



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



VARIABILIDAD DE LA CIRCULACIÓN SUPERFICIAL EN LA BAHÍA TODOS SANTOS, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

TESIS

que para obtener el título de:

OCEANÓLOGO

Presenta:

Marco Jesús Larrañaga Fu

Ensenada, B.C., México

Agosto del 2013

RESUMEN

La variabilidad de la dinámica y variables oceanográficas de las bahías semicerradas son afectadas tanto por la configuración de la batimetría y la línea de costa, como por el efecto de procesos locales y remotos generados por el viento, la marea y otros forzantes. Para comprender la dinámica superficial de la Bahía Todos Santos, se utilizó un arreglo de 2 estaciones de radares de alta frecuencia (CODAR - 25 Mhz) con los que se obtuvieron 144 nodos con datos horarios de la dirección y magnitud de corrientes superficiales a lo largo del año 2010. Adicionalmente se utilizaron datos horarios de una estación meteorológica AANDERAA y datos de reanálisis nivel 4 de la temperatura superficial del mar. Análisis promedio y de elipses de variabilidad tanto del viento y las corrientes superficiales mostraron similitudes en cuanto al comportamiento estacional, con mayor variabilidad durante la estación de invierno y menor variabilidad para la estación de verano. Un análisis espectral mostró que los procesos con periodicidad diurna son los que generaron mayor variabilidad en el comportamiento del viento y la circulación superficial, seguido de los procesos con periodicidad semidiurna. Análisis de coherencias y correlaciones vectoriales entre el viento y las corrientes superficiales mostraron covarianzas significativas en los procesos con periodicidad diurna. Estos resultados indicaron una fuerte influencia del viento de alto y bajo periodo sobre la dinámica superficial de la bahía. Se extrajeron las corrientes de marea de los datos de las corrientes superficiales mediante un ajuste armónico basado en las frecuencias de los principales constituyentes de la marea astronómica, para posteriormente comparar su variabilidad con la de las corrientes totales. Los resultados mostraron que las regiones de la bahía que fueron más afectadas por los procesos de marea son las que se encontraron en las zonas someras entre el Puerto de Ensenada y la barra del Estero de Punta Banda, con $\sim 5\%$ de la variabilidad explicada por la marea, mientras que en la zona de la boca del Estero de Punta Banda la variabilidad explicada por

la marea fue de $\sim 12\%$. Por último se proponen esquemas de circulación estacionales para invierno y verano.

Palabras clave: *corrientes superficiales, viento, marea, variabilidad, radares de alta frecuencia.*

DEDICATORIA

*A mis padres, Marco y Aida
A mis hermanas Aida y Tania*

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Reginaldo Durazo por su amistad, por haberme guiado a lo largo de la realización de este trabajo y por estarme carrerando para terminar ya con esta etapa de mi educación. Por sus consejos tanto de carácter académico como personal. Muchas gracias.

Al Dr. Rubén Castro, quien me mostró el gusto por la Oceanografía Física. Gracias por los comentarios y sugerencias con respecto a este trabajo.

Al Dr. Xavier flores por sus amistad y la ayuda brindada durante el desarrollo de esta tesis.

A la Profesora Patricia Alvarado, gracias por nunca dejarme caer, sin ella nunca habría llegado hasta aquí.

Al Dr. Modesto Ortiz y la Dra. Paula Brunius de CICESE por su ayuda con los análisis espectrales.

A los integrantes del Grupo de Oleaje de CICESE por sus comentarios, aclaraciones y sugerencias durante el desarrollo de este trabajo.

A todos los compañeros y colegas que se atravesaron a lo largo del camino.

A los Profesores, personal administrativo y demás trabajadores de la Facultad de Ciencias Marinas.

Al proyecto CONACYT "Estudio de clasificación de playas: Bahía de Ensenada, Baja California".

Al proyecto interno UABC "Circulación estacional en la Bahía de Todos Santos B.C.", clave 401\1\C\89\17.

VARIABILIDAD DE LA CIRCULACIÓN SUPERFICIAL DE LA BAHÍA TODOS SANTOS,
ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

TESIS
QUE PRESENTA:
MARCO JESÚS LARRAÑAGA FU

Aprobada por:

Presidente del Jurado
Dr. Reginaldo Durazo Arvizu

Sinodal Propietario
Dr. Rubén Castro Valdez

Sinodal Propietario
Dr. Xavier Flores Vidal

ÍNDICE

1	Introducción	1
2	Objetivos	2
3	Área de estudio	2
4	Antecedentes	4
5	Descripción de los datos	7
6	Métodos de análisis	10
6.1	Día típico	10
6.2	Elipses de variabilidad	10
6.3	Correlación vectorial	12
6.4	Análisis espectral y coherencia	13
6.5	Análisis armónico	14
7	Resultados	15
7.1	Viento	15
7.1.1	Promedios y elipses de variabilidad	17
7.1.2	Análisis espectral	22
7.2	Circulación superficial	23
7.2.1	Circulación promedio	23
7.2.2	Elipses de variabilidad	35
7.2.3	Análisis espectral y coherencia	42

7.2.4	Efecto del sistema de brisas y viento sinóptico sobre la variabilidad diurna de la circulación superficial	46
7.2.5	Correlación vectorial entre el viento y las corrientes superficiales	51
7.2.6	Análisis armónico	55
8	Discusión	56
8.1	Viento	56
8.2	Corrientes superficiales	57
9	Conclusiones	63
10	REFERENCIAS	65

FIGURAS

3.1	Bahía Todos Santos. Los tonos de color indican la batimetría. Los recuadros azules indican la posición de los radares de alta frecuencia, el recuadro rojo muestra la posición de la estación meteorológica y los puntos color negro representan la posición geográfica donde se cuenta con registros de temperatura superficial.	3
5.1	Cobertura temporal de los datos del año 2010 utilizados en este trabajo.	7
5.2	Ejemplo del espectro Doppler medido por un radar de alta frecuencia modificado de Lipa y Barrick 1983.	8
5.3	Cobertura espacial de los datos generados por los radares de alta frecuencia. La barra de colores indica el porcentaje de cobertura temporal de cada nodo. Los círculos muestran los nodos que cuentan con un mínimo del 75 % de datos.	9
7.1	Representación de un día típico de las componentes del viento para cada mes del año 2010.	16
7.2	Elipses de variabilidad y vector promedio del año 2010 y las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño de los datos de viento de la estación meteorológica.	18
7.3	Elipses de variabilidad y vector promedio de la estación de invierno y los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre del año 2010 de los datos de viento de la estación meteorológica.	21
7.4	Elipses de variabilidad y vector promedio de la estación de verano y los meses de junio, julio, agosto y septiembre del año 2010 de los datos de viento de la estación meteorológica.	22
7.5	Análisis espectral de los datos de viento durante el año 2010. La línea color rojo representa a los procesos con sentido de rotación a favor de las manecillas del reloj, mientras que la línea color negro a los procesos con sentido en contra de las manecillas del reloj.	23
7.6	Corrientes y temperatura superficial promedio anual para la Bahía Todos Santos durante el año 2010.	24

7.7	Circulación y temperatura superficial promedio para el invierno (enero, febrero, marzo y diciembre) del año 2010,. La escala de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.	25
7.8	Circulación y temperatura superficial promedio para el mes de febrero del año 2010. La escala de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.	26
7.9	Circulación y temperatura superficial promedio para el mes de marzo del año 2010. La escala de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.	27
7.10	Circulación y temperatura superficial promedio para el mes de diciembre del año 2010. La escala de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.	28
7.11	Corrientes y temperatura superficial promedio para la estación de primavera del año 2010, compuesta por los meses de abril y mayo. La barra de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.	29
7.12	Circulación y temperatura superficial promedio para la estación de verano del año 2010, compuesta por los meses de junio, julio, agosto y septiembre. La barra de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.	30
7.13	Circulación y temperatura superficial promedio para el mes de agosto del año 2010. La barra de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.	31
7.14	Circulación y temperatura superficial promedio para el mes de septiembre del año 2010. La barra de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.	32
7.15	Circulación y temperatura superficial promedio para la estación de otoño, compuesta solo por el mes de octubre del año 2010. La barra de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.	33
7.16	Circulación y temperatura superficial promedio para el mes de noviembre del año 2010. La barra de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.	34

7.17	Regiones en las que fue dividida la Bahía Todos Santos para el análisis de las elipses de variabilidad de las corrientes superficiales.	36
7.18	Elipses de variabilidad para las corrientes superficiales para el año 2010. La barra de colores representa a la magnitud de la corriente superficial en cada nodo normalizada con la desviación estándar de su eje de máxima variabilidad. Los vectores color negro representan la dirección de las corrientes superficiales.	38
7.19	Elipses de variabilidad de las corrientes superficiales totales para la estación de invierno del año 2010, compuesta por los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre. La barra de colores representa a la magnitud de la corriente superficial en cada nodo normalizada con la desviación estándar de su eje de máxima variabilidad. Los vectores color negro representan la dirección de las corrientes superficiales.	39
7.20	Elipses de variabilidad de las corrientes superficiales totales para la estación de verano del año 2010, compuesta por los meses de junio, julio, agosto y septiembre. La barra de colores representa a la magnitud de la corriente superficial en cada nodo normalizada con la desviación estándar de su eje de máxima variabilidad. Los vectores color negro representan la dirección de las corrientes superficiales.	40
7.21	Densidad espectral de potencia para las corrientes superficiales. La línea color roja indica corrientes con sentido de rotación a favor de las manecillas del reloj, la línea negra indica un sentido de rotación en contra de las manecillas del reloj.	42
7.22	Coherencia espectral entre los espectros rotacionales del viento y las corrientes superficiales. La línea roja indica un sentido de rotación a favor de las manecillas del reloj, la línea negra indica un sentido de rotación en contra de las manecillas del reloj. La línea color negro representa al límite de confianza del 95%.	43

