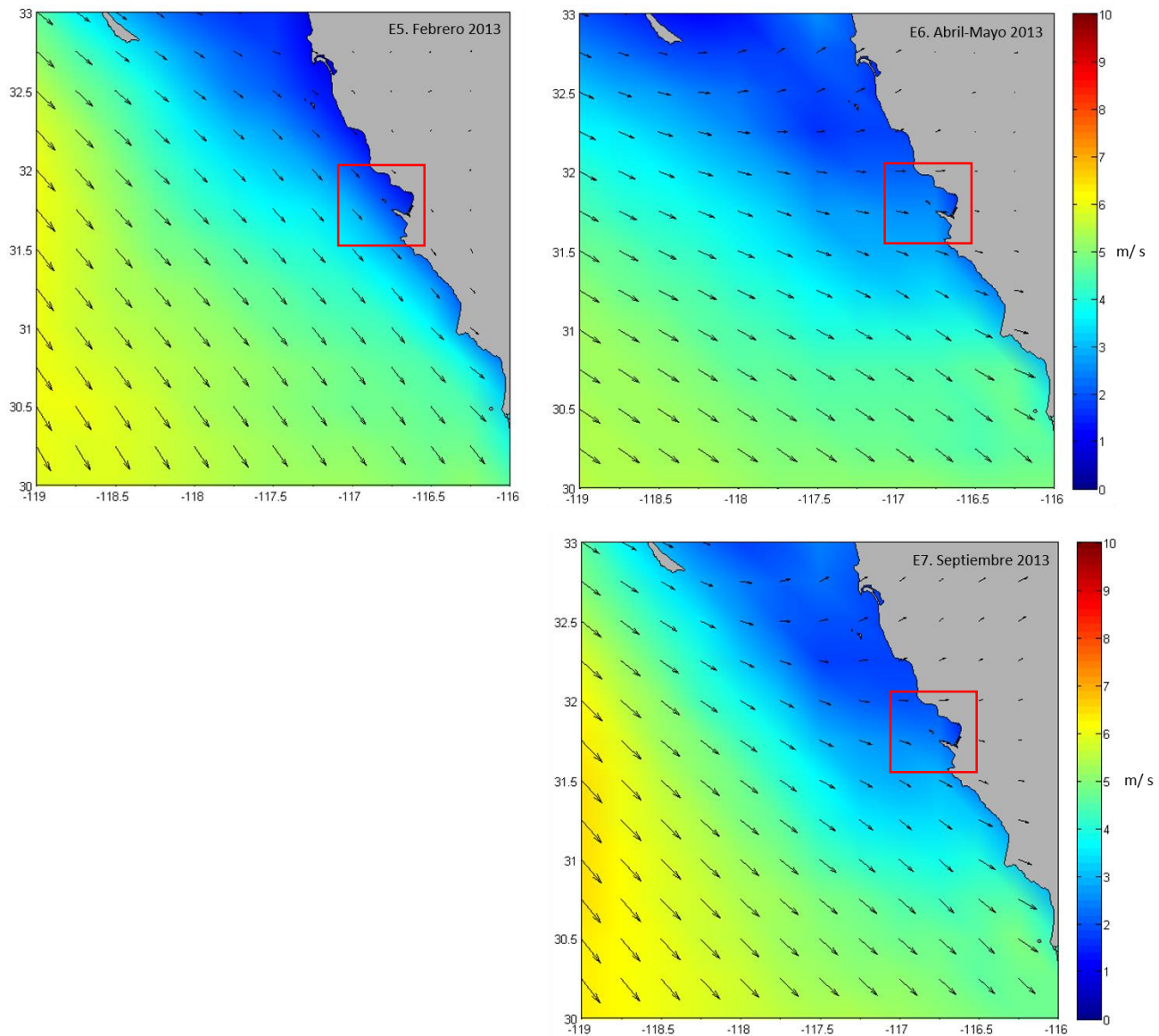


Figura 5.4 Magnitud y dirección promedio del viento sinóptico para el periodo de los experimentos del año 2013 (E5 a E7). El cuadro rojo indica el área de estudio.

5.1.3 Viento local

El comportamiento típico dentro de BTS durante 2012 y 2013, presentó un sistema de brisas notorio con vientos del mar hacia la costa (de Oeste-Noroeste a Este ~75% de las veces) durante el día, y de la costa hacia al mar (de Noreste a Suroeste ~65% de las veces) durante la noche (Fig. 5.5).

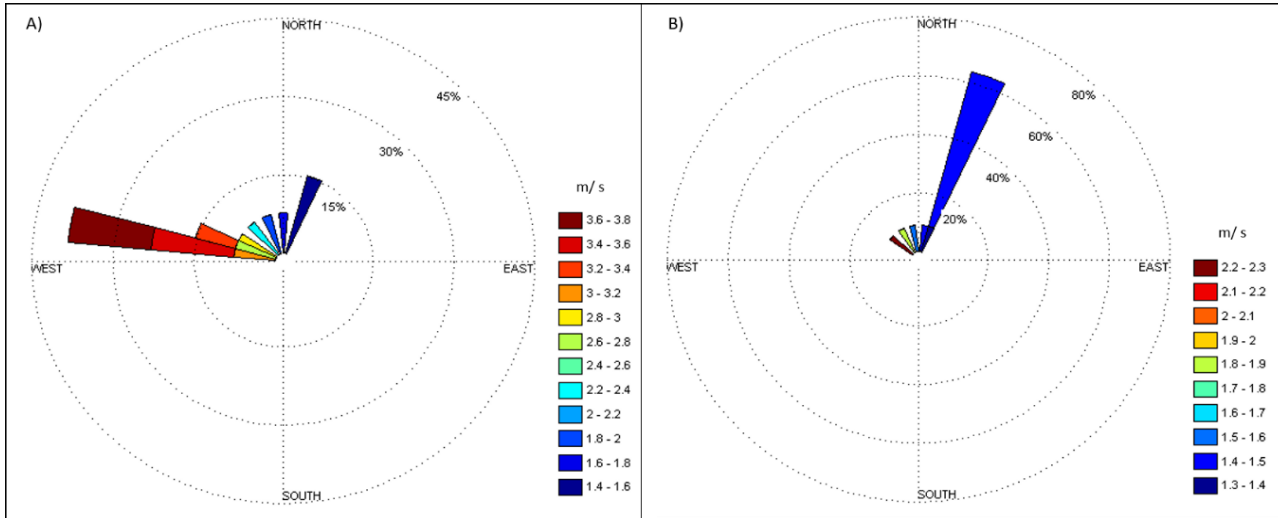


Figura 5.5 Dirección y magnitud predominante del viento dentro de BTS durante A) Día y B) Noche.

La brisa marina presentó mayor intensidad con respecto a la brisa terrestre. La magnitud del viento local comenzó a aumentar alrededor de las 14h hasta alcanzar valores máximos de $\sim 4 \text{ ms}^{-1}$ entre 21 y 23h para posteriormente disminuir conforme se acerca a las 5hrs. hasta $\sim 1.5 \text{ ms}^{-1}$ (Fig. 5.6).

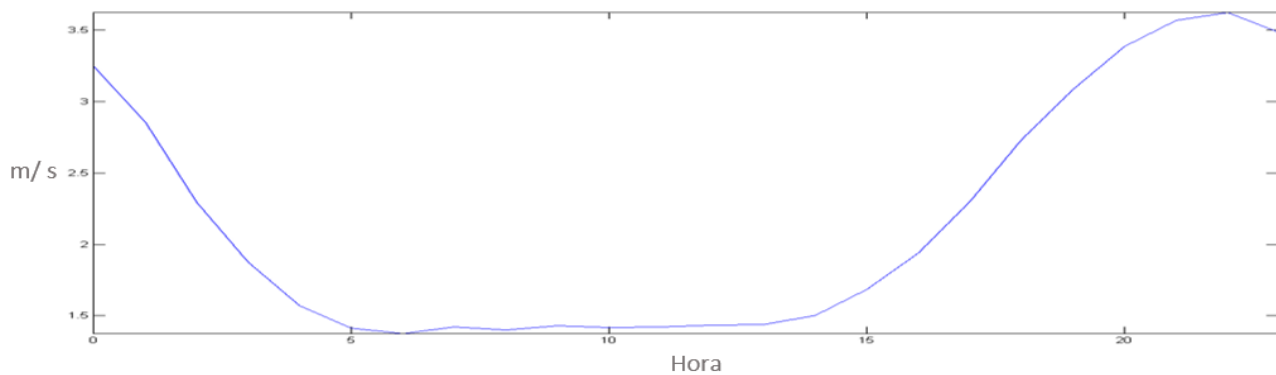


Figura 5.6 Magnitud del viento típico dentro de BTS para el año 2012 y 2013 (hora GMT).

Una comparación entre las elipses de variabilidad del viento para el periodo de los diferentes experimentos (fig. 5.7), mostró que la mayor variabilidad se presentó durante el experimento 6 (abril-mayo de 2012). La excentricidad de la elipse que corresponde a este experimento fue de 0.97, con una desviación estándar en el semieje de mayor variabilidad de 1.56 ms^{-1} . Los experimentos 1 y 2 (junio y julio de 2012) fueron los que presentaron la menor variabilidad (ambos con excentricidad de ~ 0.51), con magnitudes promedio del viento de 1.68 y 1.08 ms^{-1} respectivamente con dirección de WNW (Tabla II).

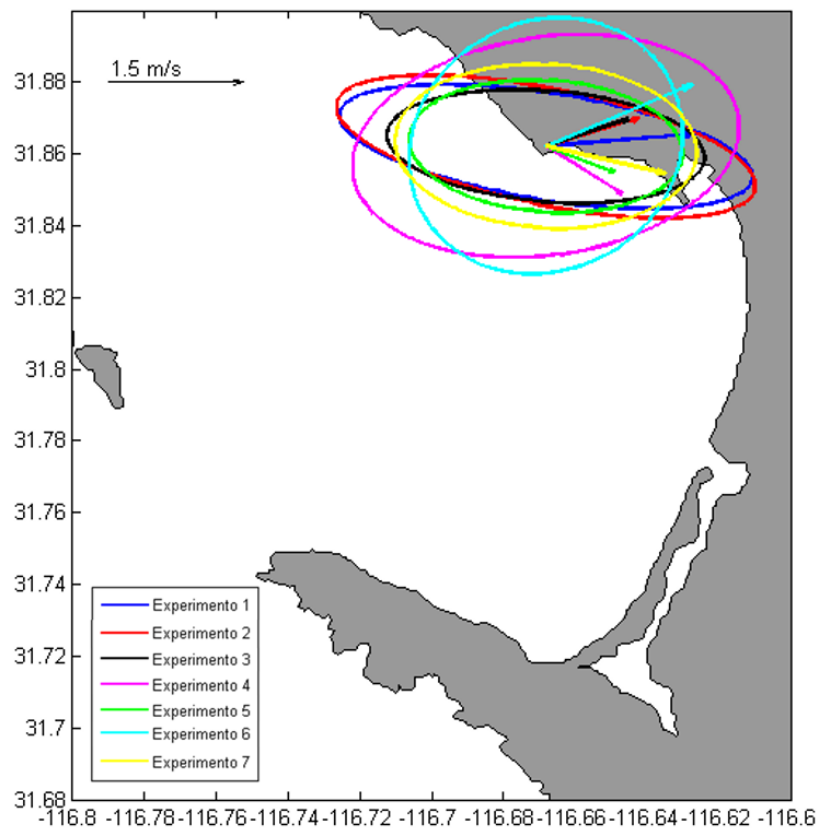


Figura 5.7 Elipses de variabilidad y vector promedio del viento local, para cada uno de los experimentos.

En la elipse correspondiente al experimento 4 (febrero de 2013) la dirección del vector de magnitud promedio está orientada al eje de mayor variabilidad de la elipse (Fig. 5.7). Esto sugiere que una parte importante de la variabilidad del viento se presentó en forma

perpendicular a la dirección promedio del viento, lo que puede indicar la presencia de un sistema de brisas en la bahía.

Tabla II. Parámetros de las elipses de variabilidad y vectores promedio del viento para los diferentes experimentos. Magnitud y dirección promedio del viento, desviación estándar del eje de mayor variabilidad y excentricidad del elipse.

Experimento	Fecha	Magnitud promedio m/s	Dirección promedio	Desviación estandar m/s	Excentricidad
1	junio 2012	1.68	WNW	2.32	0.51
2	julio 2012	1.08	WNW	2.38	0.50
3	agosto 2012	0.97	WNW	1.77	0.60
4	octubre 2012	0.99	WSW	2.17	0.74
5	febrero 2013	0.81	W	1.52	0.65
6	abril-mayo 2013	1.77	SW	1.56	0.97
7	septiembre 2013	1.36	W	1.68	0.67

5.2 Trayectorias de los derivadores

5.2.1 Experimento 1

El experimento 1 llevado a cabo del 28 al 30 de junio de 2012, constó de 5 derivadores liberados en la parte Central-Norte de la Bahía en profundidades de entre ~20-50m.

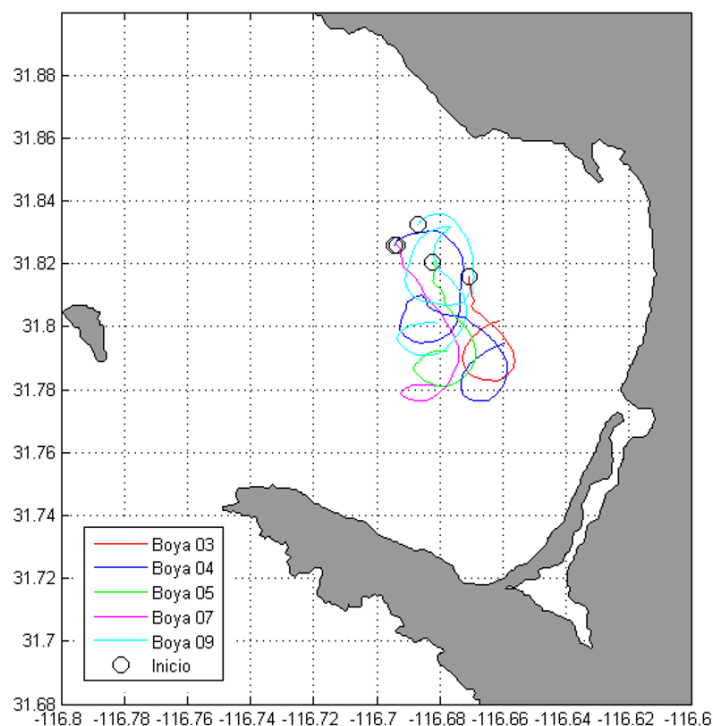


Figura 5.8 Trayectorias descritas por los derivadores durante el experimento 1.

El flujo predominante de los derivadores liberados en el experimento 1 (cuyo periodo particular se encuentra descrito en la Tabla I) fue hacia el sureste de la bahía, todos ellos describiendo trayectorias cerradas en sentido anticiclónico (entre 31.78 y 31.8°N, Fig. 5.8) con duración aproximada de 11:30h (Tabla III) al acercarse al centro de la bahía.

Tabla III. Características de algunas de las trayectorias cerradas descritas por los derivadores pertenecientes al experimento 1.

Boya	Inicio			Fin			Sentido	Periodo	Periodo Inercial
	Fecha	Hora	Posición	Fecha	Hora	Posición			
b4	30/06/12	00.30.00	116.66150 W	30/06/12	12.40.00	116.66150 W	Anticiclónico	11.50.00	22.70.00
			31.79375 N			31.79411 N			
b3	30/06/12	00.00.00	116.6632 W	30/06/12	12.30.00	116.66369 W	Anticiclónico	11.30.00	22.70.00
			31.80044 N			31.80094 N			

La magnitud de los 5 derivadores (Fig.5.9) varió entre 1 y 20cm s⁻¹ (Boya 04), con una rapidez promedio de 11cm s⁻¹.

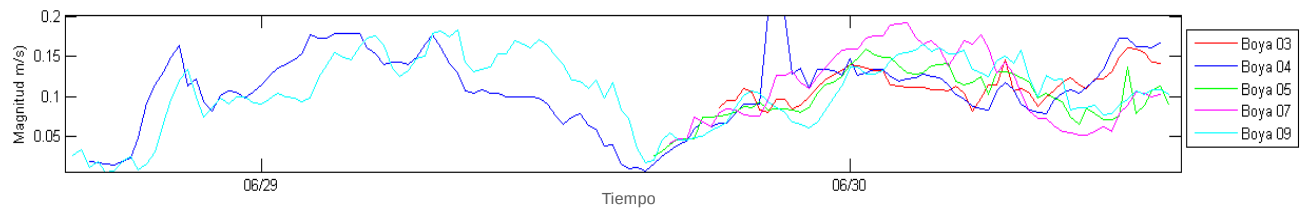


Figura 5.9 Rapidez de los derivadores durante el experimento 1 (28 al 30 de junio de 2012).

La duración total del experimento 1 fue de 2 días, en ese periodo de tiempo ninguno de los derivadores paso a profundidades de menos de 20m.

5.2.2 Experimento 2

El experimento 2 llevado a cabo del 5 al 8 de julio de 2012 constó de 6 derivadores, liberados en dos grupos, uno en la parte Norte de la Bahía y el segundo en la parte sur, ambos a profundidades de entre ~20-50m.

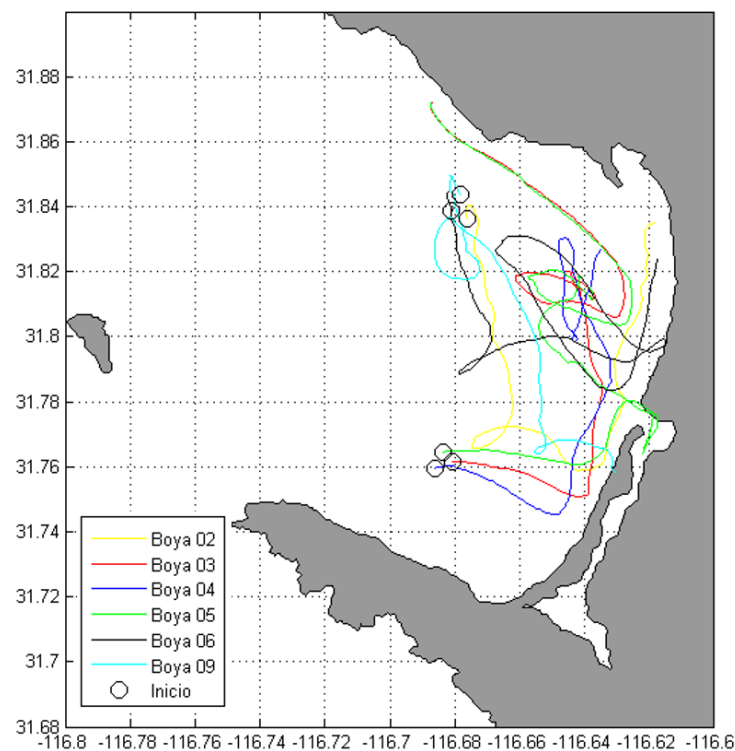


Figura 5.10 Trayectorias descritas por los derivadores durante el experimento 2.