7.23	Variabilidad espacial de la coherencia con sentido de rotación ciclónico entre los espectros rotacionales del viento y las corrientes superficiales con periodicidad diurna. Los puntos color negro muestran la posición de los nodos de las corrientes superficiales. La línea color negro en la barra de colores muestra el límite de significancia.	44
7.24	Variabilidad espacial de la coherencia con sentido de rotación anticiclónico entre los espectros rotacionales del viento y las corrientes superficiales con periodicidad diurna. Los puntos color negro muestran la posición de los nodos de las corrientes superficiales. La línea color negro en la barra de colores muestra el límite de significancia.	45
7.25	Representación de viento y corrientes superficiales típicas del mes de enero a las 16:00 horas. . . .	47
7.26	Representación de viento y corrientes superficiales típicas del mes de agosto a las 16:00 horas. . . .	48
7.27	Representación de viento y corrientes superficiales típicas del mes de enero a las 02:00 horas. . . .	49
7.28	Representación de viento y corrientes superficiales típicas del mes de agosto a las 04:00 horas. . . .	50
7.29	Correlación vectorial estacional entre el viento y las corrientes superficiales para el año 2010. La barra de colores indica el coeficiente de la correlación vectorial. Los puntos color negro muestran la posición de los nodos de las corrientes superficiales.	52
7.30	Correlación vectorial estacional entre el viento y las corrientes superficiales para la estación de invierno durante el año 2010. La barra de colores indica el coeficiente de la correlación vectorial. Los puntos color negro muestran la posición de los nodos de las corrientes superficiales.	53
7.31	Correlación vectorial estacional entre el viento y las corrientes superficiales para la estación de verano durante el año 2010. La barra de colores indica el coeficiente de la correlación vectorial. Los puntos color negro muestran la posición de los nodos de las corrientes superficiales.	54

7.32 Porcentaje de la variabilidad de la corriente superficial explicada por la marea para el año 2010.

La barra de colores indica el porcentaje de la variabilidad total de la circulación superficial que es explicada por la corriente de marea. Los contornos color negro hacen referencia a la batimetría de

la bahía (m). Los puntos color negro muestran la posición de los nodos de las corrientes superficiales. 56

8.33 Patrón de circulación propuesto para la circulación superficial en la Bahía Todos Santos para el

verano 60

8.34 Patrón de circulación propuesto para la circulación superficial en la Bahía Todos Santos para el

invierno 61

TABLAS

I	Meses que componen las diferentes estaciones del año 2010.	17
II	Parámetros de las elipses de variabilidad y vectores promedio del viento para las diferentes estaciones del año 2010. Mag y Dir son la magnitud y dirección promedio del viento, S_u es el eje de mayor variabilidad, S_v el eje de menor variabilidad, β es la relación entre la magnitud promedio del viento y la desviación estándar del semieje mayor de la elipse, π indica la excentricidad de la elipse y θ el ángulo de inclinación.	20
III	Parámetros de las elipses de variabilidad y vectores promedio de la corriente superficial para cada región de la bahía durante las diferentes estaciones del año 2010. Mag representa a la magnitud promedio de la corriente superficial, S_u es el eje de mayor variabilidad, S_v el eje de menor variabilidad, β es la relación entre magnitud promedio de la corriente superficial con respecto a la desviación estándar del eje de mayor variabilidad, π indica la excentricidad de la elipse y θ el ángulo de inclinación.	41

1 Introducción

Los patrones de circulación y distribución de la temperatura, salinidad y otras variables oceanográficas presentan una alta variabilidad en el océano abierto, generada principalmente por procesos de escala planetaria y mesoescala. Del mismo modo, los parámetros oceanográficos son altamente variables en las bahías semicerradas, aunque esta variabilidad se presenta en un espacio reducido y es influenciada tanto por la configuración de la batimetría y la línea de costa, como por el efecto de procesos locales y remotos generados por el viento, la marea y otros forzantes.

La Bahía Todos Santos es una bahía semicerrada cuya economía depende principalmente del comercio marítimo y el turismo. Actividades como la engorda o el cultivo de peces y moluscos se llevan a cabo dentro de la bahía. Es esencial tener conocimiento de la dinámica marina de la zona y de los mecanismos que la generan. Esto con la finalidad de prevenir o anticipar contingencias ambientales generadas por descargas residuales, procesos biológicos o eventos climáticos extremos. De esta forma es posible generar un ambiente con óptimo desarrollo económico y ecológico.

Los primeros estudios de la dinámica superficial de la bahía se realizaron a partir de 1970, los cuales consistieron en experimentos esporádicos con boyas de deriva y con duración de algunos días. Posteriormente se utilizaron modelos numéricos con la finalidad de proponer diversos patrones de circulación superficial por viento, marea y la interacción de la corriente de California. A pesar de los esfuerzos realizados, no se han establecido patrones de circulación superficial dentro de la bahía.

Para entender la dinámica superficial de la Bahía Todos Santos es necesario identificar y caracterizar los forzamientos que dominan sobre su comportamiento en las diferentes escalas

espacio-temporales que se presentan, para de esta manera evaluar la variabilidad que generan sobre la circulación superficial. En este trabajo se utiliza un arreglo de 2 radares de alta frecuencia CODAR (25 MHz), mediante los cuales fue posible generar datos horarios de la dirección y magnitud de las corrientes superficiales para el año 2010, sobre una malla de 190 km² y una resolución espacial de 1 km. Por otra parte se utilizan datos horarios de viento de una estación meteorológica tipo AANDERAA ubicada en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) y datos diarios de reanálisis nivel 4 de temperatura superficial del mar.

2 Objetivos

- Caracterizar la variabilidad estacional de las corrientes superficiales en la Bahía de Todos Santos, Baja California.
- Identificar los principales forzantes, tanto locales como remotos, de la variabilidad encontrada.

3 Área de estudio

La Bahía Todos Santos (figura 3.1) se localiza en la región noroccidental del estado de Baja California, entre las latitudes 31° 42' y 31° 52' norte (N) y las longitudes 116° 48' y 116° 36' oeste (W). Es un cuerpo de agua semicerrado con un área aproximada de ~260 km². Se encuentra limitada al noroeste (NW) por Punta San Miguel, al suroeste (SW) por Punta Banda y al W por las Islas Todos Santos. La mayor parte de la batimetría de la bahía presenta una pendiente suave, con profundidades de hasta 50 m. Entre las Islas Todos Santos y la Península de Punta Banda se encuentra un cañón submarino, el cual sobrepasa los 400 m de profundidad.

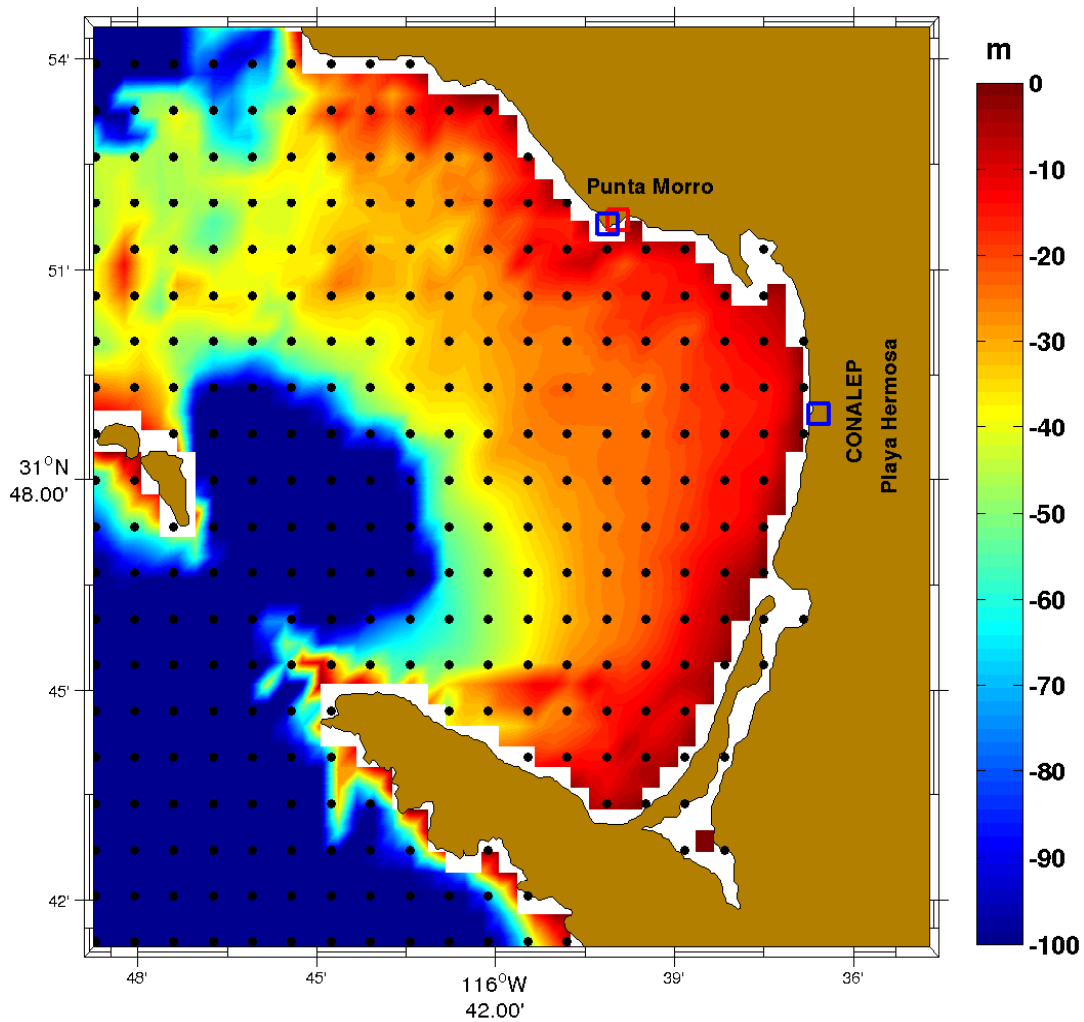


Figura 3.1: Bahía Todos Santos. Los tonos de color indican la batimetría. Los recuadros azules indican la posición de los radares de alta frecuencia, el recuadro rojo muestra la posición de la estación meteorológica y los puntos color negro representan la posición geográfica donde se cuenta con registros de temperatura superficial.

Las características termohalinas del agua en la Bahía Todos Santos corresponden primordialmente a la influencia de la Corriente de California por un intercambio de agua en la región NW de la bahía, entre Punta San Miguel y las Islas Todos Santos, y la región sureste (SE), entre las Islas Todos Santos y la Península de Punta Banda (figura 3.1). La Corriente de California transporta agua del Subártico con dirección al Ecuador, y se caracteriza por presentar agua con baja temperatura, baja salinidad, una alta concentración de oxígeno disuelto y valores de densidad entre los 24.5 y 25.5 kg/m^3 (Lynn y Simpson 1987). La velocidad promedio con la que se desplaza en la superficie es de 20 cms^{-1} (Lynn y Simpson 1987).

Los vientos que interactúan en la región presentan velocidades promedio de $\sim 4 \text{ ms}^{-1}$ con una dirección predominante del noreste (NE; Álvarez-Sánchez 1977, Castro y Martínez 2010). Estos vientos se encuentran fuertemente influenciados por el centro de alta presión localizado en el Océano Pacífico y un centro de baja presión al NE de Baja California (Reid *et al.* 1958), cuya variabilidad espacio-temporal genera cambios estacionales en la dirección y magnitud del viento (Álvarez-Sánchez 1977, Castro y Martínez 2010).

La bahía presenta un sistema de brisas bien marcado, con vientos de mar a tierra durante el día, y vientos de menor intensidad de tierra a mar durante la noche (Álvarez-Sánchez 1977, Parés-Sierra 1981, Reyes *et al.* 1983, Castro y Martínez 2010). Entre los meses de octubre y marzo se presentan eventos esporádicos de vientos de tierra hacia el mar de corta duración (2 - 3 días) con baja humedad y alta temperatura denominados vientos Santa Ana (Álvarez-Sánchez 1977, Trasviña *et al.* 2003, Sosa-Ávalos *et al.* 2004, Castro *et al.* 2006).

4 Antecedentes

Los primeros estudios que tuvieron como objetivo el describir la dinámica de la circulación superficial para la Bahía Todos Santos, fueron realizados en 1970 mediante observaciones directas de la corriente superficial por medio de boyas de deriva (Álvarez-Sánchez *et al.* 1988). Álvarez-Sánchez (1971) propuso que las mareas, el viento y las corrientes que existen a lo largo de las costas de Baja California son las variables que dominan sobre el comportamiento de las corrientes locales. Estudios posteriores mostraron que la batimetría puede modificar la dirección y magnitud de las corrientes por efectos friccionales del fondo y la costa.

Estudios con trazadores Lagrangeanos realizados entre 1980 y 1986 para dilucidar un patrón de circulación promedio 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.

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 y Álvarez-Sánchez 1988), 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.

Durante la década de los ochenta, el auge de los equipos de cómputo incrementó el uso de modelos numéricos con la finalidad de reproducir y estudiar el comportamiento de los procesos meteorológicos y oceanográficos. Argote y colaboradores (1991), utilizaron un modelo de circulación barotrópico en dos dimensiones alimentado con datos de viento representativo para invierno, verano y eventos Santa Ana. Los autores reprodujeron patrones de circulación generados por efecto del esfuerzo del viento, y reportaron una marcada influencia de la batimetría sobre las corrientes a lo largo de la línea de costa. Para las simulaciones numéricas de verano con vientos del NW, W y N, el modelo mostró un flujo costero de Punta San Miguel hacia dentro de la bahía. En el caso del invierno con vientos del S y SW, se mostró un flujo costero de la Península de Punta Banda hacia el interior de la bahía, lo que forma una zona de convergencia entre el Puerto de Ensenada y el

Estero de Punta Banda.

Recientemente, los resultados de un modelo tridimensional baroclínico de nueva generación, ROMS (Regional Ocean Modeling System; Mateos *et al.* 2009), forzado con datos del Sistema de la Corriente de California y viento sinóptico, reprodujo variaciones de los patrones de circulación de la bahía y su interacción con la Corriente de California. En los experimentos numéricos se identificaron vórtices ciclónicos y anticiclónicos en la parte norte y la región central de la bahía respectivamente. Los resultados de las simulaciones numéricas para el mes de febrero, mostraron un remolino anticiclónico en la zona entre Punta San Miguel y Punta Morro con velocidades menores a 10 cms^{-1} , y un remolino ciclónico frente al Puerto de Ensenada, lo que formó una zona de convergencia frente a Punta Morro (Mateos *et al.* 2009). En las simulaciones del mes de mayo, se reportó una corriente intensa ($\sim 20 \text{ cms}^{-1}$) que entró a la bahía por la boca norte (cerca de las Islas Todos Santos) y salió por la boca sur. Así mismo, los autores reportaron una corriente débil con dirección anticiclónica frente a Punta Morro y un remolino ciclónico de baja intensidad frente al Estero de Punta Banda. Los resultados del mes de agosto mostraron un flujo hacia dentro de la bahía por la boca norte y un vórtice ciclónico que cubrió la mayor parte de la bahía (Mateos *et al.* 2009).

A pesar de los esfuerzos observacionales y numéricos realizados para caracterizar la variabilidad de la circulación en la Bahía Todos Santos, los resultados no han sido suficientes para establecer con claridad los patrones de la circulación superficial, o para precisar cuáles son los principales agentes que influyen sobre la misma. Los datos existentes sólo muestran el comportamiento de las corrientes en algunas regiones de la bahía, con mediciones en periodos cortos de tiempo, o simulados numéricamente.

En este trabajo se utilizan datos de corrientes superficiales que cubren la mayor parte de la bahía, medidas con radares de alta frecuencia a lo largo de un año. El análisis de los datos que se presenta a continuación pretende caracterizar los patrones de circulación superficial y su variabilidad espacio-temporal, así como los mecanismos físicos que generan dichos patrones.

5 Descripción de los datos

Los datos utilizados para el estudio de la variabilidad de la circulación superficial y sus forzantes dentro de la Bahía Todos Santos (BTS), corresponden a mediciones horarias de la corriente superficial con una resolución espacial de alrededor de 1 km (figura 3.1). Estos datos fueron obtenidos a partir de un arreglo de 2 radares de alta frecuencia CODAR (<http://www.codar.com>) de 25 MHz, instalados en las estaciones Punta Morro y CONALEP (figura 3.1).

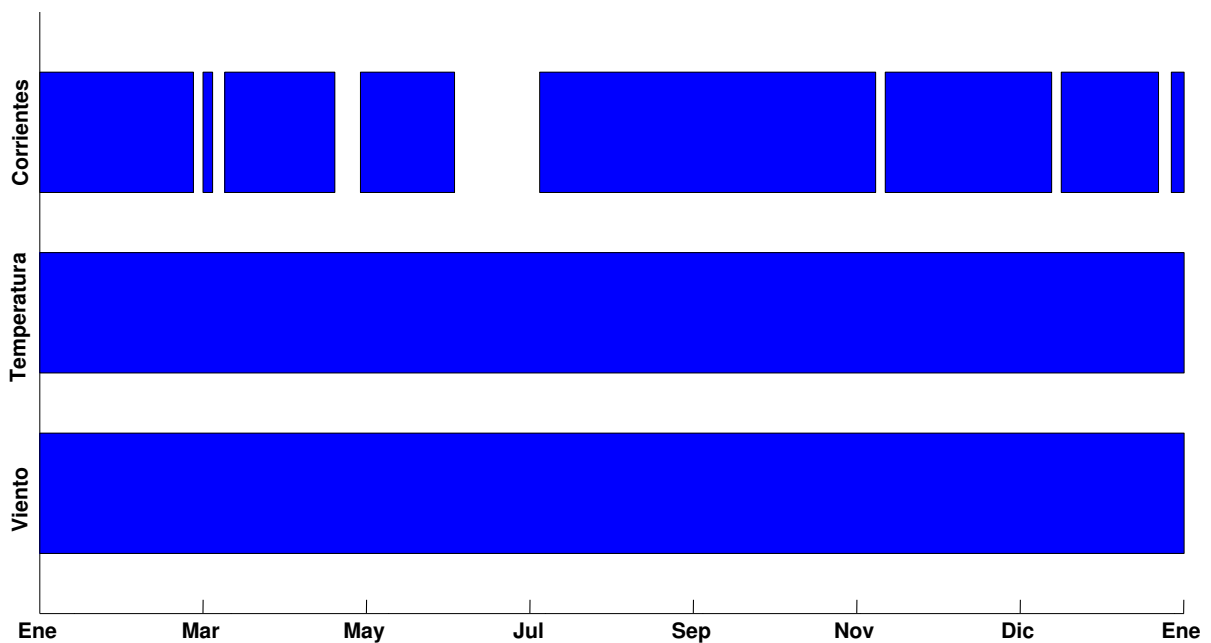


Figura 5.1: Cobertura temporal de los datos del año 2010 utilizados en este trabajo.

Los radares de alta frecuencia son capaces de medir corrientes superficiales en el primer metro de

la superficie del océano, para ello emiten pulsos electromagnéticos que interactúan con ondulaciones en la superficie del mar. Esta interacción 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 (Crombie 1955; figura 5.2). El corrimiento Doppler de la señal se obtiene a partir de la relación de dispersión de las ondas y se utiliza para estimar la velocidad de las corrientes superficiales (que se alejan o se acercan al transmisor) en dirección radial. Al combinar los vectores radiales de dos o más estaciones de radares es posible calcular las corrientes totales referidas a un sistema coordinado norte-sur, este-oeste (Flores-Vidal *et al.* 2011).

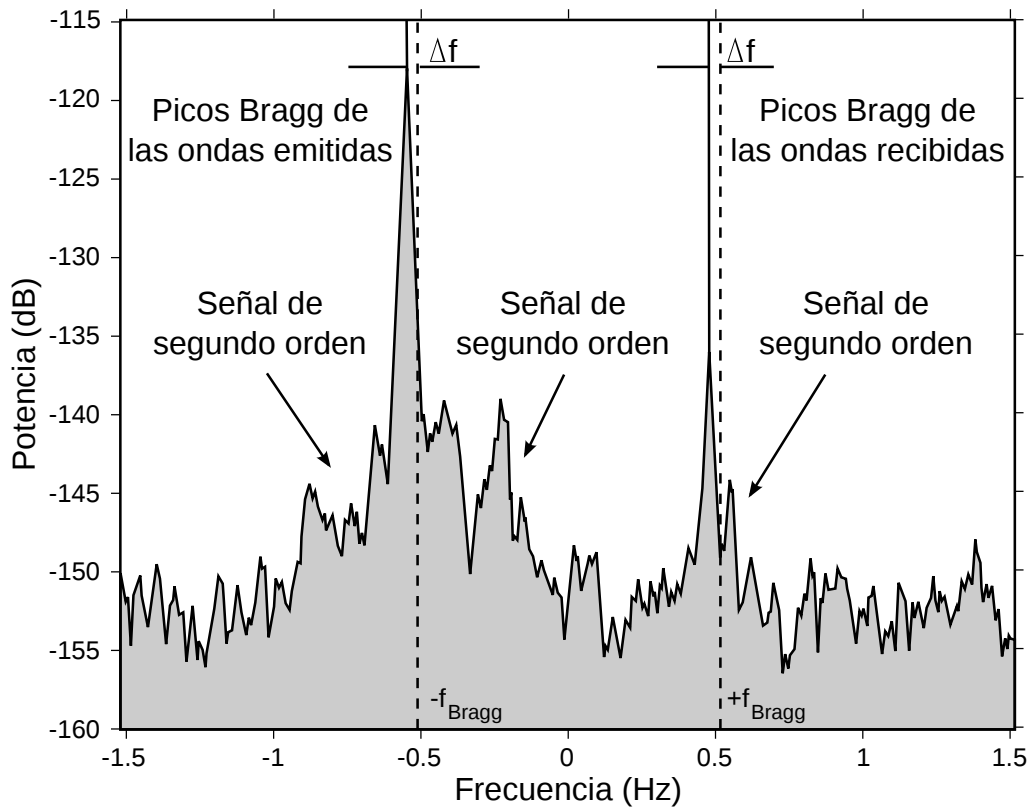


Figura 5.2: Ejemplo del espectro Doppler medido por un radar de alta frecuencia modificado de Lipa y Barrick 1983.