El grupo de derivadores liberados en la parte Norte dirigió su desplazamiento hacia el sureste de la bahía hasta acercarse a la isobata de los 0-20m de profundidad, donde los derivadores modificaron su trayectoria, esta vez siguiendo la línea de costa hacia la boca norte de BTS; con excepción de la boya 09 la cual toco tierra aproximadamente 2 días y medio después de ser liberado en la costa de PB. EL segundo grupo de derivadores describió trayectorias perpendiculares a la costa de PB en dirección este hasta acercarse a la isobata de los 0-20m de profundidad, donde al igual que el grupo de derivadores anterior se dirigieron hacia el Norte de la bahía paralelos a la línea de costa.

Todos los derivadores del experimento 2 describieron trayectorias cerradas en sentido anticiclónico a excepción de la boya 04, que presenta la única trayectoria circular en sentido ciclónico registrado por los experimentos, registrada a aproximadamente 31.81°N (Fig. 5.10) con duración aproximada de 18:20h (Tabla IV).

Tabla IV. Características de la trayectoria cerrada descrita por el derivador 04 perteneciente al experimento 2.

Boya	Inicio			Fin			Sentido	Periodo	Periodo Inercial
	Fecha	Hora	Posición	Fecha	Hora	Posición			
b4	06/07/12	15.50.00	116.64100 W 31.81047 N	07/07/12	13.50.00	116.64030 W 31.81000 N	Ciclónico	18.20.00	22.70.00

La magnitud de los 6 derivadores (Fig. 5.11) varió entre 1 y 64cm s^{-1} , con una rapidez promedio de 11.8 cm s^{-1} .

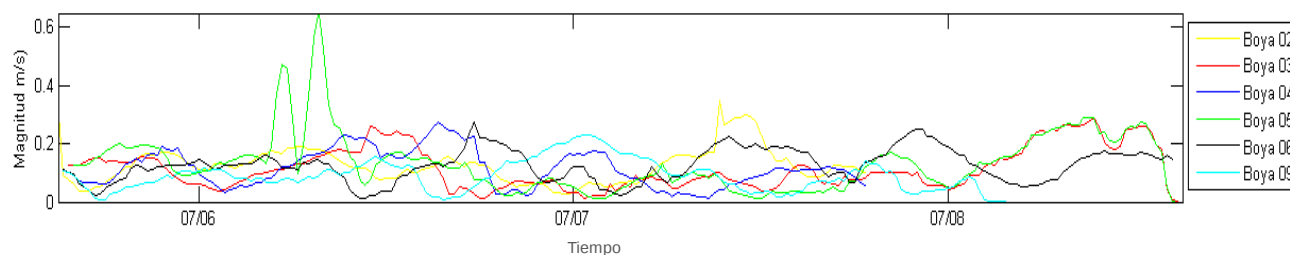


Figura 5.11 Rapidez de los derivadores durante el experimento 2 (5 al 8 de julio de 2012).

El derivador 05 en particular, presentó las dos magnitudes más altas para el experimento 2. La primera de ellas ~ 15 h después del inicio del experimento al entrar en el Estero Punta Banda (EPB), y la segunda al salir, esta última coincide con la rapidez máxima ($\sim 64 \text{ cm s}^{-1}$) de la serie de tiempo. La duración entre la entrada y salida del derivador en el EPB fue de aproximadamente 5h y la pluma de $\sim 3 \text{ km}$ (Fig. 5.12).

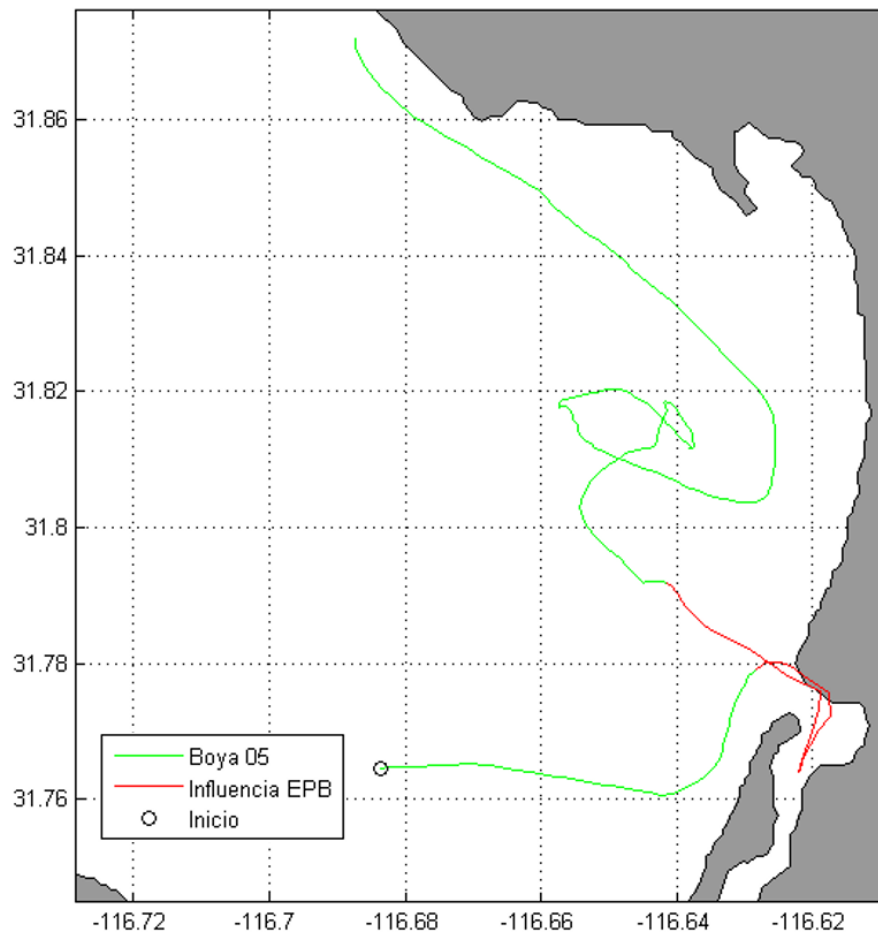


Figura 5.12 Trayectoria del derivador que ingreso en el Estero Punta Banda (EPB) durante el experimento 2.

5.2.3 Experimento 3

El experimento 3 llevado a cabo del 28 de agosto al 1 de septiembre de 2012 constó de 6 derivadores, liberados alrededor de toda la bahía a profundidades de entre ~20-50m.

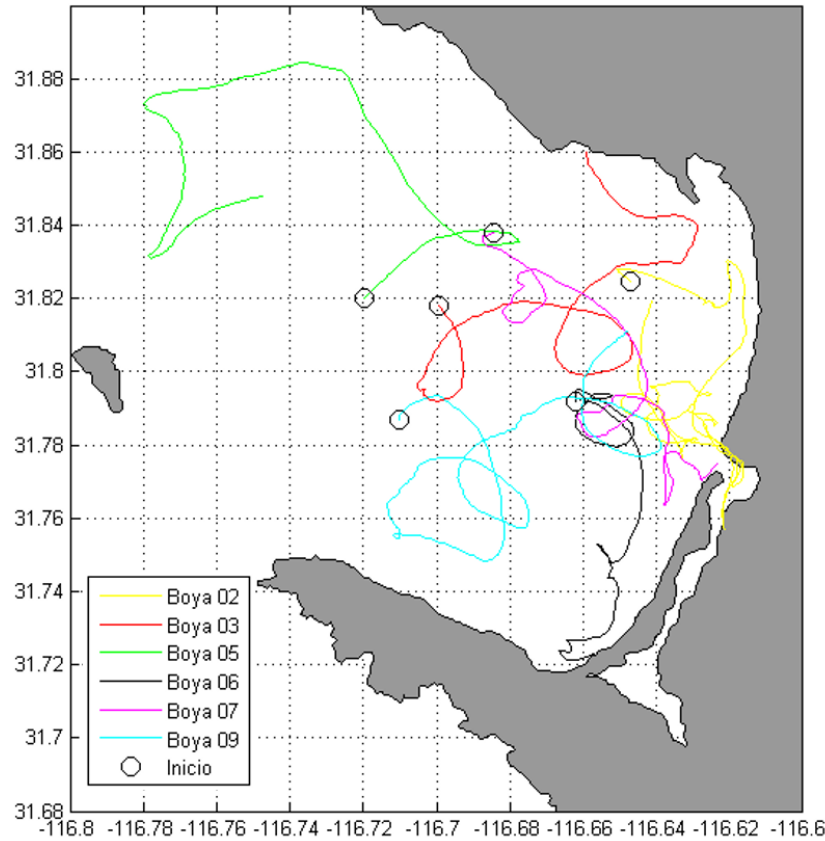


Figura 5.13 Trayectorias descritas por los derivadores durante el experimento 3.

Las trayectorias de los derivadores de este experimento, presentaron mayor variabilidad en comparación con los experimentos anteriores (Fig. 5.13). Para las boyas 02, 06 y 07 el flujo fue predominante hacia el sur-sureste, mientras que los derivadores liberados un poco más al oeste de BTS después de los 116.7°W (boya 03, 05 y 09), presentaron trayectorias hacia el noreste. En este experimento, los derivadores 03 y 06 llegaron a tierra aproximadamente 3 días después de ser liberados, el primero de ellos en la costa cercana a Punta Morro y el segundo, en la barra del EPB.

Todos los derivadores del experimento 3 describieron trayectorias circulares en sentido anticiclónico con duración aproximada de entre 12:40 -18:10h, con excepción de la boya 09 cuyo primera trayectoria cerrada duró 23:40h. (Tabla V).

Tabla V. Características de algunas de las trayectorias cerradas descritas por los derivadores pertenecientes al experimento 3.

Boya	Inicio			Fin			Sentido	Periodo	Periodo Inercial
	Fecha	Hora	Posición	Fecha	Hora	Posición			
b3	29/08/12	23:20:00	116.69491 W 31.81186 N	30/08/12	17:30:00	116.69480 W 31.81230 N	Anticiclónico	18:10:00	22:70:00
	30/08/12	23:20:00	116.66339 W 31.81727 N	31/08/12	12:00:00	116.66358 W 31.81713 N	Anticiclónico	12:40:00	22:70:00
b9	30/08/12	00:00:00	116.68402 W 31.77194 N	30/08/12	23:40:00	116.68394 W 31.77219 N	Anticiclónico	23:40:00	22:70:00
	30/08/12	22:10:00	116.69222 W 31.77623 N	31/08/12	10:50:00	116.69250 W 31.77638 N	Anticiclónico	12:40:00	22:70:00
	31/08/12	22:40:00	116.66016 W 31.79275 N	01/09/12	11:40:00	116.66008 W 31.79288 N	Anticiclónico	13:00:00	22:70:00

La rapidez promedio de los derivadores fue de 10.5 cm s^{-1} , con magnitudes máximas de 73.27 cm s^{-1} (Fig. 5.14)

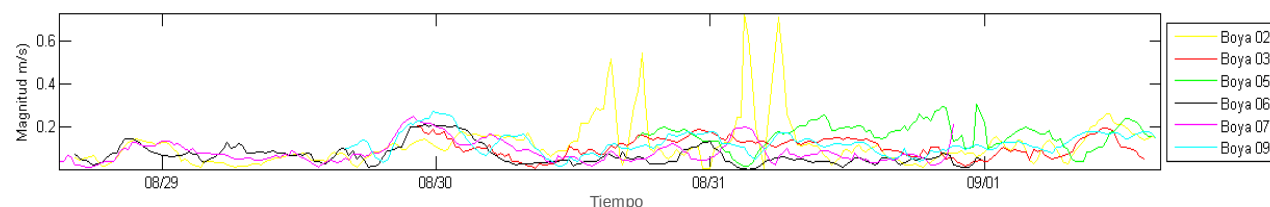


Figura 5.14 Rapidez de los derivadores durante el experimento 3 (28 de agosto al 1 de septiembre de 2012).

El derivador 02 en particular, presentó las cuatro magnitudes más altas para el experimento 3 al entrar y salir del EPB. El primer ingreso del derivador en el estero se presentó ~48h después del inicio del experimento y la duración entre la entrada y salida de este, fue de aproximadamente 10h con una rapidez de salida de 61.8 cm s^{-1} y una pluma de ~2 km (Fig. 5.15). Por su parte el segundo ingreso del derivador en el estero, tuvo una duración de aproximadamente 11h con una rapidez de salida de 71.1 cm s^{-1} y una pluma de ~4 km.

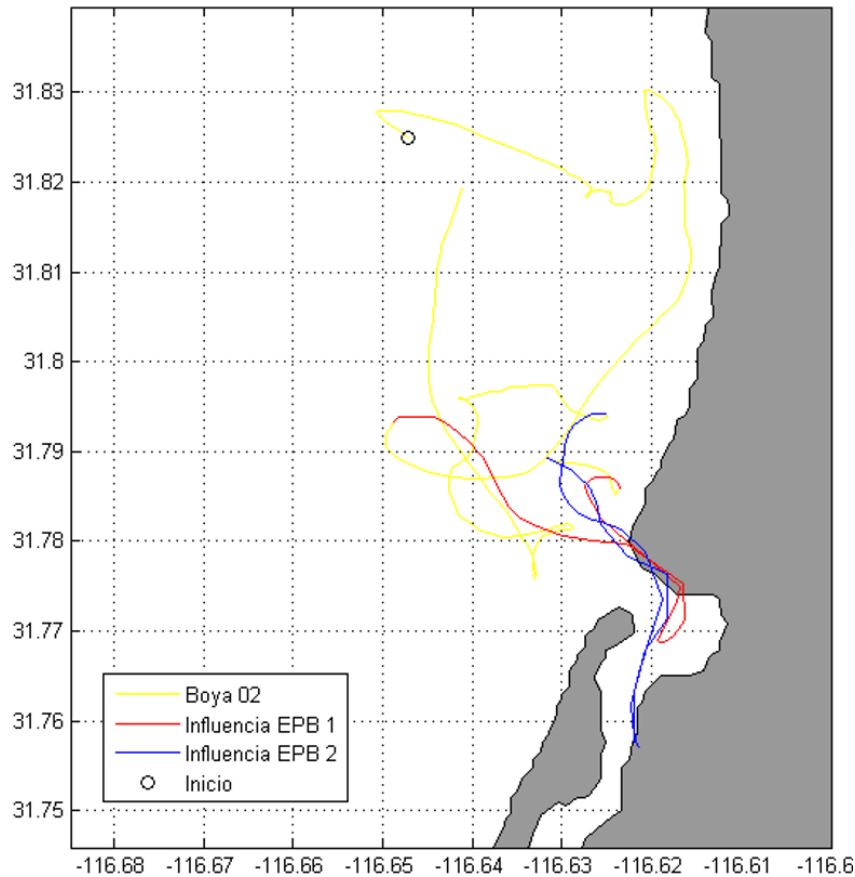


Figura 5.15 Trayectoria del derivador que ingreso en el Estero Punta Banda (EPB) durante el experimento 3.

5.2.4 Experimento 4

El experimento 4 llevado a cabo del 9 al 13 de octubre de 2012 constó de 5 derivadores, liberados alrededor de toda la bahía a profundidades de entre ~20-50m, con excepción de la boya 06 liberada cercana a las isóbatas de 0-20m de profundidad (Fig. 5.17).

La magnitud de los 5 derivadores (Fig. 5.16) varió entre 0.7 y 20cm s⁻¹, con una rapidez promedio de 10.2 cm s⁻¹.

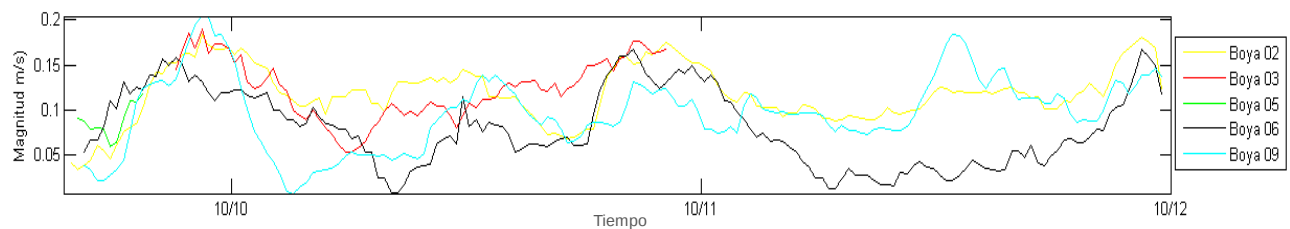


Figura 5.16 Rapidez de los derivadores durante el experimento 4 (9 al 13 de octubre de 2012).

En el experimento 4, las trayectorias descritas por las boyas 02 y 09 a diferencia de las direcciones predominantes de otros experimentos, tendieron a dirigirse hacia el norte de BTS.