Los datos de la corriente superficial obtenidos por los radares de alta frecuencia se ajustaron a una malla rectangular de aproximadamente 270 km^2 con 268 nodos espaciados cada kilómetro.

La serie de tiempo que le corresponde a cada nodo de la malla fue suavizada mediante una media corrida de 3 horas para eliminar altas frecuencias consideradas como ruido (Flores-Vidal, *et al.* 2011). Posteriormente se tomaron sólo los nodos que tuvieron como mínimo el 75 % de su cobertura temporal como se muestra en la figura 5.3.

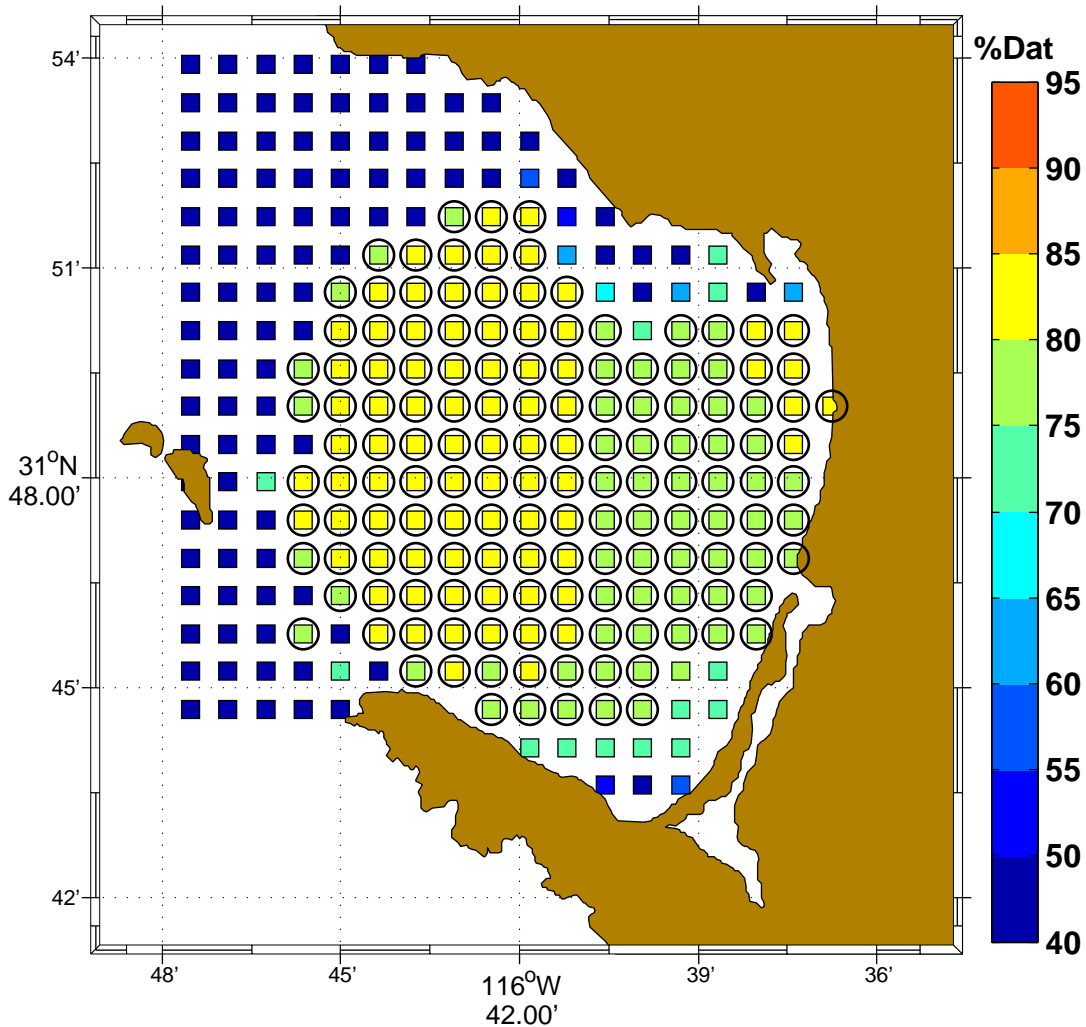


Figura 5.3: Cobertura espacial de los datos generados por los radares de alta frecuencia. La barra de colores indica el porcentaje de cobertura temporal de cada nodo. Los círculos muestran los nodos que cuentan con un mínimo del 75 % de datos.

Con el propósito de determinar la influencia del viento sobre las corrientes superficiales, en este trabajo se utilizaron datos horarios de viento para el año 2010 (figura 5.1) registrados con una estación meteorológica AANDERAA ubicada en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas

(IIO; figura 3.1; Silva *et al.* 2010) a una altura de ~ 18 m sobre el nivel del mar.

Adicionalmente se hace uso de datos de reanálisis de la temperatura superficial GHRSSST - MUR (Group for High Resolution Sea Surface Temperature - Multiscale Ultrahigh Resolution; <http://podaac.jpl.nasa.gov>) para el año 2010 (figura 5.1), con resolución temporal de 1 día y resolución espacial de 1 km (figura 3.1).

6 Métodos de análisis

6.1 Día típico

La técnica día típico mensual consiste en calcular los valores medios mensuales para cada hora del día de una serie de tiempo, en este caso, de las componentes vectoriales del viento y la corriente superficial de acuerdo con:

$$\bar{R}_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M R_{ij}$$

donde R representa la componente vectorial a trabajar, i a la hora del día ($i = 1, 2, 3, 4, \dots, 24$), j al día del mes ($j = 1, 2, 3, 4, \dots, 31$) y M el número total de días del mes (Delgado-Gonzalez *et al.* 1994, Silva *et al.* 2010). Esta técnica permite observar el comportamiento típico de las componentes vectoriales del viento y las corrientes superficiales a lo largo del día.

6.2 Elipses de variabilidad

Para definir una elipse de variabilidad es necesario rotar los datos que componen una serie de tiempo a su eje de máxima varianza o eje principal para posteriormente obtener los parámetros de la elipse mediante metodología propuesta por Emery y Thompson (1998). Si las variables $u(t)$

y $v(t)$ representan a las componentes zonal y meridional de un vector velocidad $\vec{V}(t)$, y u' y v' representan a las componentes de las anomalías de las series de tiempo con respecto a sus medias \bar{u} y \bar{v} , se define que:

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n$$

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n$$

$$u' = u(t) - \bar{u}$$

$$v' = v(t) - \bar{v}$$

$$C = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u'v'(t_n)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2\overline{u'v'}}{\overline{u'^2} - \overline{v'^2}} \right]$$

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_u \\ \lambda_v \end{array} \right\} = \frac{1}{2} \left\{ (\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) \pm \left[(\overline{u'^2} - \overline{v'^2})^2 + 4(\overline{u'v'})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

donde C es la covarianza de los datos, θ es el ángulo u orientación del eje mayor de la elipse de variabilidad y λ_u y λ_v corresponden a la variabilidad que presenta cada una de las componentes. Al relacionar las componentes λ_u y λ_v de la elipse de variabilidad se obtiene el índice π , el cual representa la excentricidad de la elipse y hace referencia a la variabilidad de la dirección del vector

$\vec{V}(t)$.

$$\pi = \frac{\lambda_v}{\lambda_u}$$

Con la finalidad de contrastar la importancia entre la magnitud promedio y la variabilidad de una serie de tiempo vectorial $\vec{V}(t)$, se normaliza la magnitud promedio con la desviación estándar del eje de máxima variabilidad de su elipse, en donde valores mayores a 1 indican que la magnitud promedio de la corriente domina sobre la variabilidad, mientras que valores menores a 1 indican un dominio de la variabilidad sobre la magnitud promedio. Este índice se denominó parámetro β .

$$\beta = \frac{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{\lambda_u}$$

6.3 Correlación vectorial

El coeficiente de la correlación vectorial C_{vec} entre las series de tiempo de viento de la estación meteorológica y los nodos de la malla con datos de las corrientes superficiales medidas por los radares de alta frecuencia se obtuvo siguiendo la metodología propuesta por Kundu (1976):

$$w = u + iv$$

$$C_{vec}(x_1, x_2, \tau) = \frac{w_1^*(t)w_2(t + \tau)}{\left[(w_1^*(t)w_1(t))^{\frac{1}{2}} (w_2^*(t)w_2(t))^{\frac{1}{2}} \right]}$$

donde w representa la forma compleja de la velocidad en una serie de tiempo (corriente superficial o viento), * denota el complejo conjugado, τ es el desfase o retraso en el tiempo y C_{vec} representa el coeficiente de correlación entre las dos series de tiempo w_1 y w_2 . La fase α es el ángulo promedio

con rotación en sentido anticiclónico de la segunda serie de tiempo con respecto de la primera:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{u_1 v_2 - u_2 v_1}{u_1 u_2 + v_1 v_2} \right)$$

De esta manera es posible identificar en que regiones de la bahía existe una mayor o menor similitud entre el comportamiento del viento y las corrientes superficiales.

6.4 Análisis espectral y coherencia

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). Esta técnica consiste en particionar una serie de tiempo en segmentos con el mismo numero de datos, para posteriormente calcular los periodogramas en cada segmento. Enseguida los periodogramas son promediados para obtener una mayor confiabilidad estadística:

$$X(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} y_n e^{-i2\pi f_n \Delta t} \right|^2$$

donde $X(f)$ es el resultado de aplicar un análisis de Fourier sobre cada una de las particiones, N corresponde al número de datos que integran una partición y f_n corresponde a las frecuencias que componen los periodogramas, donde $f_n = \frac{\pm n}{N\Delta t}$.

Para realizar el análisis de coherencia es necesario aplicar la técnica de los espectros cruzados:

$$S_{xy} = X(f) * Y(f)$$

$$S_{xx} = X(f)^* X(f)$$

$$S_{yy} = Y(f)^* Y(f)$$

donde $X(f)$ y $Y(f)$ corresponden a los periodogramas de la series de tiempo a comparar. S_{xy} es el producto de los espectros cruzados entre $X(f)$ y $Y(f)$, mientras que S_{xx} y S_{yy} corresponden a sus autoespectros. Finalmente la coherencia es dada por:

$$C^2 = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}$$

6.5 Análisis armónico

Con la finalidad de determinar la contribución de las principales frecuencias astronómicas de la marea sobre la circulación superficial de la bahía, se realizó un análisis armónico sobre la serie de tiempo de cada uno de los nodos de la malla. El análisis se efectúa en base a la metodología propuesta por Godin (1988):

$$w(t) = u_0 + \sum_{k=1}^K u_k \cos(\sigma_k t - b_k) + n_x(t) + i \left[v_0 + \sum_{k=1}^K v_k \cos(\sigma_k t - c_k) \right] + n_y(t)$$

donde k indica el k -ésimo constituyente de la marea y K el total de constituyentes con amplitud u_k y v_k , σ_k es la frecuencia y b_k y c_k corresponden a la fase. Las variables n_x y n_y representan la contribución de diferentes procesos no atribuidos a la marea en las direcciones este-oeste y norte-sur respectivamente.

7 Resultados

Se presenta un análisis de los datos de la dirección y la magnitud del viento de la estación meteorológica y se describen las variaciones estacionales que presentaron los datos de las corrientes y la temperatura superficial. Posteriormente se describe la variabilidad de la influencia del viento y la marea sobre las corrientes superficiales en la bahía.

7.1 Viento

El viento es uno de los principales mecanismos que aportan energía al océano, y por lo tanto, tiene una gran influencia sobre la dinámica oceánica. Con esto en consideración, se utilizaron datos de viento para delimitar temporalmente las estaciones climáticas del año 2010 (figura 7.1). El comportamiento típico de las componentes vectoriales del viento durante los meses de enero, febrero, marzo y diciembre presentaron un sistema de brisas bien marcado con vientos moderados del mar hacia la costa durante el mediodía y de la costa hacia el mar durante la noche. Un patrón similar se presentó durante los meses de abril y mayo, con vientos más intensos del mar hacia la costa durante el día y vientos de la costa hacia el mar durante la noche. En cambio, durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre se presentaron vientos intensos provenientes del SW durante la mayor parte del día, y que fueron más débiles durante la noche. Por último, fue posible distinguir un sistema de brisas bien marcado durante los meses de octubre y noviembre, con vientos intensos del mar hacia la costa durante el día y vientos de la costa hacia el mar durante la noche. Como resultado de estas comparaciones, se definieron estaciones del año conformadas por meses específicos (tabla I).

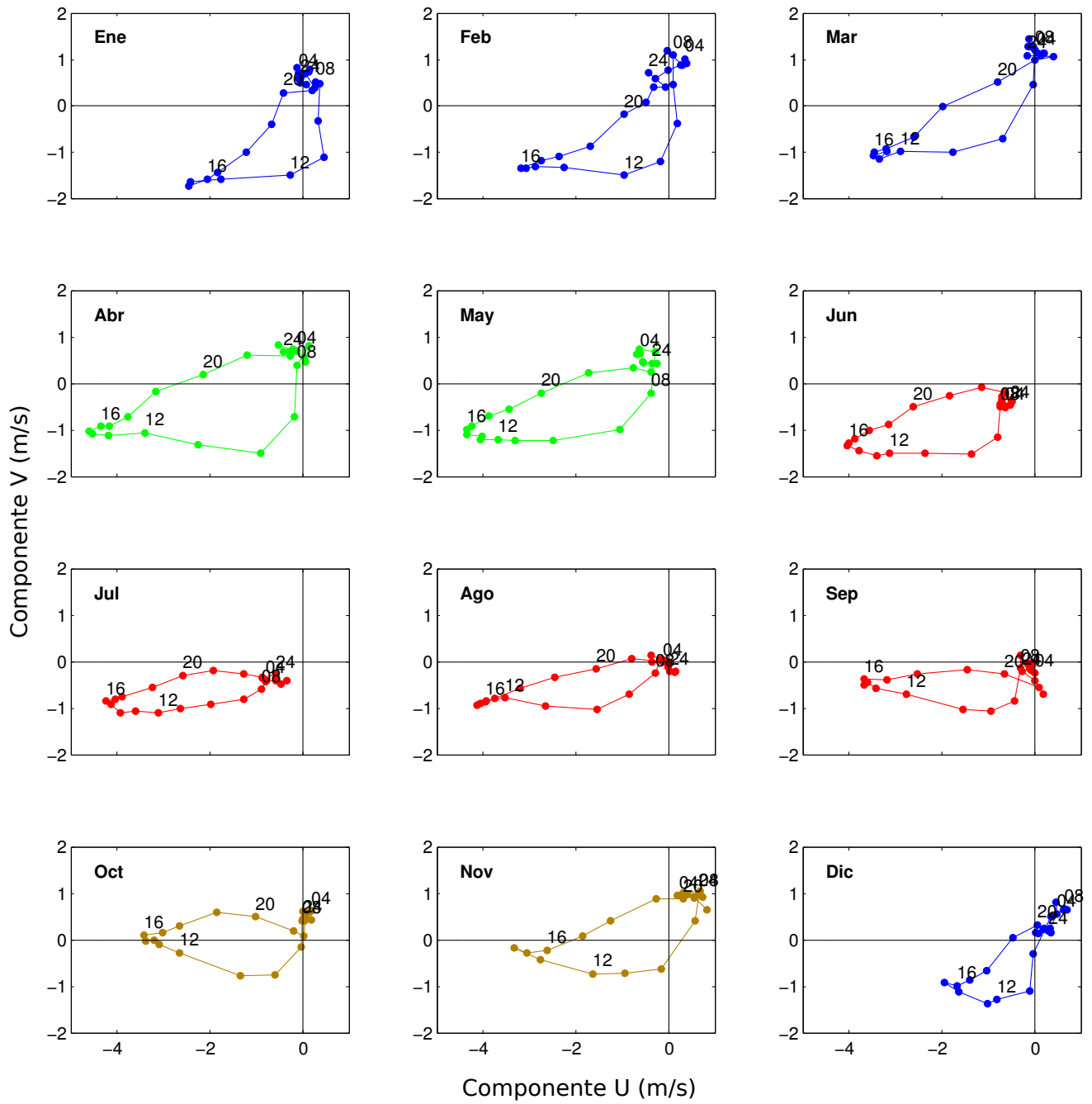


Figura 7.1: Representación de un día típico de las componentes del viento para cada mes del año 2010.

Tabla I: Meses que componen las diferentes estaciones del año 2010.

Estación	Meses
Invierno	Enero
	Febrero
	Marzo
	Diciembre
Primavera	Abril
	Mayo
Verano	Junio
	Julio
	Agosto
	Septiembre
Otoño	Octubre
	Noviembre

7.1.1 Promedios y elipses de variabilidad

Se presenta un análisis anual y estacional del comportamiento promedio del viento y su variación en términos de las elipses de variabilidad.

La magnitud promedio anual del viento fue de 1.22 ms^{-1} con dirección del WSW. Al comparar el vector promedio anual con su elipse de variabilidad, el parámetro β (0.57) indicó que la variabilidad del viento fue más importante que la velocidad promedio, con una desviación estándar en el semieje de mayor variabilidad de 2.1 ms^{-1} . La elipse de variabilidad anual presentó una excentricidad de 0.64, por lo que su forma fue más circular que elíptica, con el eje de máxima variabilidad orientado en la dirección promedio del viento (figura 7.2, tabla II).

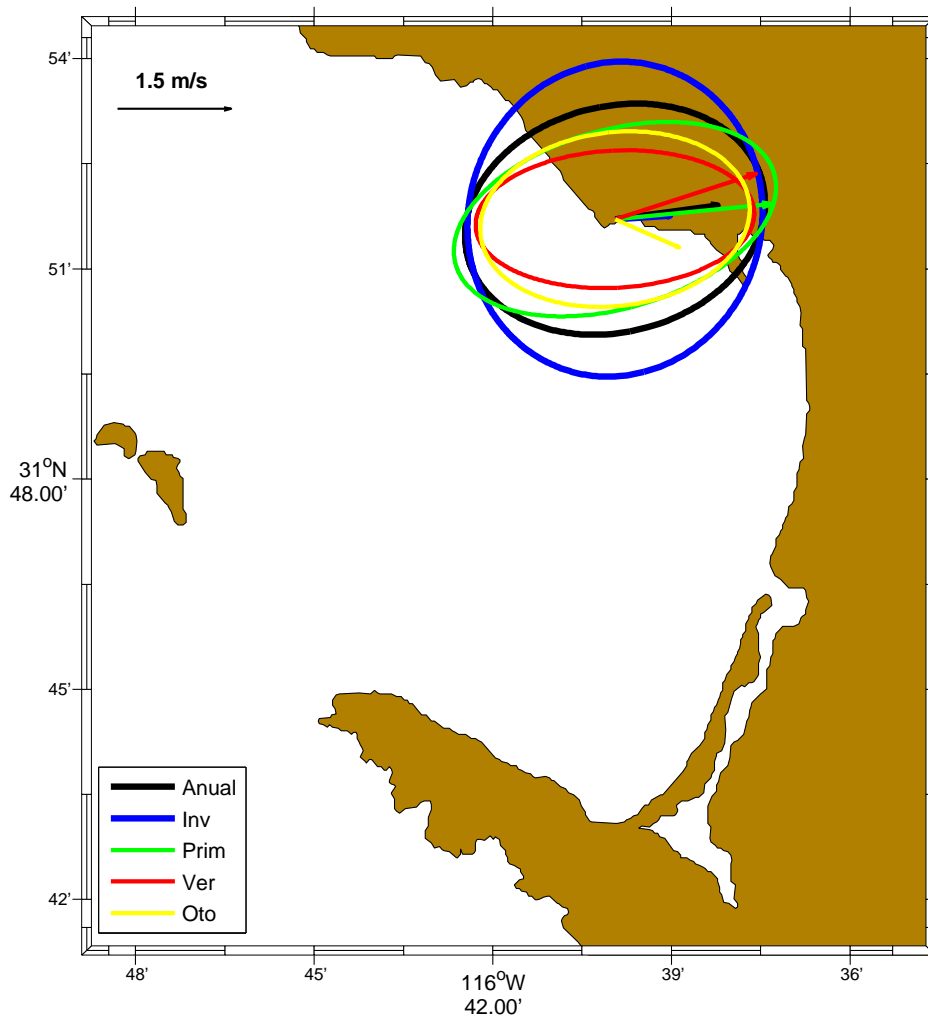


Figura 7.2: Elipses de variabilidad y vector promedio del año 2010 y las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño de los datos de viento de la estación meteorológica.