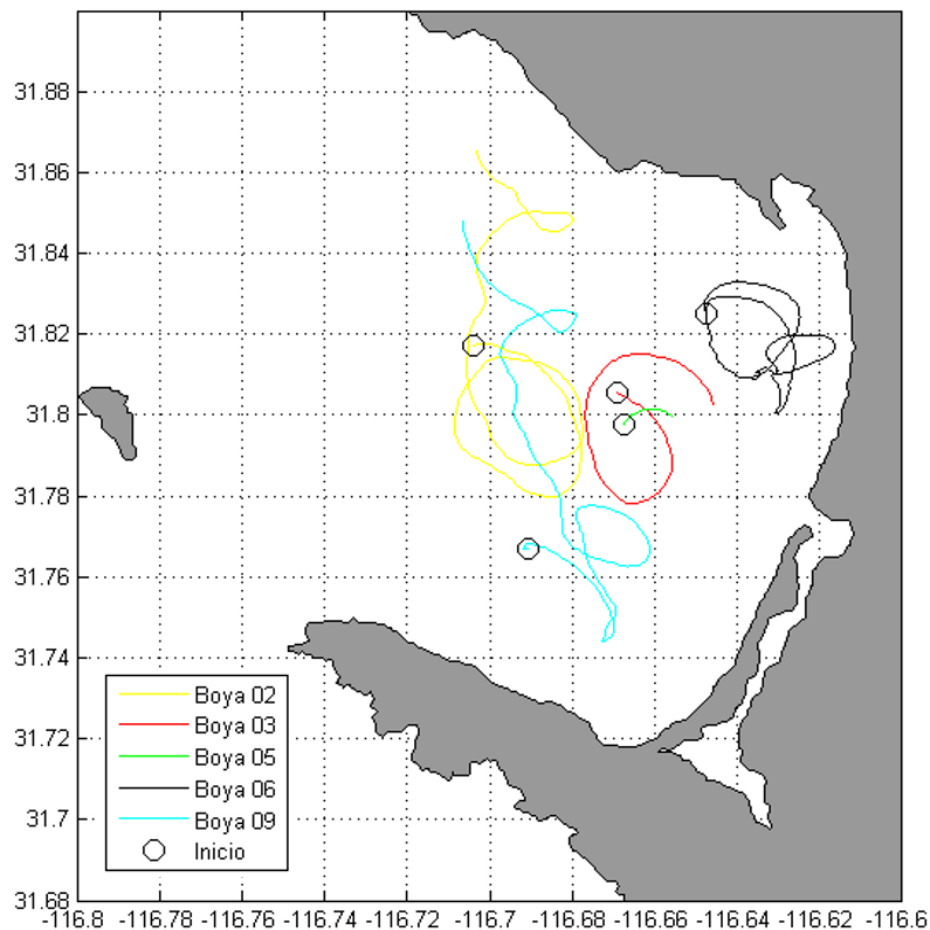


Figura 5.17 Trayectorias descritas por los derivadores durante el experimento 4.

Todos los derivadores de este experimento realizaron trayectorias circulares en sentido anticiclónico con periodo de entre 15 y 23h (Tabla VI). En particular la boya 05 dejó de transmitir por agotamiento de la batería y presentó la menor duración de todos los experimentos (~4 h). Durante los cuatro días que duró el experimento, ninguno de los derivadores llegó a tierra o salió de la bahía.

Tabla VI. Características de algunas trayectorias cerradas descritas por los derivadores pertenecientes al experimento 4.

Boya	Inicio			Fin			Sentido	Periodo	Periodo Inercial
	Fecha	Hora	Posición	Fecha	Hora	Posición			
b2	09/10/12	21:00:00	116.68930 W 31.81316 N	10/10/12	20:20:00	116.69027 W 31.8132 N	Anticiclónico	23:20:00	22:70:00
	10/10/12	15:20:00	116.70522 W 31.80822 N	11/10/12	12:50:00	116.70519 W 31.80797 N	Anticiclónico	21:30:00	22:70:00
b9	10/10/12	14:00:00	116.67675 W 31.76555 N	11/10/12	05:20:00	116.67680 W 31.76558 N	Anticiclónico	15:20:00	22:70:00

5.2.5 Experimento 5

El experimento 5 llevado a cabo del 01 al 06 de febrero de 2013 constó de 8 derivadores, liberados en el centro y norte de la bahía a profundidades de entre ~20-50m.

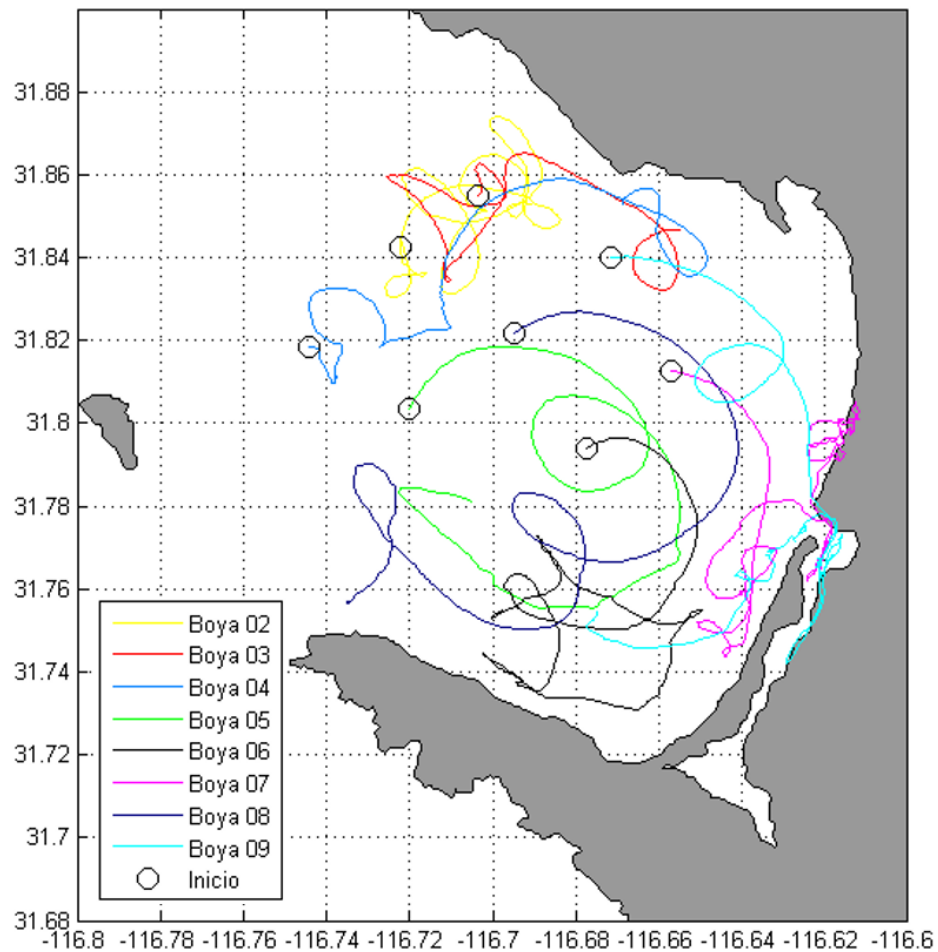


Figura 5.18 Trayectorias descritas por los derivadores durante el experimento 5.

El comportamiento de los derivadores liberados en el experimento 5 se caracterizó por presentar trayectorias circulares en sentido anticiclónico. Los recorridos descritos por las boyas 05, 06, 08 y 09 mostraron desplazamiento en dirección suroeste hacia Punta banda siguiendo la forma de la bahía. Los derivadores 02, 03 y 04 describieron trayectorias con dirección noreste hasta acercarse a la isobata de los 0-20m de profundidad, donde los derivadores modificaron su trayectoria, esta vez siguiendo la línea de costa hacia la boca sur de BTS (Fig. 5.18). Las trayectorias cerradas descritas por los derivadores en este experimento tuvieron una duración de entre 10 y 18 h (Tabla VII).

Tabla VII. Características de algunas trayectorias cerradas descritas por los derivadores pertenecientes al experimento 5.

Boya	Inicio			Fin			Sentido	Periodo	Periodo Inercial
	Fecha	Hora	Posición	Fecha	Hora	Posición			
b5	02/02/13	04:10:00	116.66286 W 31.79816 W	02/02/13	22:20:00	116.66275 W 31.79802 N	Anticiclónico	18:10:00	22:70:00
b8	02/02/13	11:00:00	116.67736 W 31.76711 N	03/02/13	01:20:00	116.67797 W 31.76663 N	Anticiclónico	14:20:00	22:70:00
			116.72444 W 31.77105 N			116.7243 W 31.77158 N			
	03/02/13	14:50:00	116.62989 W 31.81533 N	04/02/13	01:10:00	116.63027 W 31.81516 N	Anticiclónico	17:50:00	22:70:00

La rapidez promedio de los derivadores del experimento 5 fue de 8.9 cm s^{-1} , con magnitudes máximas de 53.23 cm s^{-1} (Fig. 5.19)

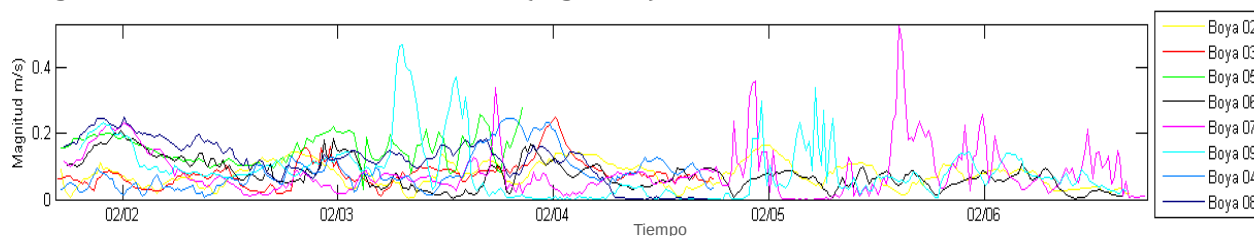


Figura 5.19 Rapidez de los derivadores durante el experimento 5 (01 al 06 de febrero de 2013).

Algunas trayectorias particulares, fueron las descritas por la boya 07 y 09. Estos derivadores registraron las cuatro magnitudes más altas del experimento y coincidieron en su ingreso al EPB en algún punto de su trayectoria.

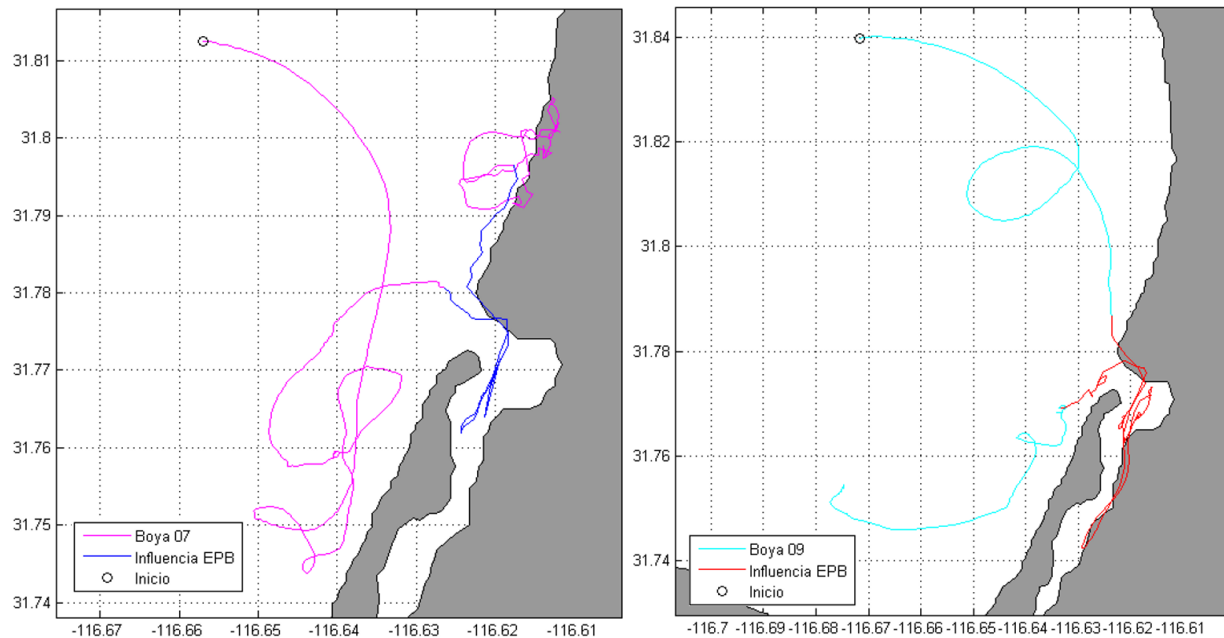


Figura 5.20 Trayectorias de los derivadores que ingresaron en el Estero Punta Banda (EPB) durante el experimento 5.

El ingreso del derivador 07 en el estero se presentó ~ 72 h después del inicio del experimento y la duración entre la entrada y salida de este, fue de aproximadamente 24h con una rapidez de salida de 53.2 cm s^{-1} y una pluma de $\sim 2 \text{ km}$ (Fig. 5.20). Por su parte el ingreso del derivador 09, tuvo una duración de aproximadamente 48h con una rapidez de salida de 38.1 cm s^{-1} y una pluma de $\sim 1.5 \text{ km}$. A diferencia de otros experimentos es que sus boyas ingresaron al EPB, en el experimento 5 la duración de la estancia dentro del mismo fue aproximadamente del doble de tiempo, pues ambos derivadores se dirigieron hacia la salida sin conseguir salir de él al menos una vez.

5.2.6 Experimento 6

El experimento 6 llevado a cabo del 29 de abril al 03 de mayo de 2013 constó de 8 derivadores, liberados en el centro y norte de la bahía a profundidades de entre ~ 20 -50m (Fig. 5.21).

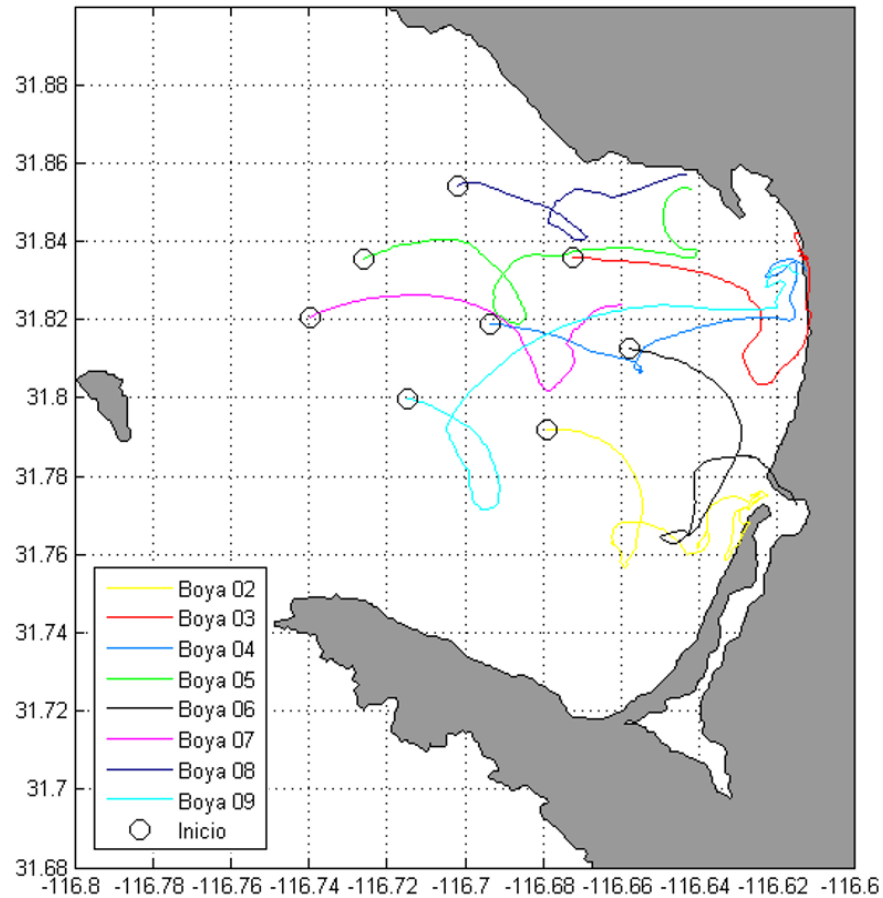


Figura 5.21 Trayectorias descritas por los derivadores durante el experimento 6.

En este experimento, el flujo predominante de 6 de los 8 derivadores fue en dirección este y perpendicular a la costa. Las boyas 02 y 06 se desplazaron en dirección sureste hacia la boca del EPB. La mayoría de los derivadores realizó trayectorias cerradas en sentido anticiclónico, con duración aproximada de entre 7 y 16 h (Tabla VIII).

Tabla VIII. Características de algunas trayectorias cerradas descritas por los derivadores pertenecientes al experimento 6.

Boya	Inicio			Fin			Sentido	Periodo	Periodo Inercial
	Fecha	Hora	Posición	Fecha	Hora	Posición			
b5	29/04/2013	23:50:00	116.69055 W	30/04/2013	07:40:00	116.68969 W	Anticiclónico	07:50:00	22:70:00
			31.83197 N			31.82011 N			
b8	30/04/2013	00:30:00	116.67822 W	30/04/2013	13:20:00	116.67747 W	Anticiclónico	12:30:00	22:70:00
			31.84816 N			31.84875 N			
b9	29/04/2013	20:50:00	116.70361 W	30/04/2013	13:10:00	116.70358 W	Anticiclónico	16:20:00	22:70:00
			31.79508 N			31.79502 N			

La magnitud de los 5 derivadores (Fig. 5.22) varió entre 0.7 y 49.88 cm s⁻¹, con una rapidez promedio de 8.4 cm s⁻¹.

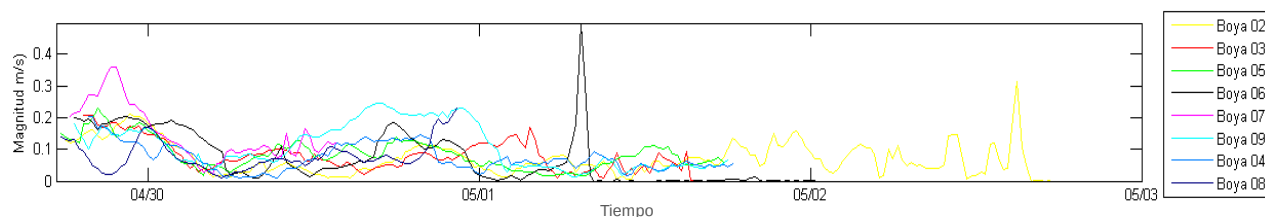


Figura 5.22 Rapidez de los derivadores durante el experimento 5 (29 de abril al 03 de mayo de 2013).

La magnitud más alta, fue registrada por el derivador 05 al entrar al estero donde toco tierra aproximadamente 42 h después de iniciar el experimento. Las boyas 03, 04, 08 y 09 también tocaron tierra aproximadamente 42 h después de comenzar su trayectoria, sólo la boya 02 permaneció más de 2 días antes de llegar a la costa. Este experimento presentó el mayor número de boyas que llegaron a tierra de todos los realizados.

5.2.7 Experimento 7

El experimento 7 llevado a cabo del 19 al 26 de septiembre de 2013 constó de 5 derivadores, liberados en el centro de la bahía a profundidades de entre ~30-50m. Este fue el experimento más largo de todos los realizados, y se caracterizó por la presencia de trayectorias circulares en sentido anticiclónico con duración de entre 8 y 10 h.

Tabla IX. Características de algunas trayectorias cerradas descritas por los derivadores pertenecientes al experimento 7.

Boya	Inicio			Fin			Sentido	Periodo	Periodo Inercial
	Fecha	Hora	Posición	Fecha	Hora	Posición			
b5	20/09/2013	05:40:00	116.65189 W	20/09/2013	14:00:00	116.65183 W	Anticiclónico	08:20:00	22:70:00
			31.79713 N			31.79725 N			
b6	20/09/2013	03:20:00	116.69530 W	20/09/2013	18:00:00	116.69575 W	Anticiclónico	14:40:00	22:70:00
			31.80725 N			31.80594 N			
	22/09/2013	01:50:00	116.65661 W	22/09/2013	12:00:00	116.65647 W	Anticiclónico	10:10:00	22:70:00
			31.78147 N			31.78122 N			

Las trayectorias descritas por las boyas mostraron desplazamiento en dirección suroeste hacia PB siguiendo la forma de la bahía, trazando múltiples giros (Fig. 5.23). Al llegar a PB, los derivadores con trayectorias de mayor duración no salieron por la boca sur de la bahía, sino que continuaron su trayectoria hacia el norte y volvieron a entrar en la bahía entre PM y el Puerto de Ensenada.

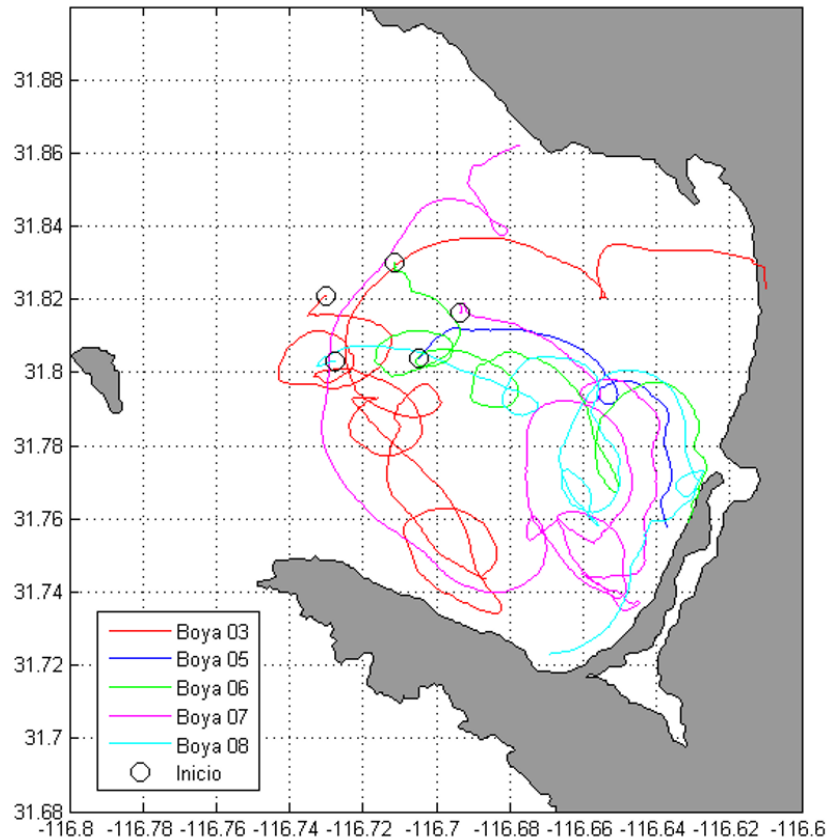


Figura 5.23 Trayectorias descritas por los derivadores durante el experimento 7.

La rapidez promedio de los derivadores fue de 10.5 cm s^{-1} , con magnitudes máximas de 43.46 cm s^{-1} (Fig. 5.24).

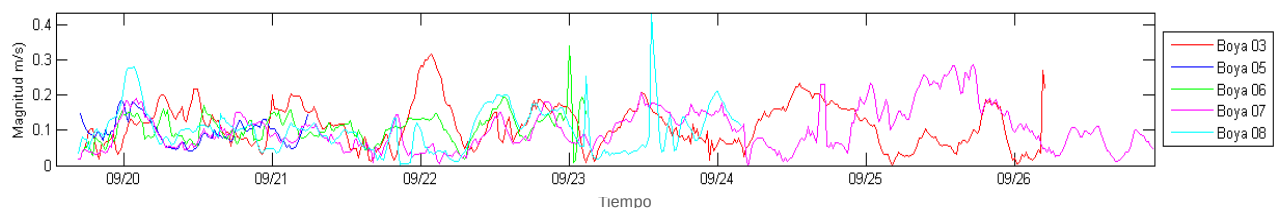


Figura 5.24 Rapidez de los derivadores durante el experimento 5 (19 al 26 de septiembre de 2013).

5.3 Circulación superficial promedio (Radares HF)

Con la finalidad de comparar la variabilidad del comportamiento de la circulación superficial en la bahía para el periodo de los diferentes experimentos con las trayectorias de las boyas, se analizaron mapas vectoriales promedio de las corrientes obtenidas por los radares de alta frecuencia y los vectores dibujados por los patrones de los derivadores (Anexo A). Para el periodo en que se realizó el experimento 7 no fue posible obtener datos del radar, debido a que las estaciones estuvieron fuera de funcionamiento.

El promedio por periodo de experimento de las corrientes superficiales (Fig. 5.25) mostró en la mayoría de los casos un flujo predominante de agua hacia el interior de la bahía frente a las costas de PSM y PB, con corrientes más intensas en la región expuesta al océano, y corrientes de menor intensidad en las zonas cercanas al Puerto de Ensenada (excepto el experimento 6). Las velocidades más altas de las corrientes superficiales se presentaron durante el experimento 1 ($\sim 14 \text{ cm s}^{-1}$) en la parte sur de la bahía, cercanas a PB. Por otro lado, las corrientes de menor rapidez se presentaron durante el experimento 4 ($\sim 2 \text{ cm s}^{-1}$).

El patrón de circulación durante los experimentos realizados en agosto de 2012, febrero y abril de 2013 (Experimentos 3, 5 y 6) muestra corrientes provenientes del noroeste que se curvan hacia el sureste dirigiéndose a la zona del puerto de Ensenada, corrientes del este que se curvan nuevamente en dirección al puerto aproximadamente a los 31.8°N y corrientes del este que se dirigen hacia el sur siguiendo la barra del EPB. Este comportamiento parece ser producto de la interacción de un remolino ciclónico en la región NE y un remolino anticiclónico al E de la región central de la bahía.

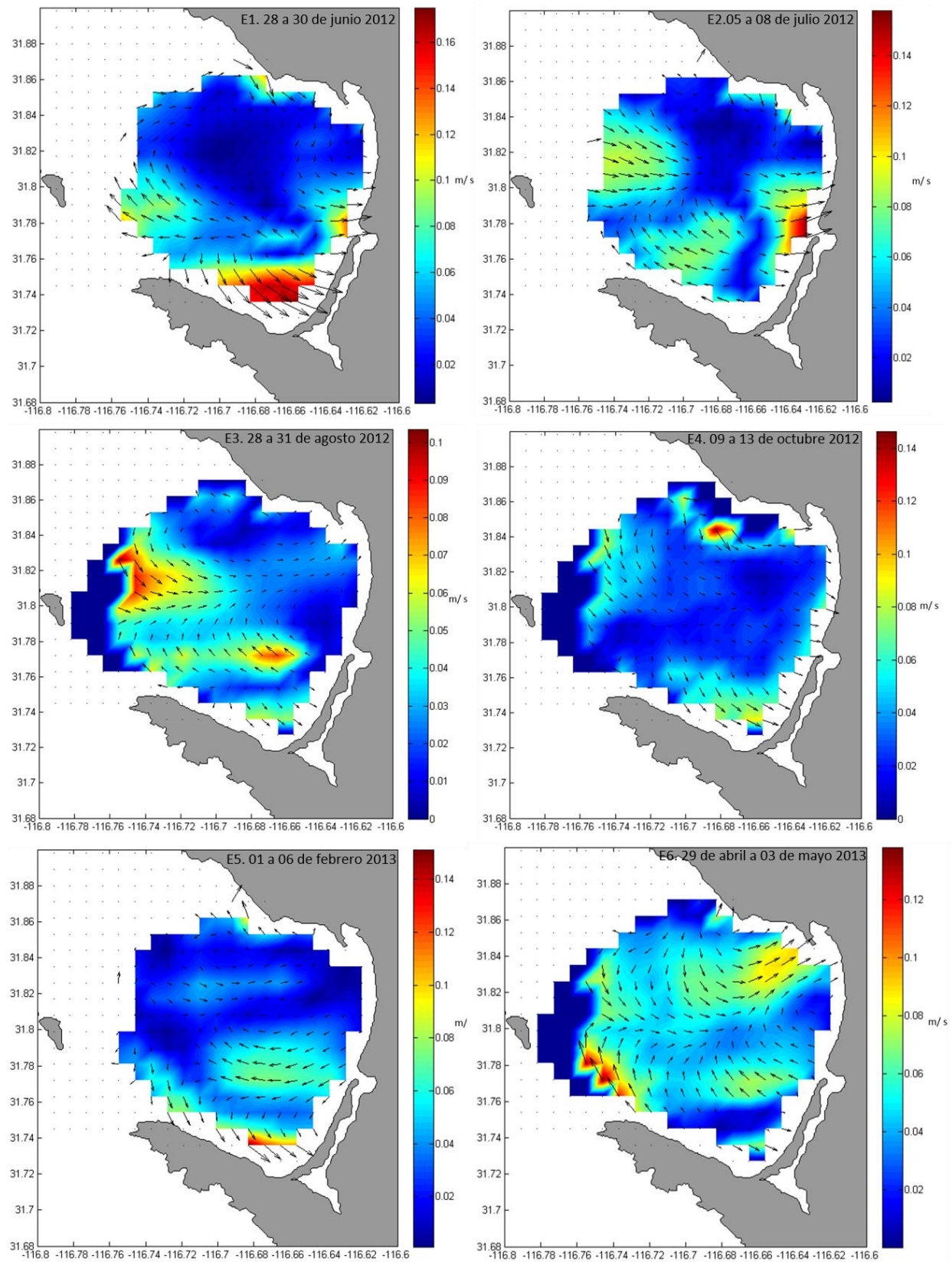


Figura 5.25 Corrientes superficiales promedio en BTS para el periodo de los experimentos.

5.4 Viento

Para obtener información acerca de la de los vientos en la BTS para el periodo en que se realizaron los experimentos, se elaboraron gráficos de rosas de vientos, así como series de tiempo de la magnitud y dirección del mismo.

Para los periodos de tiempo estudiados, la magnitud promedio del viento (Fig.5.28 y 5.29) fue de 2 m s^{-1} , de 1.16 m s^{-1} para la componente zonal del viento y de -0.01 m s^{-1} para la componente meridional, lo cual indica que en términos de sus componentes el viento va hacia el Este y Sur respectivamente. La componente meridional presento mayor variabilidad (desviación estándar de 1.05 m s^{-1}) que la zonal.

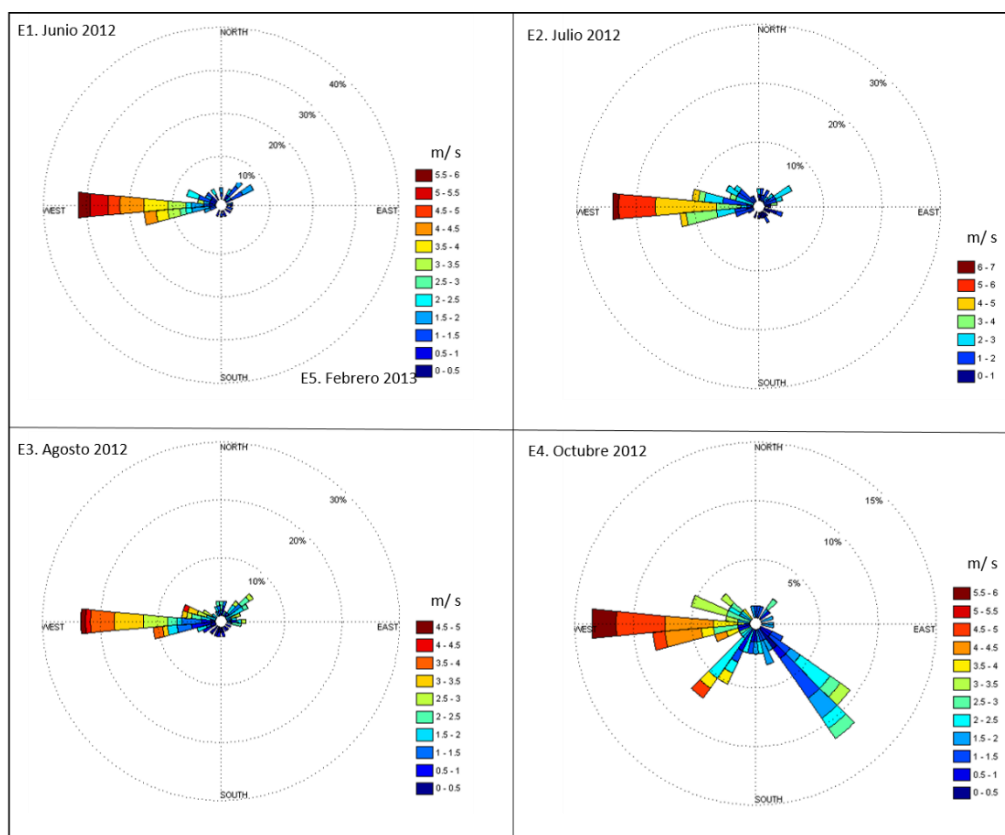


Figura 5.26 Rosas de viento que muestran la magnitud y las direcciones principales (en porcentajes) de las que proviene el viento para cada experimento del año 2012.

Las rosas de viento para los experimentos (Fig. 5.27 y 5.28) muestran que las direcciones de las que proviene el viento (> 10% de ocurrencia) son principalmente del W, WSW y NW respectivamente.

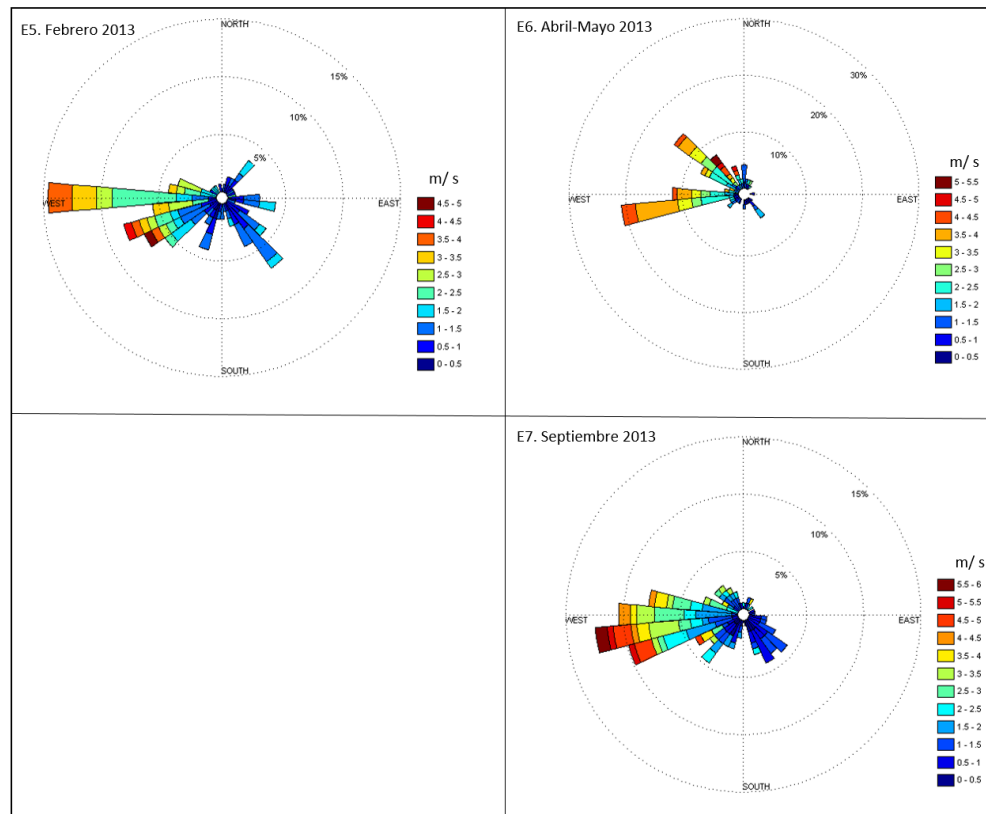


Figura 5.27 Rosas de viento que muestran la magnitud y las direcciones principales (en porcentajes) de las que proviene el viento para cada experimento del año 2013.

Para Junio, Julio y agosto de 2012 (E1, E2, E3) se observó que el viento proveniente principalmente del W (con otra componente de menor porcentaje del WNW) fue más persistente y con velocidades un poco más altas ($\sim 4.5-6 \text{ m s}^{-1}$) que el resto de los experimentos. Lo anterior concuerda con la baja excentricidad de las elipses de variabilidad descritas en la figura 5.7. Por otro lado, para los meses de octubre de 2012, febrero y septiembre de 2013, los vientos fueron más variables con proveniencia del W

y WSW. La magnitud máxima del viento registrada durante todos los experimentos fue de 6.1ms^{-1} en dirección sureste y presente durante julio de 2012 (E2).