Una comparación entre las elipses de variabilidad del viento en las diferentes estaciones del año (figura 7.2), mostró que la mayor variabilidad se presentó durante el invierno. La excentricidad de la elipse que corresponde a esta estación del año fue de 0.9, con una desviación estándar en el semieje de mayor variabilidad de 2.1 ms^{-1} . Al comparar la magnitud promedio del viento con su variabilidad, el parámetro β mostró un dominio de la variabilidad con un índice de 0.33. La estación de invierno fue la que presentó la menor magnitud promedio del viento, con la dirección orientada al eje de mayor variabilidad de la elipse. Esto sugiere que una parte importante de la variabilidad del viento se presentó en forma perpendicular a la dirección promedio del viento, lo

que evidenció la presencia de un sistema de brisas en la bahía.

Durante la primavera la elipse de variabilidad mostró una excentricidad de 0.5, con una desviación estándar en el semieje mayor de 2.3 ms^{-1} y de 1.1 ms^{-1} en el semieje menor, lo que indica una notable disminución de la variabilidad en el viento con respecto al invierno. Por otra parte la magnitud promedio del viento aumentó a 1.2 ms^{-1} , como resultado de la interacción de procesos de escala sinóptica que atenúan el sistema viento local (brisas), lo que concuerda con un aumento en el parámetro β .

El verano presentó la menor variabilidad del año, con una elipse con excentricidad de 0.4 y una desviación estándar de 2.0 ms^{-1} en el semieje de mayor variabilidad, mientras que la magnitud promedio del viento fue de 1.8 ms^{-1} . La disminución de la variabilidad y el aumento de la intensidad promedio del viento fueron reflejados en el parámetro β (tabla II), y evidenciaron una mayor atenuación en el sistema de brisas por efecto de procesos de escala sinóptica.

Finalmente durante el otoño, el análisis mostró un incremento en la variabilidad de la dirección del viento, con un aumento en la excentricidad de la elipse de variabilidad a 0.5. En cuanto a la magnitud promedio del viento, ésta disminuyó en comparación con el verano (tabla II), lo que sugiere un decaimiento en el efecto del viento de escala sinóptica sobre el sistema de escala local (brisas) durante el otoño.

Tabla II: Parámetros de las elipses de variabilidad y vectores promedio del viento para las diferentes estaciones del año 2010. **Mag** y **Dir** son la magnitud y dirección promedio del viento, \mathbf{S}_u es el eje de mayor variabilidad, \mathbf{S}_v el eje de menor variabilidad, β es la relación entre la magnitud promedio del viento y la desviación estándar del semieje mayor de la elipse, π indica la excentricidad de la elipse y θ el ángulo de inclinación.

	Mag	Dir	\mathbf{S}_u	\mathbf{S}_v	β	π	θ
	(ms^{-1})		(ms^{-1})	(ms^{-1})			($^{\circ}$)
Anual	1.2	WSW	2.1	1.4	0.57	0.6	9
Invierno	0.7	WNW	2.1	1.9	0.33	0.9	13
Primavera	1.9	WSW	2.3	1.1	0.82	0.5	12
Verano	1.8	SW	2.0	0.8	0.90	0.4	2
Otoño	0.8	NW	1.9	1.0	0.42	0.5	5

Los resultados anteriores muestran que el viento presenta una notable variabilidad estacional. Durante el invierno se observó la presencia de un sistema brisas marcado, con una diversificación en la dirección del viento durante los meses que componen la estación del año (figura 7.3). Esta diversificación se presentó con vientos acentuados de mar a tierra durante el día y vientos débiles de tierra a mar durante la noche (figura 7.1). En cambio durante el verano se presentó un debilitamiento en el sistema de brisas, por lo que la dirección del viento fue menos variable (figura 7.4) con dirección predominante del SW durante la mayor parte del día (figura 7.1). Las variaciones estacionales en el sistema de brisas son atribuidas a cambios en los centros de alta y baja presión del Océano Pacífico al NE de Baja California (Álvarez-Sánchez 1977, Pavía y Reyes 1983). Las estaciones del año de primavera y otoño fueron consideradas como transicionales.

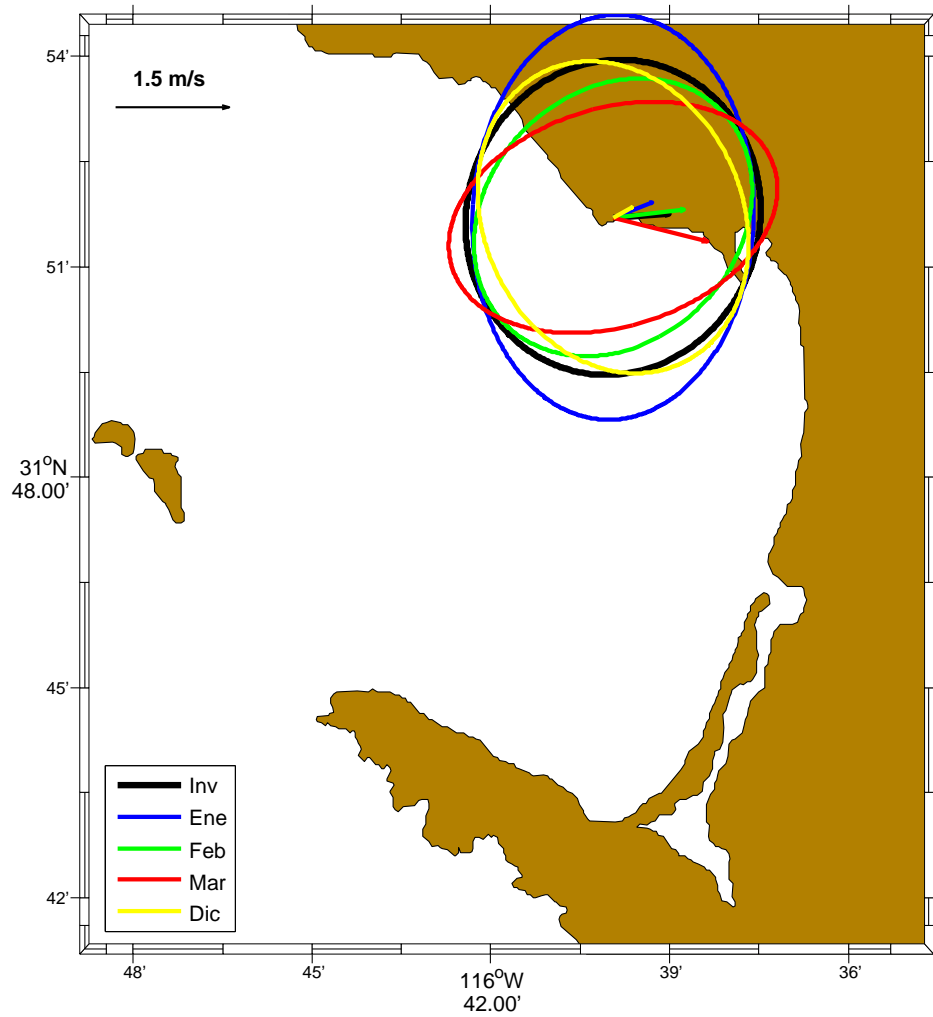


Figura 7.3: Elipses de variabilidad y vector promedio de la estación de invierno y los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre del año 2010 de los datos de viento de la estación meteorológica.

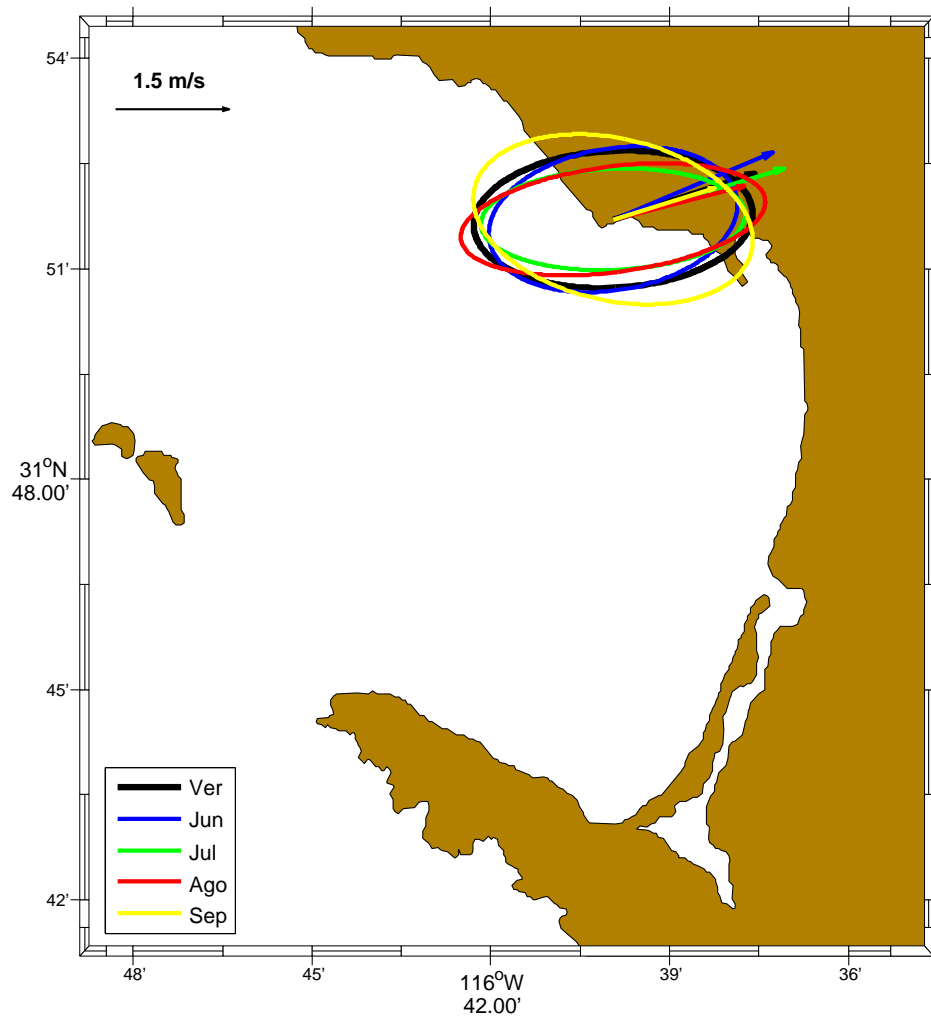


Figura 7.4: Elipses de variabilidad y vector promedio de la estación de verano y los meses de junio, julio, agosto y septiembre del año 2010 de los datos de viento de la estación meteorológica.