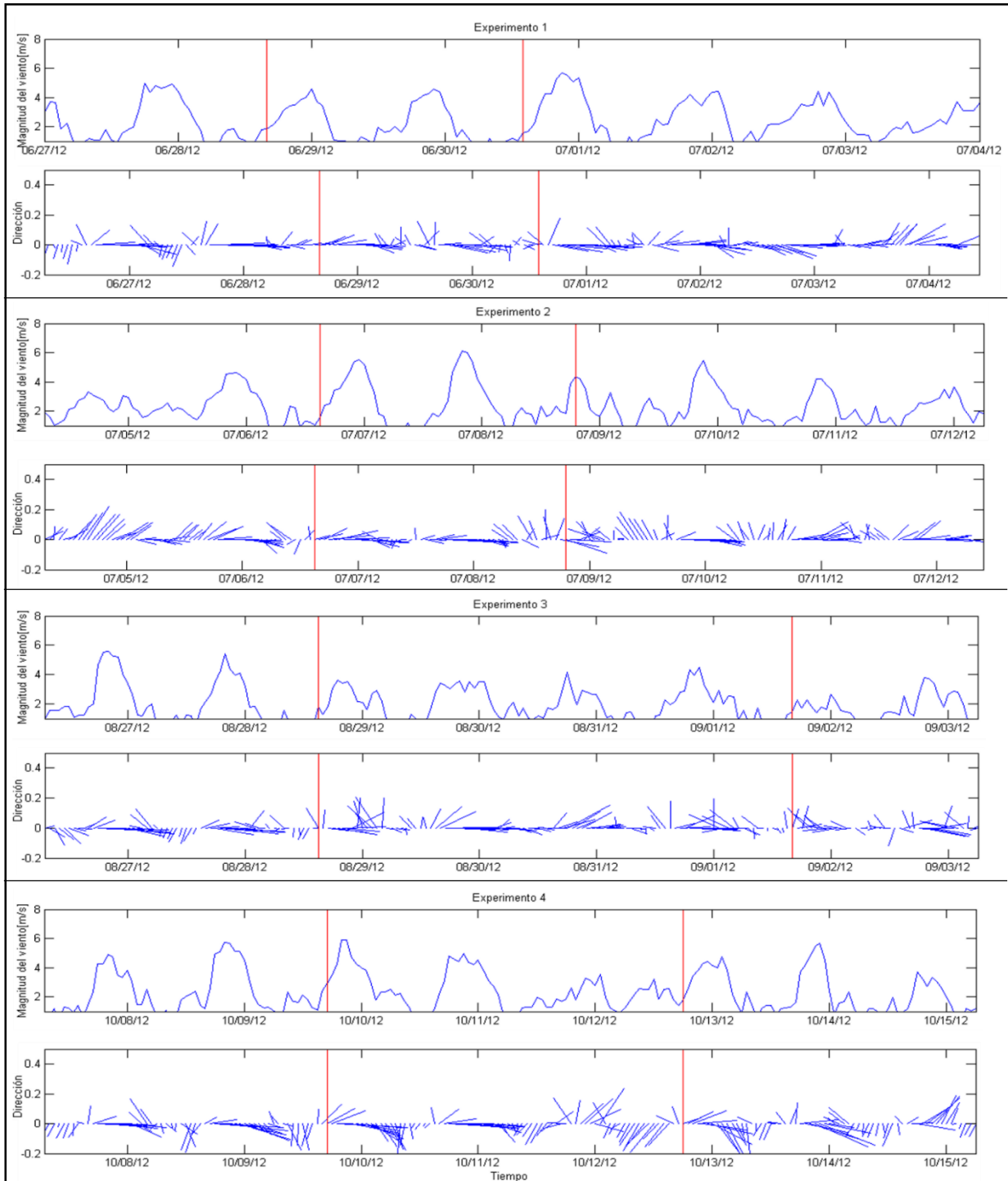


Figura 5.28 Series de tiempo de la magnitud y dirección del viento para cada experimento del año 2012 (periodo delimitado por líneas rojas).

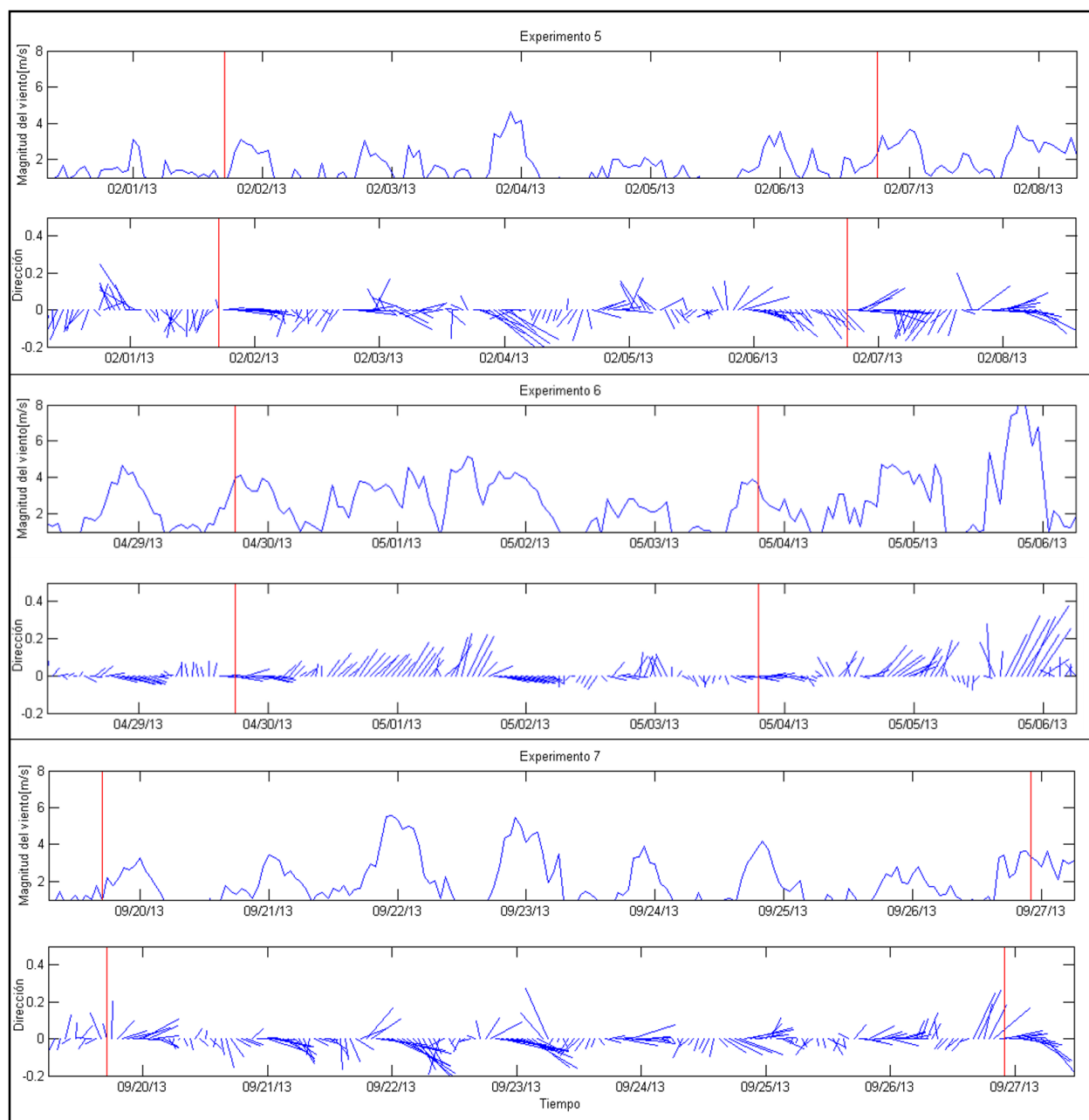


Figura 5.29 Series de tiempo de la magnitud y dirección del viento para cada experimento del año 2013 (periodo delimitado por líneas rojas).

El cambio diario notorio en la mayoría de los experimentos, tanto en dirección como en magnitud de viento, con valores máximos entre 21-23h y mínimos entre 5-12h (hora GMT), muestra nuevamente la existencia de un sistema de brisas en BTS (descrito con anterioridad en el apartado 5.1.3).

5.5 Correlación de los derivadores con el esfuerzo del viento

La comparación entre las componentes zonal o meridional de los 43 derivadores y las del esfuerzo del viento, indicaron una mayor correlación de la componente Este-Oeste con respecto a la Norte-Sur (Fig. 5.32). El 32% de las boyas presentaron coeficientes de correlación de la componente zonal moderadamente fuertes a excelentes (Martínez-Ortega *et al.*, 2009), mientras que en el caso de la componente meridional el 63% de los derivadores presento correlaciones con valores de entre 0 y 0.25 (Fig. 5.30) correspondientes a un nivel escaso o nulo de correlación (Martínez-Ortega *et al.*, 2009), cabe mencionar que de ese subtotal la correlación del 31% de las boyas, no es significativa (<0.18) de acuerdo al promedio muestral obtenido (Gómez-Biedma *et al.*, 2001).

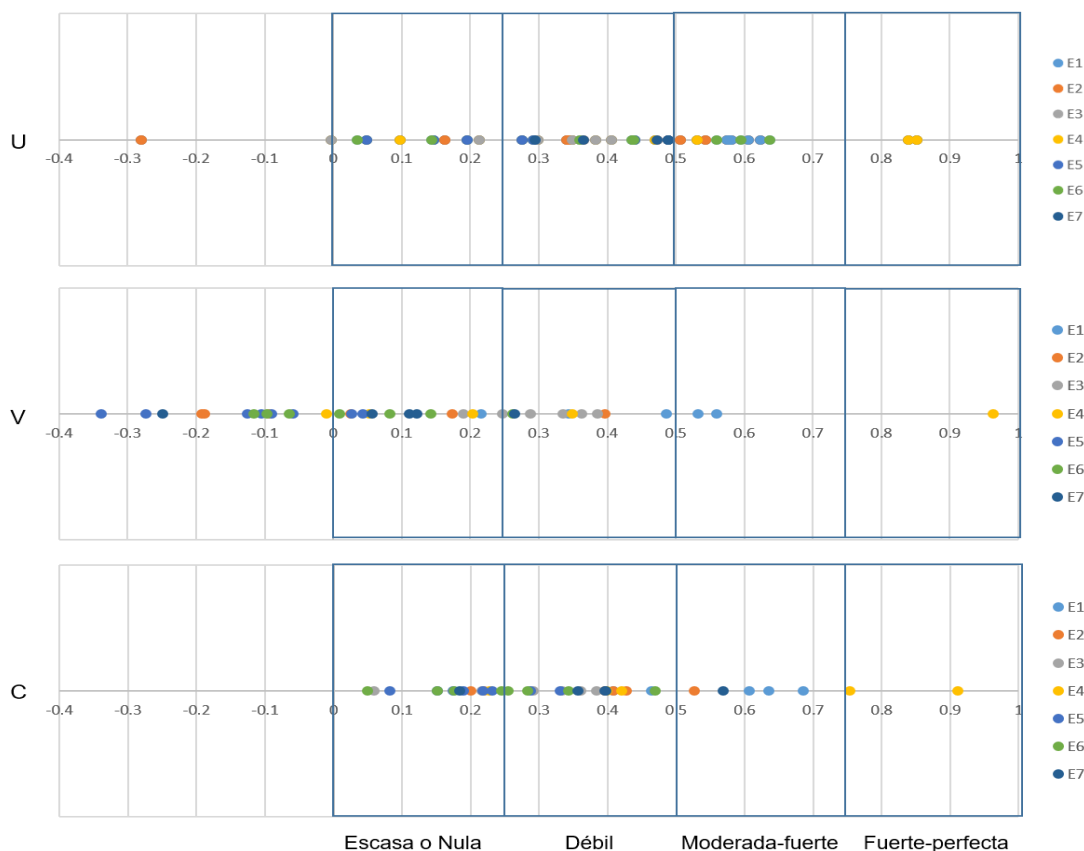


Figura 5.30 Nivel de correlación del esfuerzo del viento con respecto a la trayectoria de cada derivador para la componente zonal (U), la componente meridional (V) y la correlación vectorial compleja (C). La clasificación es independiente de si la correlación es positiva o negativa. La coloración indica el experimento de procedencia.

El coeficiente de correlación vectorial compleja promedio de los derivadores, vario entre 0.21 y 0.57 dependiendo del experimento. Esto indica que en promedio el esfuerzo del viento sólo logró explicar entre el 4 y 32% la variación los derivadores dependiendo de la serie. Los ángulos de la correlación (Fig. 5.31) variaron entre los 8° y los 160° (en promedio, 42 °), la mayoría de las series estuvo en sentido anticiclónico respecto al viento. Los experimentos con menor promedio de correlación vectorial (E3, E5, E6) coincidieron con aquellos que presentan mayor número de derivadores en sentido ciclónico con respecto al viento.

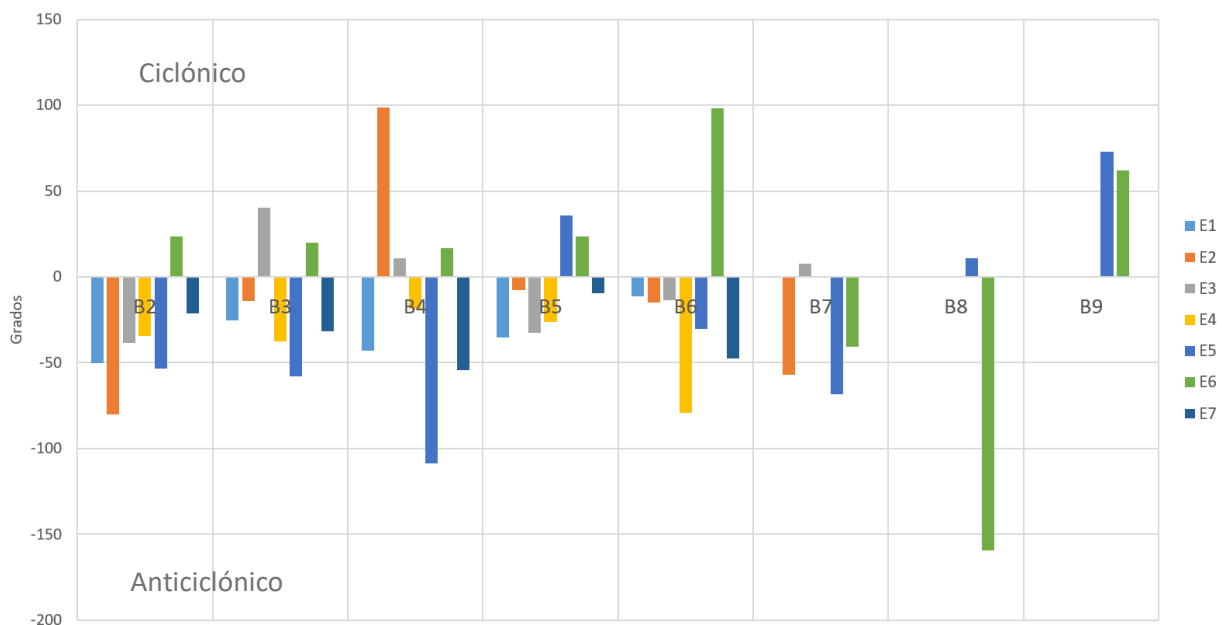


Figura 5.31 Ángulo de desfase entre el viento y los derivadores. El eje de las abscisas indica el nombre del derivador, y el color el experimento al que corresponde.

Ocho derivadores (18% con respecto al total) registraron ángulos de entre 27° y 45° grados (ángulo teórico en corrientes superficiales forzadas por viento (Gonella, 1972)) con un sentido anticiclónico y correlación débil (0.25-0.5). Estos datos coinciden con los del comportamiento de derivadores que responden al arrastre directo por el viento propuestos en la literatura (por ejemplo, Poulain *et al.* (2009), donde se espera

que en términos de dependencia lineal, en la mayoría de los casos el viento sólo explique el 30% (correlaciones de 0.5) de la variabilidad de la velocidad de las corrientes inferidas a la deriva, cuyos ángulos de giro con respecto del viento deberían oscilar entre 27 y 45° (hacia la derecha del viento).

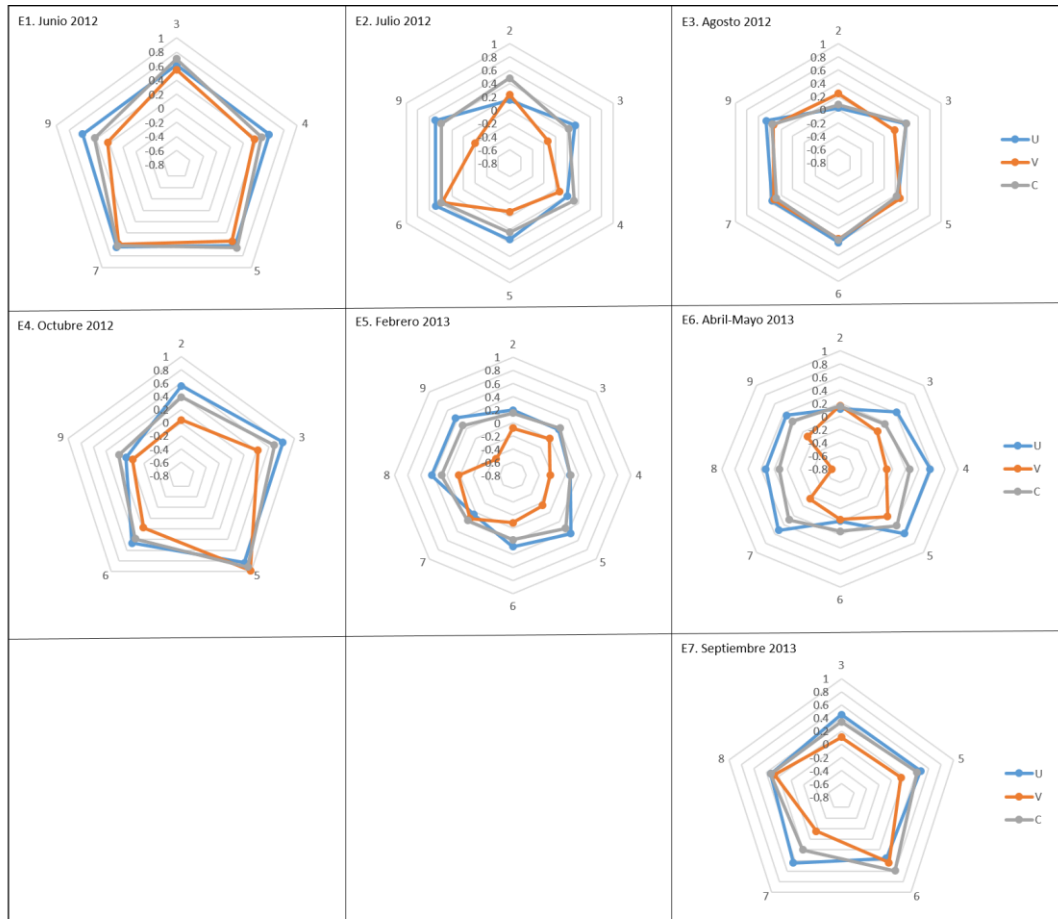


Figura 5.32 Correlación del esfuerzo del viento con respecto a la trayectoria de cada derivador para la componente zonal (U), la componente meridional (V) y la correlación vectorial compleja (C), presentados por experimento. Los vértices de cada figura indican la boya a la que corresponde el valor en ese eje.