7.1.2 Análisis espectral

Con la finalidad de identificar a los periodos o frecuencias más representativos en la serie de tiempo del viento, se aplicó un análisis espectral mediante el método del periodograma promedio de Welch con un intervalo de confianza del 95% (Figura 7.5). Esta técnica distingue entre los procesos de rotación con sentido a favor (línea color rojo) y en contra (línea color negro) de las manecillas del reloj.

El espectro en potencia (figura 7.5) mostró que las bandas con mayor energía fueron las

que presentaron periodos diurnos (24 horas) y semidiurnos (12 horas) con sentido de rotación anticiclónico. Se observó otro pico de energía importante con un periodo de 182 días, aunque éste no se encuentra bien definido y presenta una menor confiabilidad estadística. El pico con periodicidad de 24 horas explica gran parte de la variabilidad del viento la cual es atribuida al sistema de brisas, resultado que concuerda con el análisis de la variabilidad diurna típica del viento (sección 6.1).

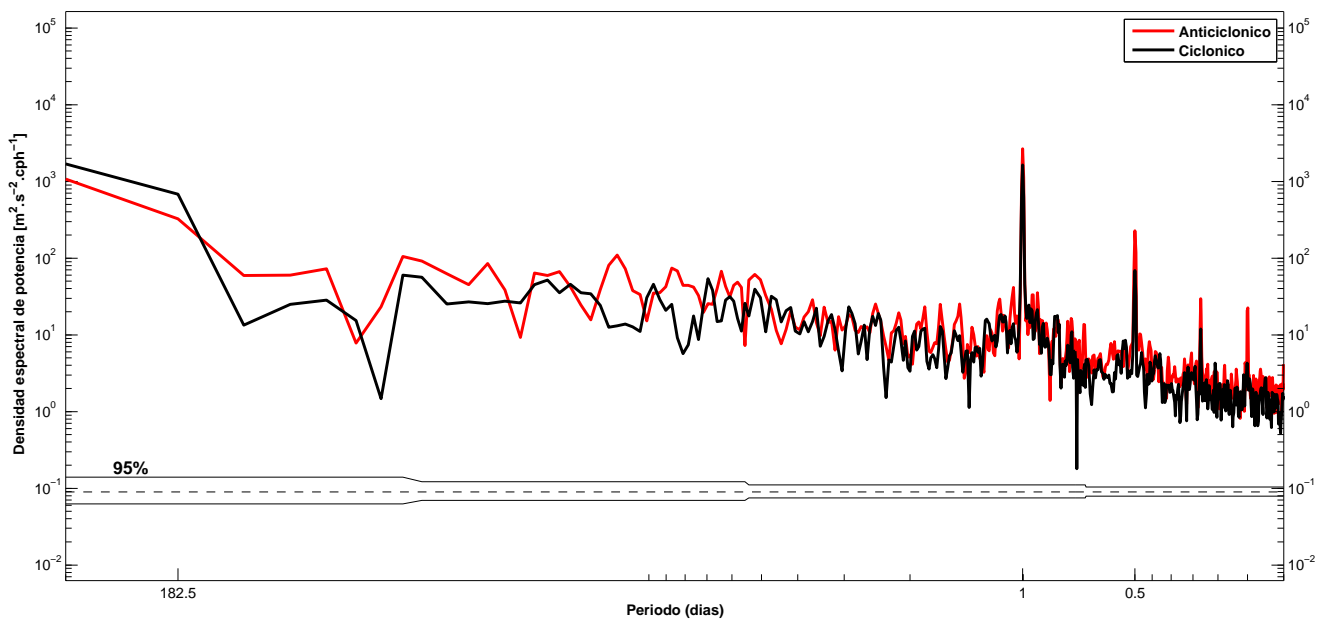


Figura 7.5: Análisis espectral de los datos de viento durante el año 2010. La línea color rojo representa a los procesos con sentido de rotación a favor de las manecillas del reloj, mientras que la línea color negro a los procesos con sentido en contra de las manecillas del reloj.

7.2 Circulación superficial

7.2.1 Circulación promedio

Con la finalidad de evaluar la variabilidad del comportamiento de la circulación superficial en la bahía a lo largo del año, se analizaron mapas promedio de las corrientes obtenidas por los radares de alta frecuencia y los datos de reanálisis de la temperatura superficial GHRSSST - MUR.

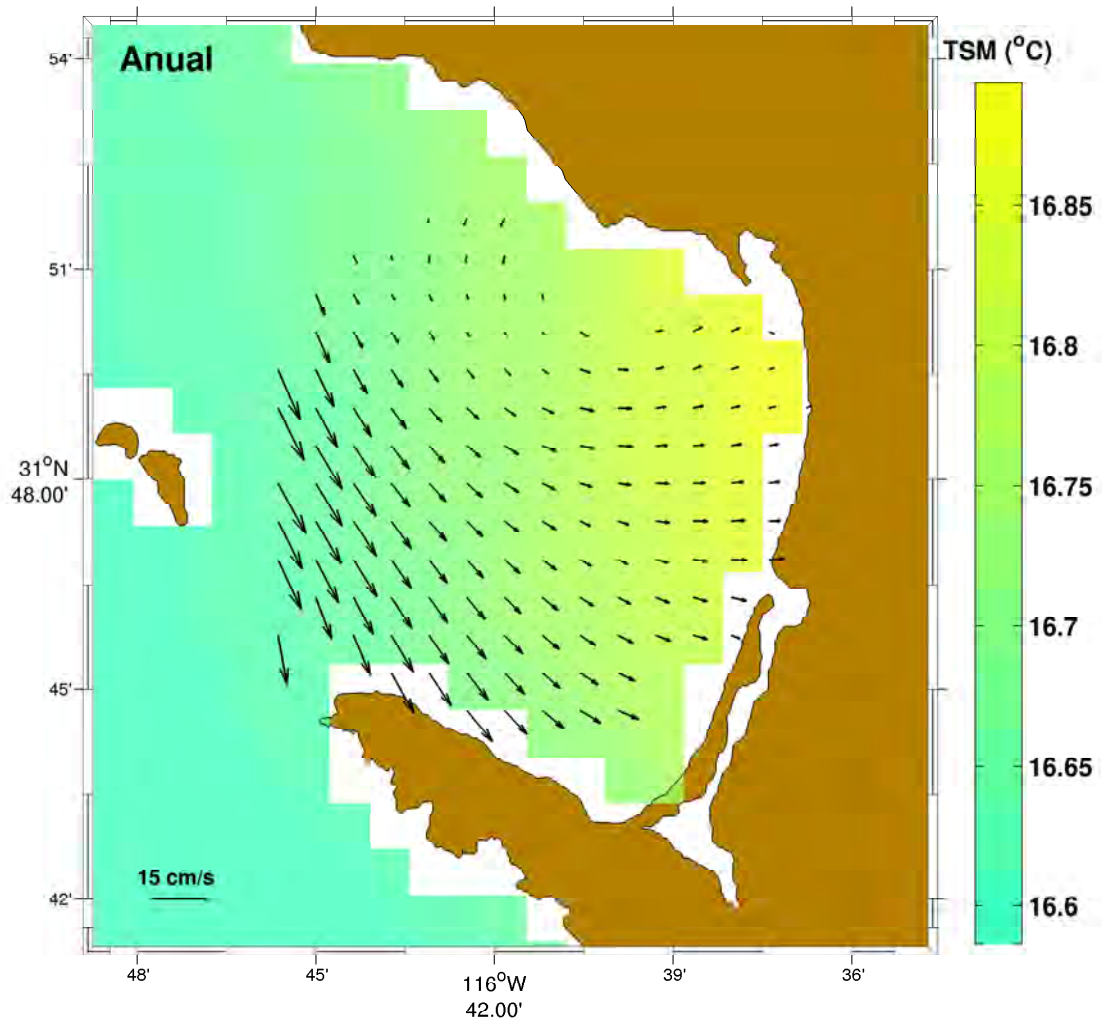


Figura 7.6: Corrientes y temperatura superficial promedio anual para la Bahía Todos Santos durante el año 2010.

El promedio anual de las corrientes superficiales (Figura 7.6) mostró un flujo predominante de agua hacia el interior de la bahía, con corrientes más intensas ($\sim 15 \text{ cm s}^{-1}$) en la región expuesta al océano con dirección al sureste, y corrientes de menor intensidad ($\sim 5 \text{ cm s}^{-1}$) con dirección al este en las zonas cercanas al Puerto de Ensenada. El promedio anual de la temperatura, mostró que los valores más elevados ($\sim 16.9 \text{ }^\circ\text{C}$) se encontraron en la región cercana al puerto de Ensenada y disminuyeron hacia el exterior de la bahía ($\sim 16.5 \text{ }^\circ\text{C}$).