En particular, los experimentos con mejores correlaciones, tanto de sus componentes como vectorialmente fueron el experimento 1, 2 y 7. Si se calcula la correlación vectorial compleja entre el viento y los derivadores con un retraso de tiempo para evaluar la posible demora de las corrientes con respecto al viento como forzador, la mayoría de los derivadores tienen mejores correlaciones entre 1:30 y 3h después de soplar el viento.

5.6 Influencia de la marea sobre los derivadores

Para analizar la influencia de la marea en el comportamiento de los derivadores, se hizo una comparación entre la serie de tiempo del cambio del nivel del mar y la de la magnitud de los derivadores para cada experimento (Fig. 5.33).

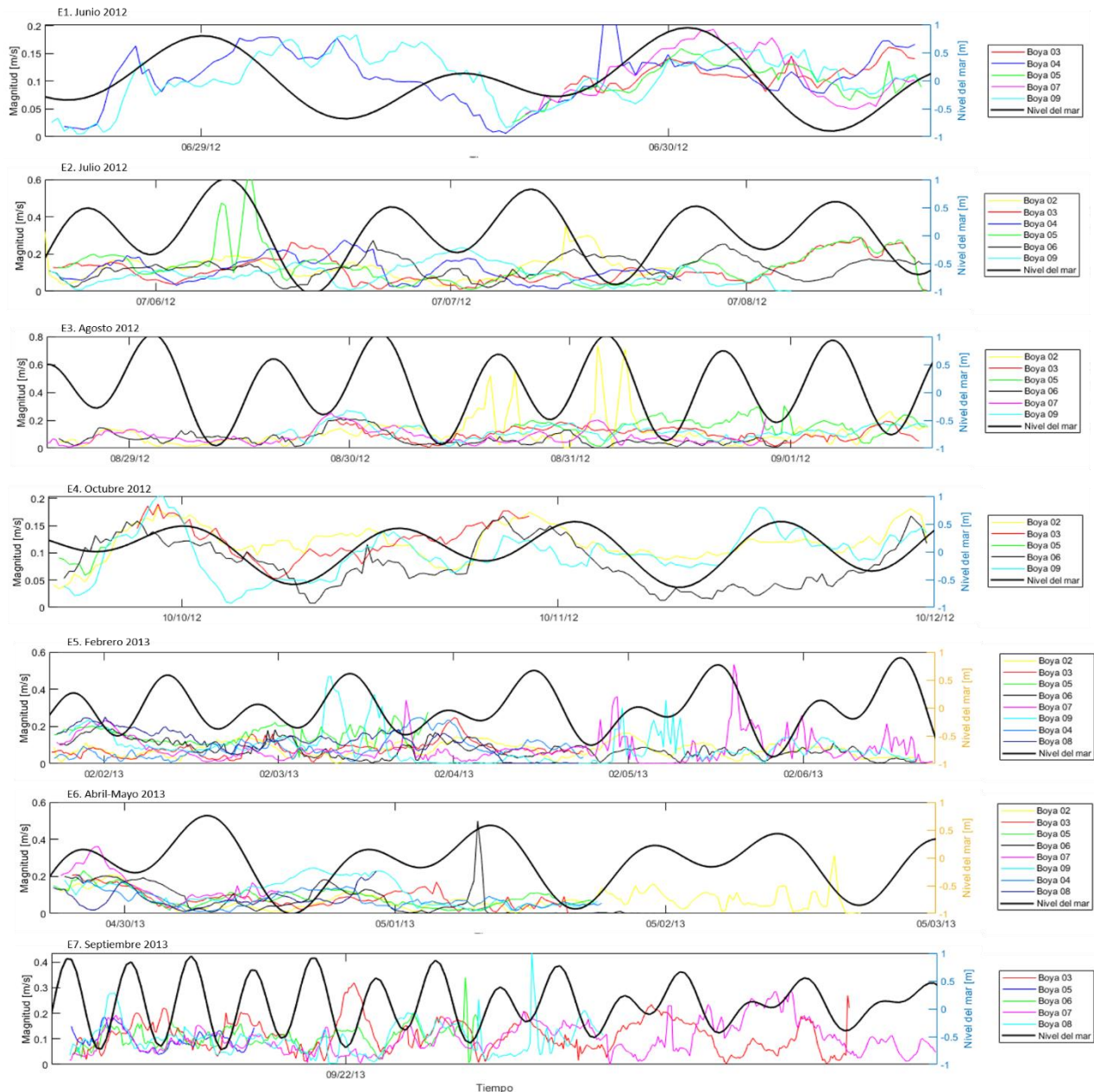


Figura 5.33 Comparación del nivel del mar con la magnitud de los derivadores para cada experimento. Eje vertical izquierdo corresponde al nivel del mar en m, el eje vertical derecho a la magnitud de la boya en ms⁻¹.

Dicha comparación mostró que en los experimentos 2, 3, 5 y 6, las magnitudes más altas no solo coincidieron temporalmente con la entrada de los derivadores al EPB (Fig. 5.12, 5.15 y 5.20), sino también con cambios entre marea alta y marea baja. En la mayoría de estos casos el derivador entra al estero cuando el nivel del mar aumenta, permanece dentro del mismo durante la marea alta, y posteriormente sale del estero cuando el nivel del mar comienza a disminuir.

Con los datos del nivel del mar utilizados en la serie de tiempo, se realizó un análisis de armónicos para conocer los principales componentes de marea durante los periodos de estudio. Con un intervalo de confianza del 95% y siendo significantes estadísticamente, las principales componentes de marea para los experimentos fueron la K_1 y la M_2 (en ese orden). Conociendo lo anterior se aplicó un ajuste de esos dos armónicos a las series de tiempo de la velocidad de los componentes meridional y zonal de algunos de los derivadores.

Las figuras 5.34 y 5.35 corresponden al ajuste armónico realizado a algunos derivadores de experimentos que obtuvieron baja correlación vectorial con el esfuerzo del viento, en ellos se puede observar que dicho ajuste explica entre el 57 y 78 % la variación de la velocidad de la componente zonal y entre 51 y 86% de la componente meridional, para esos derivadores. Tres de los cuatro derivadores presentaron una mejor bondad del ajuste para la componente Norte-Sur con respecto a la Este-Oeste.

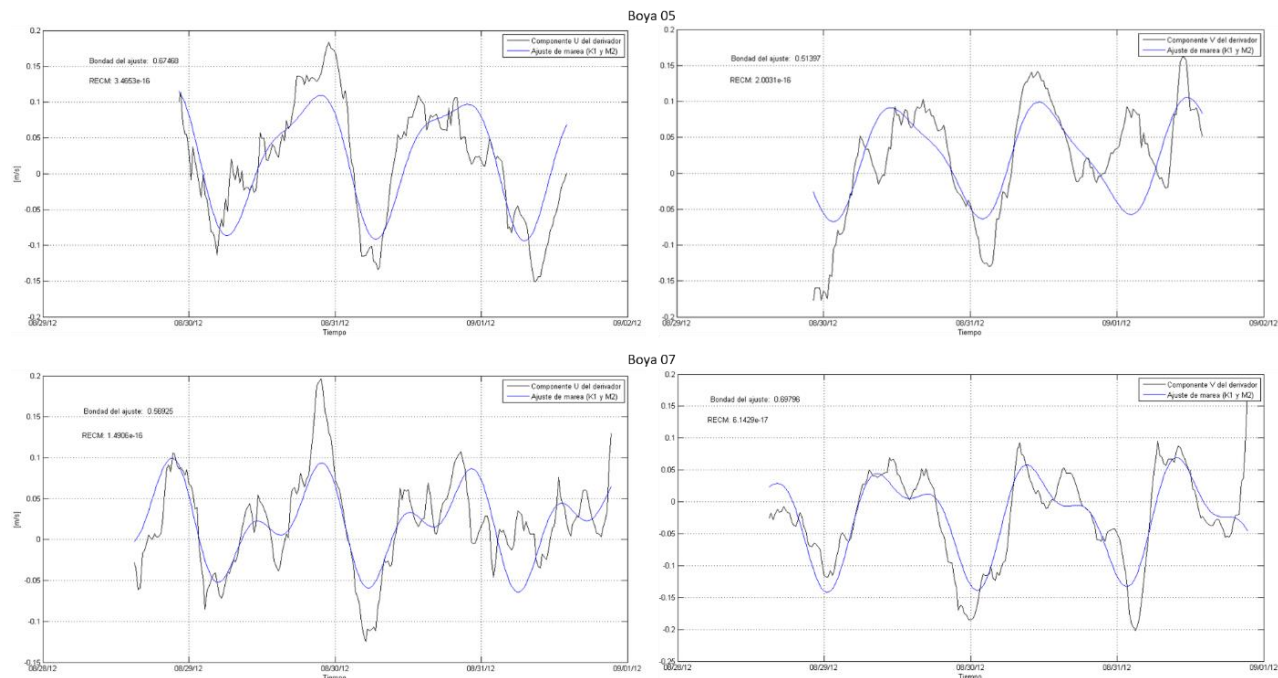


Figura 5.34 Ajuste armónico de la velocidad de las componentes zonal (izquierda) y meridional (derecha) de dos derivadores del experimento 3 (agosto de 2012) con dos componentes de marea.

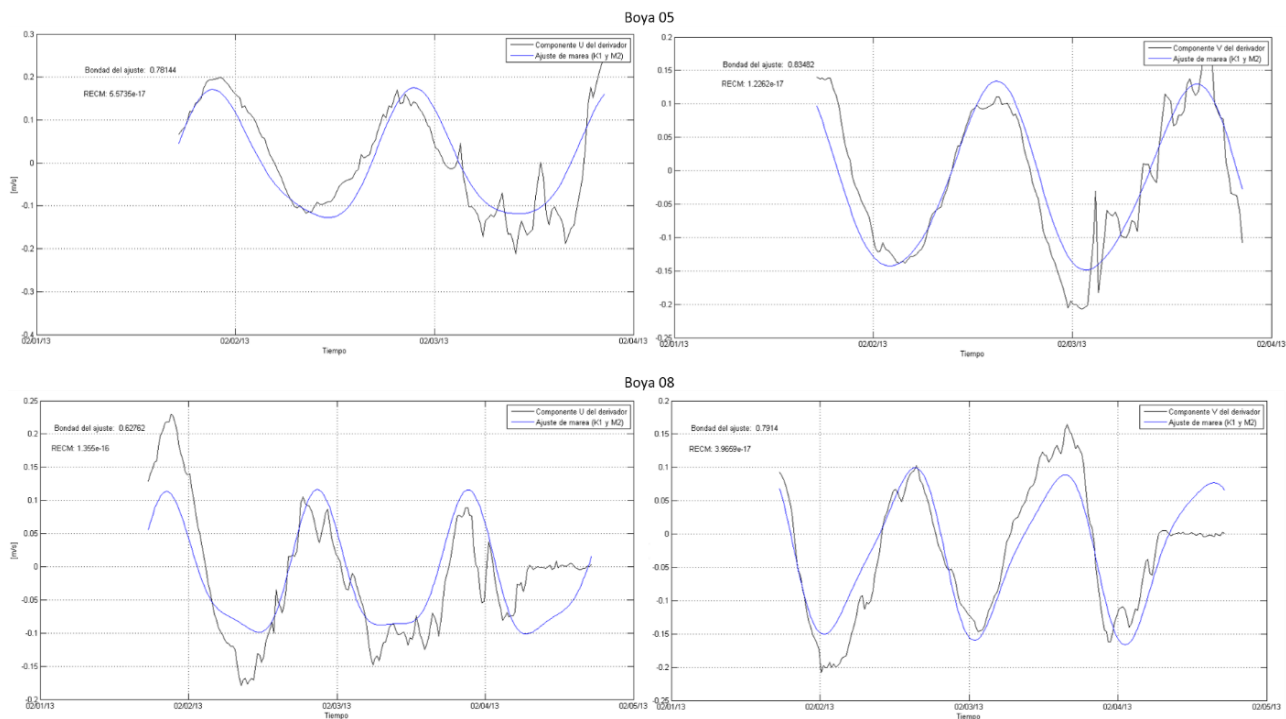


Figura 5.35 Ajuste armónico de la velocidad de las componentes zonal (izquierda) y meridional (derecha) de dos derivadores del experimento 5 (febrero de 2013) con dos componentes de marea.

El mismo ajuste armónico se aplicó a algunos derivadores del experimento 7 (Fig. 5.36). Éste experimento se caracterizó por tener la mayor duración de todos los experimentos y encontrarse dentro de los tres que presentaron mejores correlaciones con el esfuerzo del viento. Para este ajuste armónico la máxima variación de la velocidad explicada para la componente zonal fue del 39% y de 45% para la componente meridional, valores un poco más bajos que los obtenidos en los ajustes anteriores.

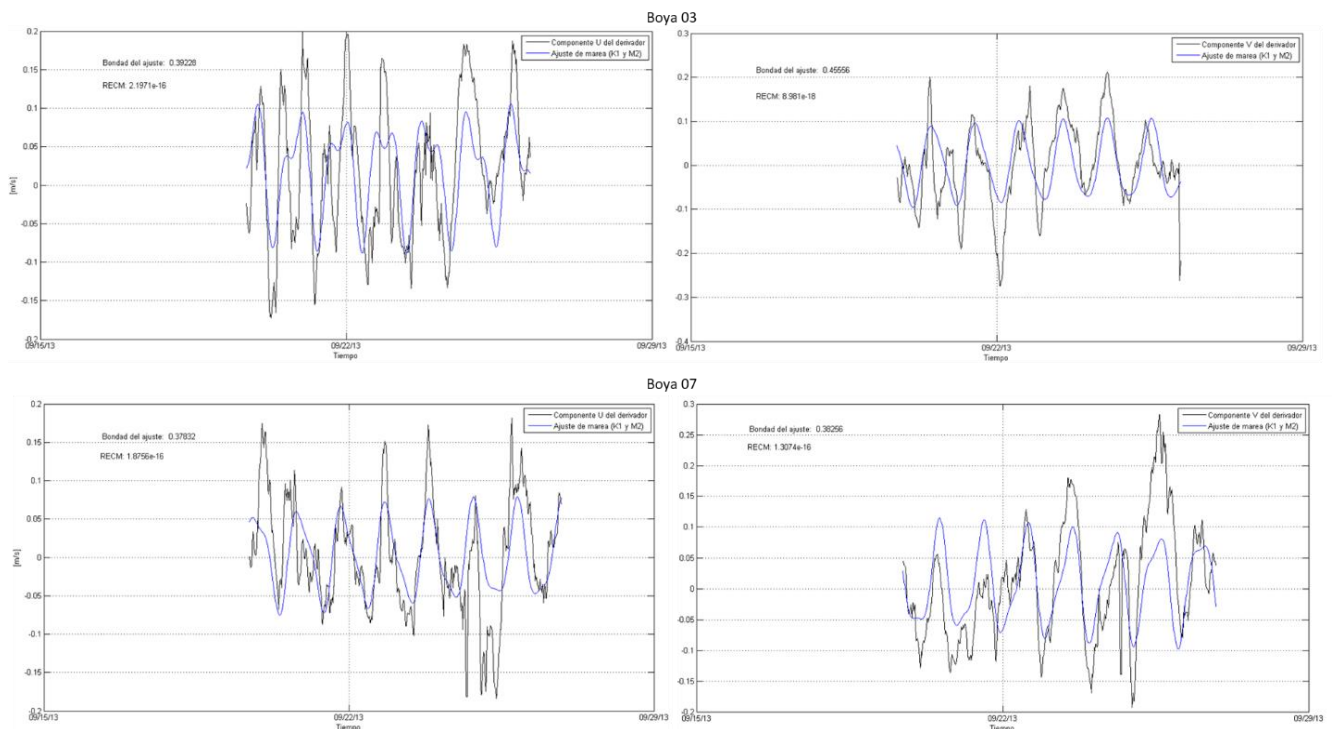


Figura 5.36 Ajuste armónico de la velocidad de las componentes zonal (izquierda) y meridional (derecha) de dos derivadores del experimento 7 (septiembre de 2013) con dos componentes de marea.

5.7 Análisis espectral

Con la finalidad de identificar que frecuencias introducen mayor energía en una serie de tiempo, fue aplicado un análisis espectral a los datos de la componente zonal del viento de la estación meteorológica, algunos derivadores y la predicción de marea mediante el método del periodograma promedio de Welch. El análisis para la componente zonal de los derivadores indicó que las bandas más energéticas presentaron periodos diurnos (24 horas) y semidiurnos (12 y 12.4 horas). Este mismo comportamiento fue registrado en el análisis espectral de los datos de viento, donde las bandas con periodos de 24 y 12 fueron las más energéticas.

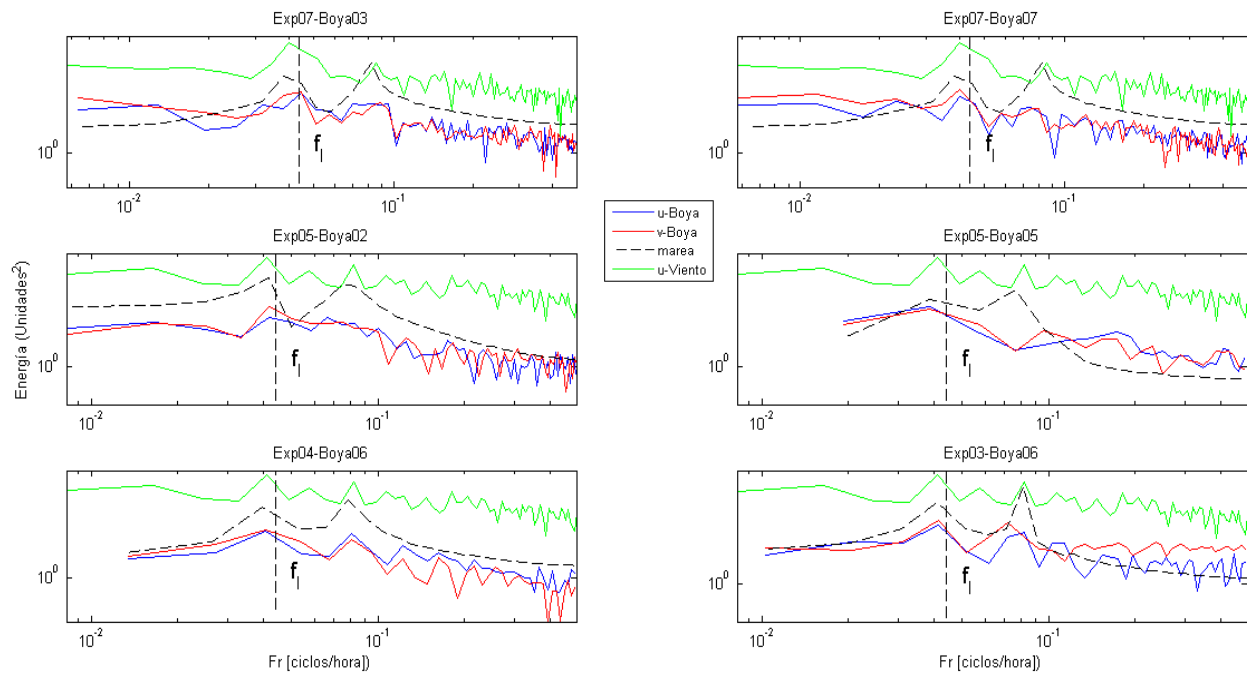


Figura 5.37 Análisis de densidad espectral para las componentes de algunos derivadores, la componente zonal del viento y la predicción de marea. La línea punteada en sentido vertical corresponde a la frecuencia del periodo inercial.

6 Discusión

6.1 Rasgos generales

En el presente trabajo, el comportamiento de las boyas de deriva mostró trayectorias con desplazamientos variables (dependiendo del mes en que se realizó el experimento), y circulares con sentido de rotación anticiclónica. En general, se observó que los derivadores que fueron liberados cerca de la barra del estero mostraron desplazamientos hacia la costa y posteriormente hacia el norte a lo largo de ella, mientras que los derivadores liberados en la parte central-norte se desplazaron al sur-sureste; uno de los experimentos que mejor describió este comportamiento fue el experimento 2. Otro de los comportamientos descritos en varios experimentos es el de los derivadores liberados en la parte central-norte después de los 116.7° W (es decir un poco más al oeste de la bahía), los cuales tendieron a desplazarse hacia el noroeste de la bahía entre el Puerto de Ensenada y Punta Morro. Algunos de los derivadores con desplazamiento cercano a la boca del Estero Punta Banda tendieron a entrar en el antes de seguir su trayectoria, lo anterior sucedió independientemente de donde fueran liberados. En los registros de velocidad de las corrientes, se observan valores promedio entre $8\text{-}10\text{ cm s}^{-1}$ y máximos de entre $20\text{ y }30\text{ cm s}^{-1}$, a excepción de los derivadores que entraron al estero ya que alcanzaron velocidades $>50\text{ cm s}^{-1}$. La duración máxima de los experimentos fue de 7 días, y no fue suficiente para que alguno de los derivadores saliera de la bahía.

El análisis espectral aplicado a algunos derivadores, mostró que las bandas más energéticas para estos presentaron periodos diurnos (24 h) y semidiurnos (12 h). En el caso del análisis espectral para la componente zonal del viento, se observó que para la estación meteorológica Punta Morro los vientos con periodicidad diurna y semidiurna son los más

energéticos (en ese orden), lo que concuerda con lo descrito por Pavía y Reyes (1983). Otras señales que presentaron oscilaciones con periodos similares fueron la marea (componente de marea K_1 con periodo de 23.93h y M_2 con periodo de 12.42 h) y los flujos inerciales (periodo de 22.77 horas).

6.2 Efecto del Viento

Los datos de viento indicaron que la Bahía Todos Santos presentó un sistema de brisas bien marcado (viento local), con vientos de mar a tierra durante el día y de tierra a mar durante la noche, como lo reportan Pares-Sierra (1981) y Reyes *et al.* (1983). Para los periodos de tiempo estudiados, la magnitud promedio del viento fue de 2 m s^{-1} con máximos de 6 m s^{-1} y provenientes principalmente del W, WSW y NW. Reyes y Pares (1983) explican que la intensidad y dirección del viento registrada por la estación meteorológica utilizada puede no ser representativo para toda la bahía, pues el viento tiende a disminuir su intensidad y desviar su dirección dependiendo de la orientación y orografía de la zona.

En general, la circulación de aire sobre la superficie del océano representa una fuerza impulsora de gran importancia, que da lugar entre otros fenómenos a corrientes originadas por el esfuerzo tangencial que este ejerce sobre el mar (Gill, 1982). Al evaluar la correlación del esfuerzo del viento sobre la trayectoria de los derivadores se observó que en la mayoría de los casos de estudio, el viento no tuvo un efecto importante sobre la circulación superficial. El coeficiente de correlación vectorial compleja promedio de los derivadores, fue entre débil y moderado (Martínez-Ortega *et al.*, 2009) dependiendo del experimento (con mínimo de 0.21 en el experimento 5 y máximo de 0.57 en el experimento 1). Esto indica que en promedio el esfuerzo del viento sólo logró explicar entre el 4 y 32% la variación de los derivadores dependiendo de la serie. Los ángulos de la correlación (Fig. 5.31) variaron entre

los 8° y los 160° (en promedio, 42 °); la mayoría de las series estuvo en sentido anticiclónico respecto al viento.

Durante los experimentos 1 y 2 que corresponden a junio y julio de 2012, la baja excentricidad de las elipses de variabilidad del viento, indicó que en comparación con el resto de los experimentos los vientos en esos periodos de tiempo fueron más intensos y persistentes en dirección (W, WNW) durante la mayor parte del día (Fig. 5.7 y 5.26), lo que de acuerdo con Reyes y Parés (1983) puede deberse a la presencia de viento sinóptico intenso (figura 5.3), pues según los autores su presencia puede provocar modificaciones sobre el viento local tanto en dirección como en magnitud. Estos experimentos en conjunto con el periodo de estudio 7 (septiembre de 2013), presentaron magnitudes del viento de entre 4.5-6 m s⁻¹ y sus correlaciones promedio fueron de 0.35, 0.37 y 0.55 respectivamente, las mejores para los 7 casos de estudio. Dentro de estos experimentos se encontraron la mayoría de los derivadores que registraron ángulos de desfase con respecto del viento de entre 27° y 45° grados (ángulo teórico en corrientes superficiales forzadas por viento (Gonella, 1972)). Estos datos coinciden con los del comportamiento de derivadores que responden al arrastre directo por el viento propuestos en la literatura por autores como Poulain *et al.* (2009), donde se espera que en términos de dependencia lineal, en la mayoría de los casos el viento sólo explique el 30% (correlaciones de 0.5) de la variabilidad de la velocidad de las corrientes inferidas a la deriva, y cuyos ángulos de giro con respecto del viento deberían oscilar entre 27 y 45° (hacia la derecha del viento). Así mismo la rapidez promedio de los derivadores en esos experimentos (entre 10.5 y 11.8 cm s⁻¹) coincide con las velocidades teóricas de las corrientes de deriva en respuesta de viento con intensidad de entre 4 y 6 m s⁻¹ propuestas por Álvarez-Sánchez (1971). Durazo-Arvizu (1983) y Álvarez-

Sánchez (1971) describen en condiciones de viento similares tanto en dirección como magnitud a las presentes durante los experimentos 1 y 2, patrones de circulación que concuerdan con los observados en los en esos periodos de estudio (Fig. 5.8 y 5.10), en los que la parte norte de la bahía muestra una corriente de deriva hacia el interior de la misma paralelo a la costa en dirección sureste y la parte sur corrientes directas hacia la costa, seguido por trayectorias regulares a lo largo de ella en dirección a la boca del estero.

En ausencia de viento de intensidades moderadas los patrones de circulación descritos por los derivadores fueron más irregulares y con mayor influencia de la parte norte de la bahía. Estas condiciones se observaron en los experimentos 5 y 3, llevados a cabo durante febrero de 2013 y agosto-septiembre de 2012. Estos experimentos se caracterizaron por presentar bajas intensidades de vientos (promedio de entre 2 y 3 m s⁻¹) provenientes del W y WSW, así como los menores promedios de correlación vectorial (E3, E5) y coincidieron con ser periodos de estudio que presentan mayor número de derivadores con ángulos de desfase en sentido ciclónico con respecto al viento, contrario a lo esperado para el hemisferio norte (Gill, 1982), por lo que la influencia del viento no estuvo bien definida. La alta correlación con el esfuerzo del viento en meses de verano y baja en la mayor parte de la bahía en los meses de otoño-invierno cuando la variabilidad del viento aumenta, también fue reportada por Larrañaga-Fu (2013), quien menciona que la coherencia del viento con las corrientes superficiales no es homogénea en la bahía en ninguno de los dos casos.

Del cálculo de la correlación vectorial compleja entre el viento y los derivadores con un retraso de tiempo para evaluar la posible demora de las corrientes con respecto a éste como forzador, la mayoría de los derivadores tienen mejores correlaciones entre 1:30 y 3h después de soplar el viento, lo anterior, al igual que la presencia de ángulos de desfase entre

el viento y los derivadores menor a 27° podría deberse de acuerdo con Poulain *et al.* (2009) a la influencia del elemento de arrastre de los derivadores.

6.3 Influencia de la marea y flujos inerciales.

La comparación entre la serie de tiempo del cambio del nivel del mar y la de la magnitud de los derivadores para cada experimento, mostró que en los periodos de estudio 2, 3, 5 y 6, las magnitudes más altas coincidieron temporalmente con cambios entre marea alta y marea baja y estos a su vez con la entrada de algunos de los derivadores al EPB (Fig. 5.12, 5.15 y 5.20). En la mayoría de estos casos el derivador entra al estero cuando el nivel del mar aumenta, permanece dentro del mismo durante la marea alta, y posteriormente sale del estero cuando el nivel del mar comienza a disminuir. La rapidez máxima para la serie de tiempo de estos derivadores se registró al salir del estero con velocidades $>50 \text{ m s}^{-1}$, la influencia en la trayectoria de las boyas debido a ese cambio de magnitud fue de hasta 4.4km.

El ajuste armónico con los principales armónicos de marea (K_1 y M_2) realizado a las componentes de algunos derivadores (similar al propuesto por autores como Poulain (2013) y Flores-Vidal *et al.* (2015)) pertenecientes a experimentos que obtuvieron baja correlación vectorial con el esfuerzo del viento como el 3 y el 5, mostraron que dicho ajuste explica entre el 57 y 78 % la variación de la velocidad de la componente zonal y entre 51 y 86% de la componente meridional (Fig. 5.34 y 5.35). El mismo ajuste armónico realizado a derivadores pertenecientes al experimento 7 (con condiciones de viento opuestas a la de los experimentos 3 y 5) manifestó que la máxima variación de la velocidad explicada para la componente zonal fue del 39% y de 45% para la componente meridional, valores un poco más bajos que los obtenidos en los ajustes anteriores, pero más altos que los obtenidos en

las correlaciones vectoriales con el esfuerzo del viento. Lo anterior sugirió que para los periodos de estudio probablemente la marea jugó un papel importante en la circulación de la bahía, sobre todo cuando la intensidad del viento es baja. Es importante mencionar que al igual que el viento y de acuerdo con lo reportado por Flores-Vidal *et al.* (2015) la bahía presenta zonas con mayor influencia de marea que otras, de acuerdo con el autor estas áreas son la zona cercana a la boca del estero punta banda y la parte noroeste de la bahía cercana a Punta Morro.

Como se mencionó con anterioridad, otro de los posibles forzadores de las trayectorias descritas por los derivadores de acuerdo al análisis espectral, son los flujos inerciales (22.7h para el área de estudio). Sin embargo, de acuerdo con la bibliografía (Flores-Vidal *et al.* (2015)) el tamaño y forma semicerrada de la BTS hacen de los procesos inerciales no sean detectados en la circulación superficial de la bahía, lo que coincide con los periodos registrados para las trayectorias cerradas de muchos de los derivadores, cuyos valores variaron entre 11 y 18h en la mayoría de los casos.

6.4 Circulación superficial

El comportamiento general de los derivadores junto con el análisis de los datos proporcionados por los radares HF, mostraron que existe un flujo predominante hacia el interior de la bahía, con corrientes más intensas en la región oeste y más débiles en la región este, con excepción de la zona entre el Puerto de Ensenada y Punta Morro en algunos de los experimentos. Del mismo modo se observó que de los datos diarios de Reanálisis de la temperatura superficial GHR SST -MUR (Fig. 5.1 y 5.2) los valores máximos de la temperatura se encontraron en la región este, principalmente en las zonas cercanas al Puerto de Ensenada, así como el Estero Punta Banda que aunque no puede observarse en las imágenes

por la escala de la bahía, ha sido reportado en la bibliografía repetidas ocasiones (Cruz-Colín, 1997; Larrañaga-Fu, 2013). Estas dos zonas coincidieron con aquellas que presentaron mayor concentración de los derivadores, lo que sugiere que el agua permanece mayor tiempo en esas zonas; en la primera de estas áreas de acuerdo a las imágenes del radar podría deberse a que en la mayoría de los experimentos presenta corrientes de baja intensidad, y la segunda a las características morfológicas del cuerpo costero y su interacción con la marea.

Las trayectorias de las boyas sugieren 3 patrones principales en la circulación, el primero de ellos indica que existe un flujo que entra por la región noroeste de la bahía con dirección al sureste, el cual cambia su dirección hacia el suroeste paralelo al Estero de Punta Banda por efecto de la morfología costera. El segundo de los comportamientos muestra flujos provenientes de la región suroeste en dirección hacia la costa y posteriormente hacia el norte a lo largo de ella. El último patrón registrado por algunas boyas (Fig. 10.1 a 10.6, Anexo) pero observado con mayor facilidad de los datos del radar HF, fue el de un flujo del suroeste que pasan por la parte central de la bahía hacia el Puerto de Ensenada y pareciera ser producto de la interacción de un remolino ciclónico en la región noreste y un remolino anticiclónico al este de la región central de la bahía frente a Playa Hermosa y el Estero de Punta Banda (figura 5.25). La presencia de remolinos ha sido señalada por otros autores como Larrañaga-Fu (2013) y Mateos *et al.* (2013), sin embargo para este estudio el corto periodo de los experimentos hace que sean poco visibles con imágenes promedio de los radares HF.

7 Conclusión

Los patrones descritos por los derivadores liberados en BTS, mostraron trayectorias con desplazamientos variables y circulares de periodos menores al inercial (entre 11-18h

aproximadamente) y predominancia de circulación anticiclónica. Los derivadores que fueron liberados cerca de la barra del estero mostraron desplazamientos hacia la costa y posteriormente hacia el norte a lo largo de ella, mientras que los derivadores liberados en la parte central-norte se desplazaron al sur-sureste. Las velocidades promedio de las corrientes estimadas con los derivadores fueron de entre 8 y 10 cm s⁻¹.

En general la circulación superficial de la BTS estuvo aparentemente “aislada”, con flujos predominantes hacia el interior de la bahía en la región de PB y PM, así como características de circulación anticiclónica y periodos de permanencia dentro de la bahía de al menos 7 días, con zonas de concentración de partículas en el Puerto de Ensenada y el Estero Punta Banda. Para los periodos de estudio, la marea jugó un papel importante en la circulación de la bahía, sobre todo cuando la intensidad del viento es baja y en zonas cercanas al estero, donde los cambios de marea desviaron las trayectorias de los derivadores hacia el interior del estero y produjeron cambios drásticos en la magnitud de sus desplazamientos (rapidez >50 cm s⁻¹), sobre todo en el cambio de marea alta a marea baja donde la influencia del estero expulso los derivadores hasta 4.4km hacia el interior de la bahía. En periodos con viento de intensidad moderada (4-6m s⁻¹) la influencia del viento sobre la circulación superficial aparento ser predominante.

8 Recomendaciones

La información presentada en este trabajo no es concluyente para afirmar el efecto e importancia del viento en la circulación superficial de la bahía durante todo el año, puesto que los periodos de estudio son cortos y no representativos de ninguna estacionalidad. Con el fin de evaluar mejor la influencia del viento en la circulación superficial, se recomienda el uso de datos de otra estación meteorológica dentro de la bahía para propósitos comparativos, el filtro de los periodos semidiurnos del viento y las boyas para determinar la influencia de las brisas en las corrientes dentro de la bahía y la realización de espectros rotacionales. Así mismo se reconoce la limitación de los radares de alta frecuencia para identificar claramente los patrones cercanos a la costa debido a la configuración de su arreglo y de remolinos por la duración de los periodos estudiados, por lo que nuevamente se sugiere experimentos de mayor duración.

9 Referencias

- Álvarez-Sánchez L. G. 1971. Medición de corrientes superficiales en la Bahía de Todos Santos B.C. Tesis de licenciatura en Oceanografía, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California.
- Álvarez-Sánchez G., 1977. Vientos en la Bahía de Todos Santos, Baja California. *Ciencias Marinas*, 4: 81-89.
- Álvarez-Sánchez G., Hernández R., Durazo R., 1998. Patrones de deriva de trazadores Lagrangeanos en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*. 14 (4):135e62. Universidad Autónoma de Baja California.
- Argote-Espinoza M., Amador-Buenrostro A. y Morales-Zúñiga C. 1975. Distribución de los parámetros de salinidad, temperatura y tendencias de la circulación en la Bahía de Todos Santos, B.C. *CIBCASIO*. 2, 3-30.
- Argote-Espinoza, M.L., Gavidia-Medina, F.J., Amador-Buenrostro, A., 1991. Wind-induced circulation in Todos Santos bay, B.C., Mexico. *Atmósfera* 4, 101–115.
- Martínez-Ortega R. M., Tuya-Pendás L. C., Martínez-Ortega M., Pérez-Abreu A. & Cánovas A. 2009. EL COEFICIENTE DE CORRELACION DE LOS RANGOS DE SPEARMAN CARACTERIZACION. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2).
- Cardona-Díaz L., 2015. Estudio de la corriente superficial en Canarias mediante el seguimiento de boyas de deriva. Tesis de Doctorado en Física, Geología y Climatología, Universidad de las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria.
- Castro, R., Martínez, A., 2010. Variabilidad espacial y temporal del campo de viento frente a la península de Baja California. In: Gaxiola-Castro, G., Durazo, R. (Eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico Frente a Baja California, 1997–2007*. Instituto Nacional de Ecología—CICESE, Mexico (504 pp.).
- Castro R., Pares-Sierra A., Marinone G., 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.
- Cervantes-Audelo, I.G., 2013. Análisis de Circulación y Dispersión en la Bahía de Todos Santos, Baja California. Universidad del Mar, Tesis de Maestría en Ecología Marina, Universidad del Mar, Puerto Ángel, Oaxaca.
- Consejo De Desarrollo Económico De Ensenada (CODEEN), Instituto Municipal De Investigación Y Planeación De Ensenada B.C. (IMIP) 2011 .Plan Estratégico De Desarrollo Económico Del Municipio De Ensenada (PEDEME).
- Crombie, D. D., 1955. Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s. *Nature*. 175, 681-682.

- Cruz-Colín M. 1997. Variabilidad de temperatura del mar en la Bahía de Todos Santos, B.C., México. Tesis de licenciatura en Oceanografía, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California.
- Cupul-Magaña L., Cruz-Colín M., 1997. Erosión y aporte sedimentario de los cantiles marinos de la bahía de todos santos, Baja California, en el periodo de 1970 a 1991. Revista Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. 23(3), 303-315.
- Durazo-Arvizu R., 1983. Circulación superficial y cinemática de la región Sur de la Bahía de Todos Santos, B. C. Tesis de licenciatura en Oceanografía, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California.
- Durazo-Arvizu R. 2003. Protocolo de propuesta SEMARNAT, 02MAC. Sometida a curso del fondo Sectorial SEMARNAT-CONACyT, junio 2001.
- Emery, J. W., Thompson, R. E. 1998. Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Pergamon. 634 pp.
- Fisher, R.A. 1958. Statistical Methods for Research Workers, 13th Ed., Hafner.
- Flores-Vidal, X., R. Durazo, C. Chavanne, P. Flament, 2011. Coastal circulation in the absence of wind in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: High-frequency radar observations. Ciencias Marinas. 37, 493-512.
- Flores-Vidal X., Durazo, R. Castro, R., Navarro, F., Dominguez, F., Gil-Silva E., 2015. Fine-Scale Tidal and Subtidal Variability of an Upwelling-Influenced Bay as Measured by the Mexican High Frequency Radar Observing System. Chapter 12 (210-228) in the Book: Coastal Observation System. Edit. Lui Y., Kerkering H., Weisberg H. Academic Press Elsevier. ISBN: 978-0-12-802022-7.
- Flores-Vidal X., González-Montes S., Zertuche-Chanes R., Rodríguez-Padilla I., Marti C., Imberger J., Mejía-Trejo A., Durazo-Arvizu R., Navarro-Olache L. 2018. Three-dimensional exchange flows in a semi-enclosed bay: Numerical simulations and high frequency radar observations. Estuarine, Coastal and Shelf Science 210 (2018) 26–35
- Gallagher B., Larsen J., Lecuanda R., Cabrera R., Granados J., Nishikawa K. 1965. Medición de corrientes producidas por marea en el puerto de Ensenada Baja California. Trabajo presentado en el II Congreso Nacional de Oceanografía México (no publicado).
- Gavidia F. 1988. Simulación numérica de la circulación barotrópica en la Bahía de Todos Santos, Baja California. Tesis de Maestría, CICESE
- Gill A. E., 1982. Atmosphere-Ocean Dynamics. International Geophysics Series, Academic Press, Inc. Orlando, Florida. Pp. 23-31
- Gómez-Biedma, S., Vivó, M., & Soria, E.. (2001). Pruebas de significación en Bioestadística. Revista de Diagnóstico Biológico, 50(4), 207-218.

- Gonella, J., 1972. A rotary-component method for analysing meteorological and oceanographic vector time series. *Deep-Sea Res.*, 19, 833–846.
- Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO). 1967. Estudio oceanológico de la Bahía de Todos Santos, parte I. Trabajo presentado en el III Congreso Nacional de Oceanografía México. Escuela Superior de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California.
- Kundu, P.J. 1976. Ekman Veering Observed near the Ocean Bottom. *J Phys. Oceanogr*, 6, 238-242.
- Larrañaga-Fu, M. 2013. Variabilidad de la Circulación Superficial de la Bahía Todos Santos, Baja California, México, Universidad Autónoma de Baja California, Tesis de Licenciatura en Oceanología: 81 pp.
- Lipa B, Barrick D. 1977. Ocean surface features observed by HF coastal ground-wave field measurements. En *Ocean Wave Climate*. Earl M. D. y Malahoff (Eds.) Plenum, Nueva York. Pp. 129-132.
- Mancilla M., Martínez G. 1991. Variación estacional de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en la bahía de Todos Santos, B.C., México (marzo 1986 a Junio 1987). Ensenada B.C., México, *Rev. Inv. Cient.* 2(2).
- Mateos E, S.G. Marinone, M.F. Lavin. 2013. Numerical Modeling of the coastal circulation off northern Baja California and southern California. In: *Continental Shelf Research*: 58, 50-66.
- Mateos, E., Marinone, S.G., Parés-Sierra, A., 2009. Towards the numerical simulation of the summer circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, B.C. Mexico. *Ocean Model.* 27, 107–112.
- Murray S. P., 1975. Trajectories and speeds of wind-driven currents near the coast. *Journal Phys. Ocean.* 5:347-360.
- Pacific Gyre. 2019. Microstar GPS drifter data sheet. Recuperado el 19 de Marzo de 2019 del sitio web: <https://www.pacificgyre.com/microstar-gps-drifter.aspx>.
- Paduan J. y Graber H. 1997. Introduction to high-frequency radar: reality and myth. *Oceanography*, 10, 36-39
- Parés-Sierra, A., 1981. Análisis de componentes principales de los vientos superficiales sobre la Bahía Todos Santos. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. Tesis de licenciatura, 45 pp.
- Pavía, E., Reyes S., 1983. Variaciones espaciales y estacionales del viento superficial en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas.* 9, 151-167.
- Pawlowicz, R., Beardsley B., and Lentz S. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE, *Comput. Geosci.*, 28(8), 929–937.

- Pendón G. 2017. La costa de Huelva: Una introducción a los procesos y productos sedimentarios. Universidad de Huelva. Huelva, España.
- Poulain, P., Gerin R., Mauri E., y Pennel R. 2009. Wind Effects on Drogued and Undrogued Drifters in the Eastern Mediterranean. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 26: 1144-1156.
- Poulain P. 2013. Tidal currents in the Adriatic as measured by surface drifters *J. Geophys. Res.* 118: 1434-44
- Prandle D. 1991. A new view of near-shore dynamics based on observations from HF radar. *Progress in Oceanography*, 27, 403-438.
- Reyes S., Pares A., 1983. Análisis de componentes principales de los vientos superficiales sobre la Bahía de Todos Santos. *Geofísica Internacional* 22(2): 179-203.
- Reyes, S., Vogel G., Pavía E., Parés A., 1983. Synoptic effects on the local winds in Todos Santos Bay: A case study. *Monthly Weather Review*. 111, 1494-1500.
- Sosa-Hernández G. 2004. Características de la circulación en la zona costera entre playitas y punta morro tesis para obtener el título de Oceanólogo en la Universidad autónoma de Baja California.
- Trenberth, K., W. Large y J. Olson, 1990. The Mean Annual Cycle in Global Ocean Wind Stress. *J. Phys. Oceanogr.* 20: 1742-1760. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1990\)020<1742:TMACIG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1990)020<1742:TMACIG>2.0.CO;2)
- Ulanski S. 2012 La corriente del Golfo: La increíble historia del río que cruza el mar. Turner publicaciones. Madrid, España.

10 Anexo

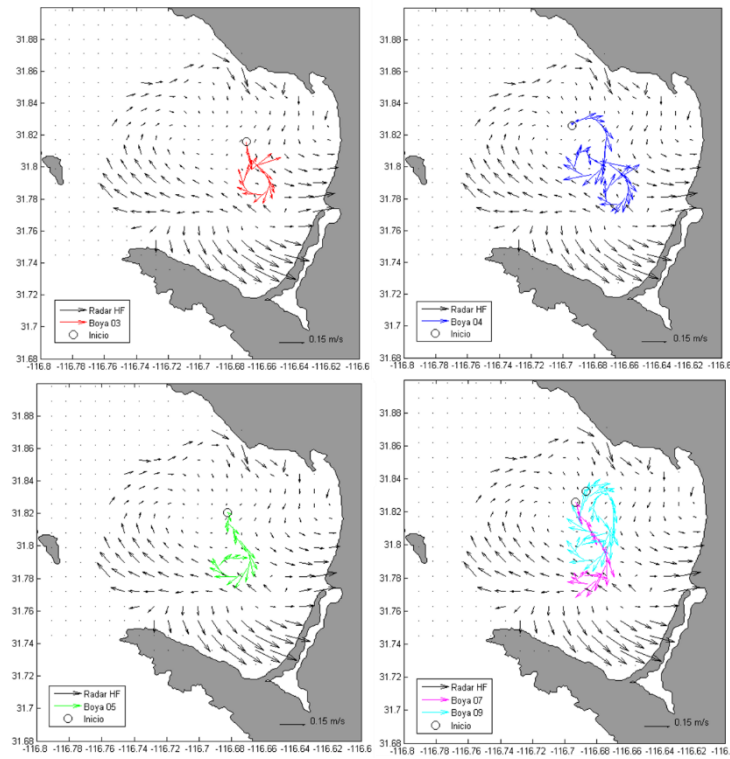


Figura 10.1 Corrientes superficiales promedio y trayectoria de las boyas durante el experimento 1.

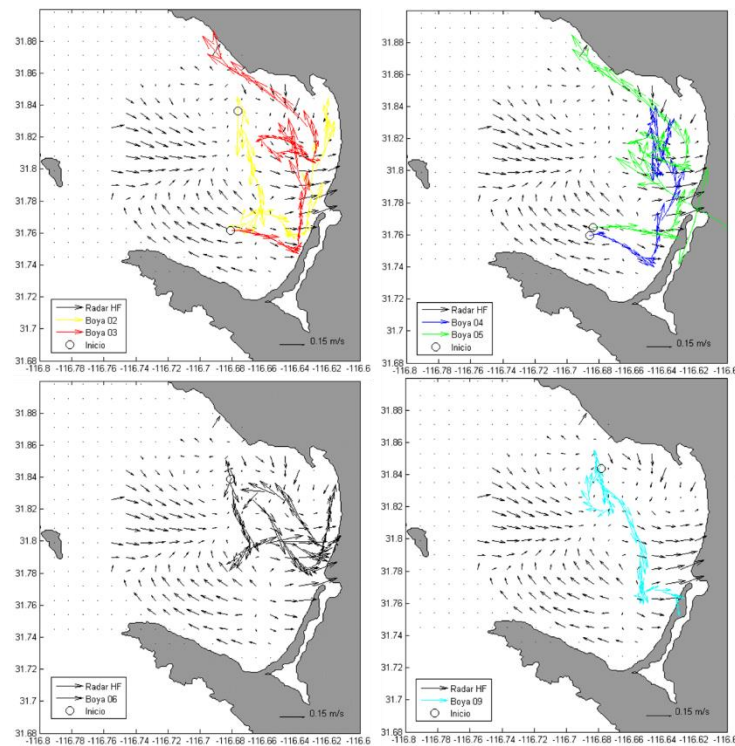


Figura 10.2 Corrientes superficiales promedio y trayectoria de las boyas durante el experimento 2.

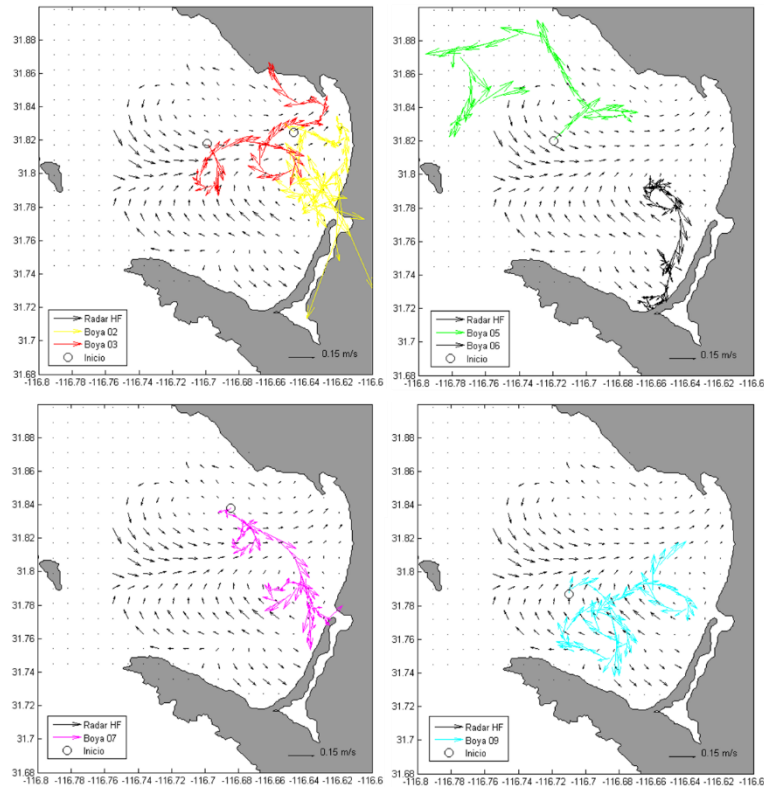


Figura 10.3 Corrientes superficiales promedio y trayectoria de las boyas durante el experimento 3.

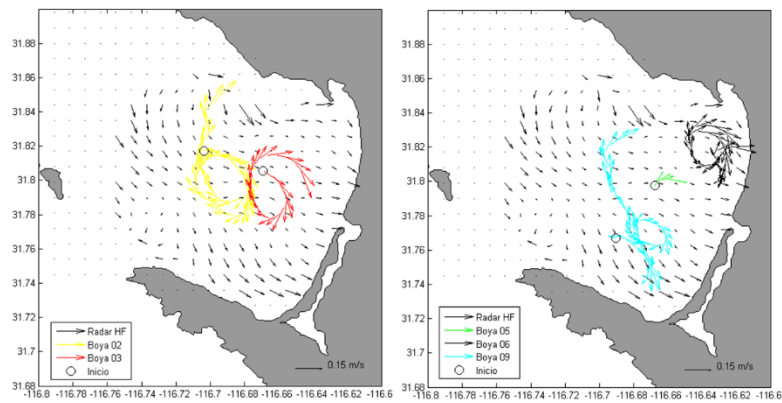


Figura 10.4 Corrientes superficiales promedio y trayectoria de las boyas durante el experimento 4.

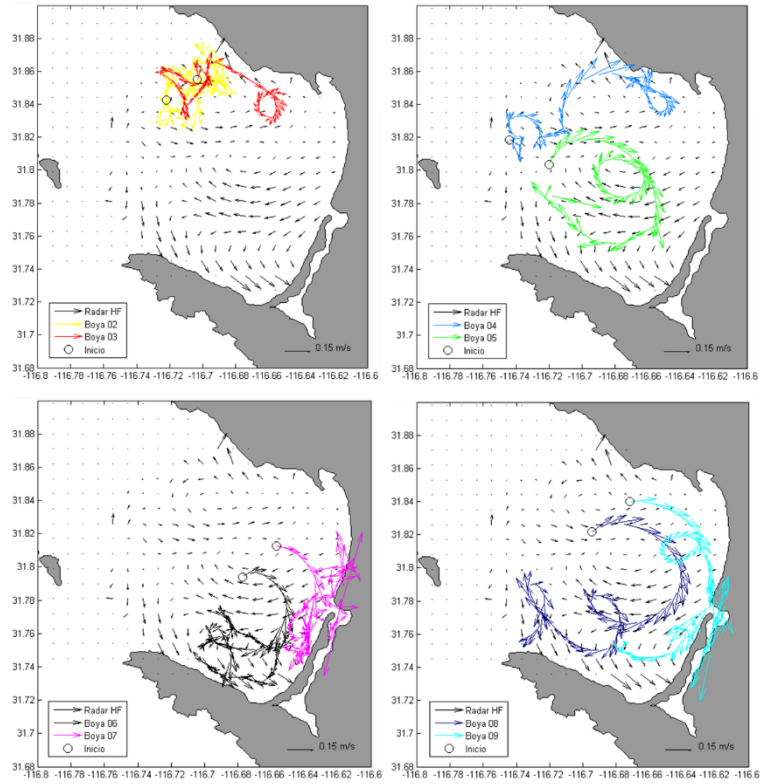


Figura 10.5 Corrientes superficiales promedio y trayectoria de las boyas durante el experimento 5.

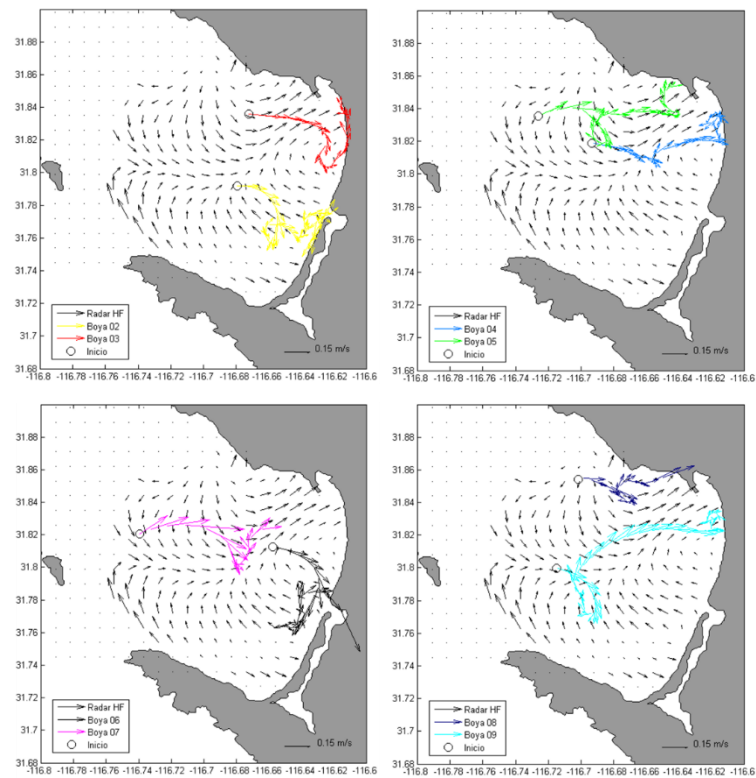


Figura 10.6 Corrientes superficiales promedio y trayectoria de las boyas durante el experimento 6.