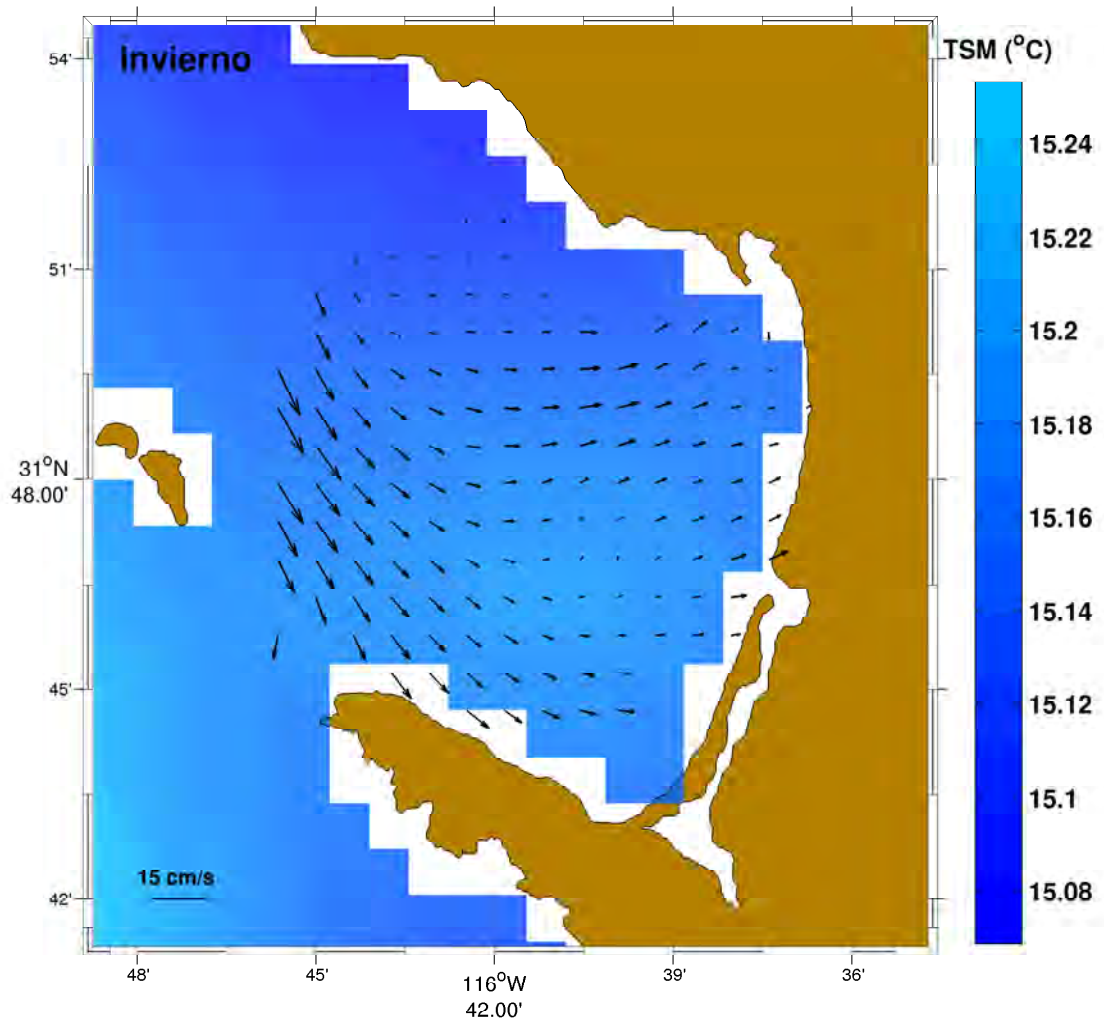


Figura 7.7: Circulación y temperatura superficial promedio para el invierno (enero, febrero, marzo y diciembre) del año 2010,. La escala de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.

Durante el invierno, el promedio estacional de las corrientes superficiales (figura 7.7) mostró una corriente que superó los 15 cm s^{-1} entre Punta Banda y las Islas Todos Santos, que conforme se adentró a la bahía presentó una bifurcación y generó una corriente bien definida de $\sim 7 \text{ cm s}^{-1}$ con dirección hacia el Puerto de Ensenada, y una corriente paralela a la Península de Punta Banda con velocidades de $\sim 12 \text{ cm s}^{-1}$. Este comportamiento fue producto de la interacción de un remolino anticiclónico en la región NE y un remolino ciclónico al SW de la región central de la bahía. Estos remolinos fueron más evidentes durante los meses de febrero, marzo noviembre y diciembre (figuras 7.8, 7.9, 7.16 y 7.10). En cuanto a la temperatura superficial, el promedio estacional de invierno

mostró muy poca variabilidad espacial, con ~ 15.5 °C en la mayor parte de la bahía.

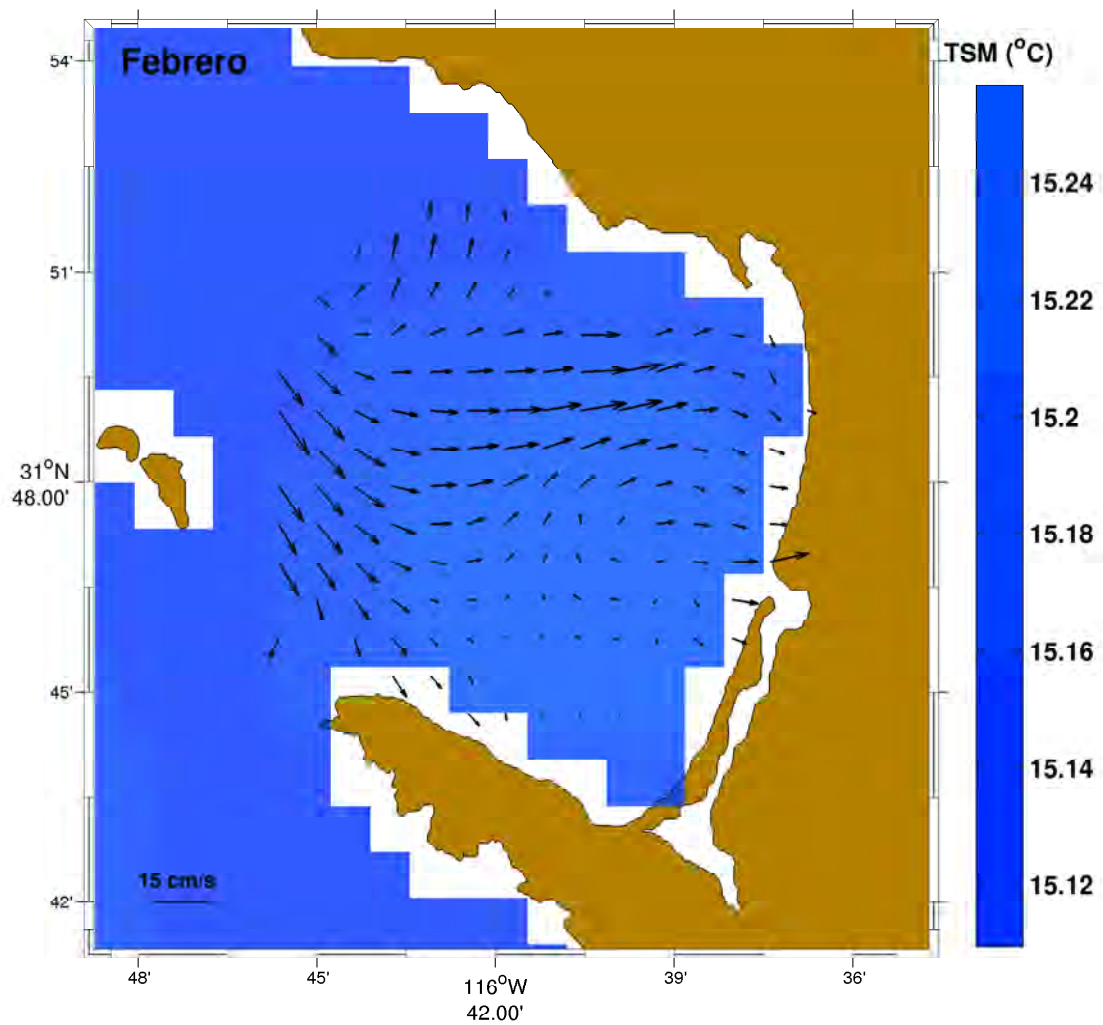


Figura 7.8: Circulación y temperatura superficial promedio para el mes de febrero del año 2010. La escala de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.

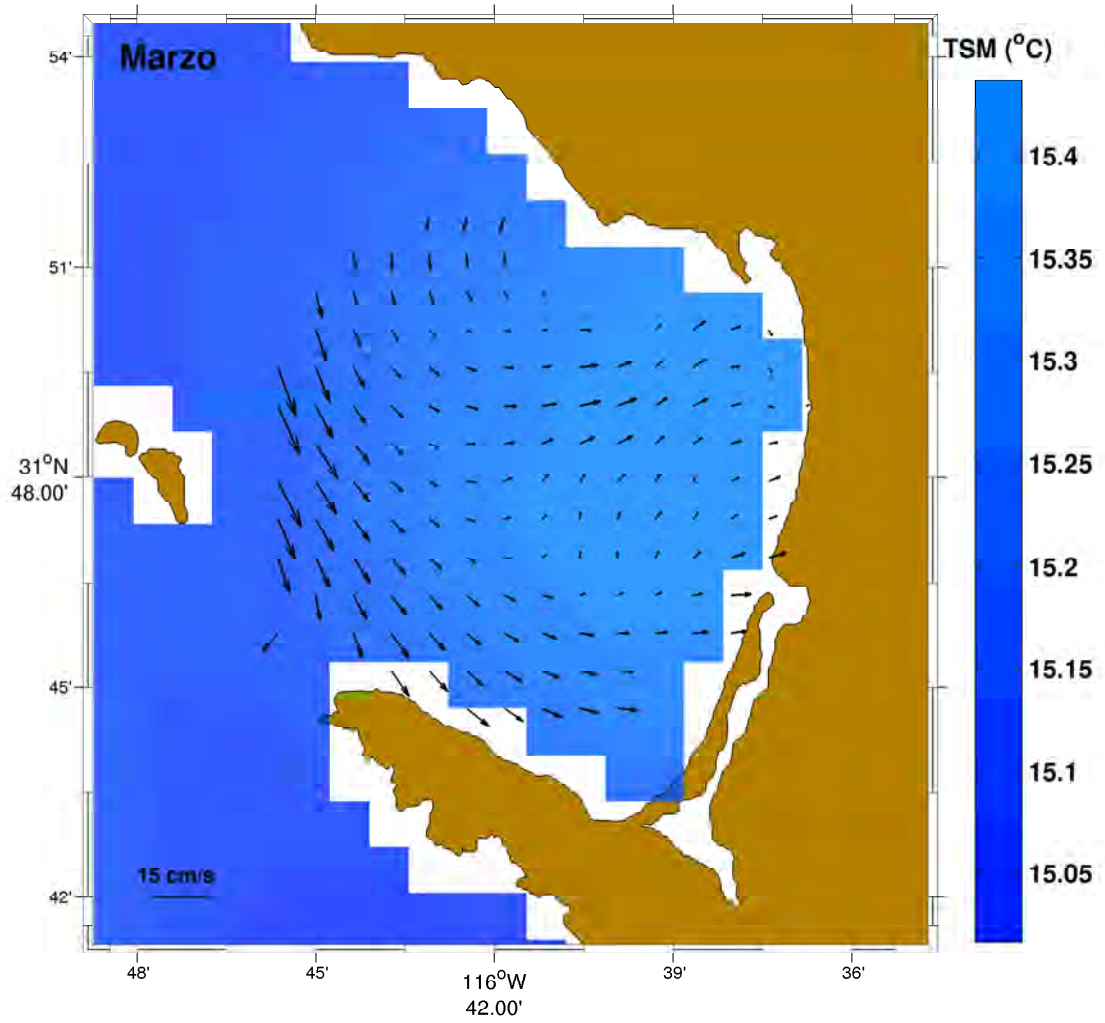


Figura 7.9: Circulación y temperatura superficial promedio para el mes de marzo del año 2010. La escala de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.

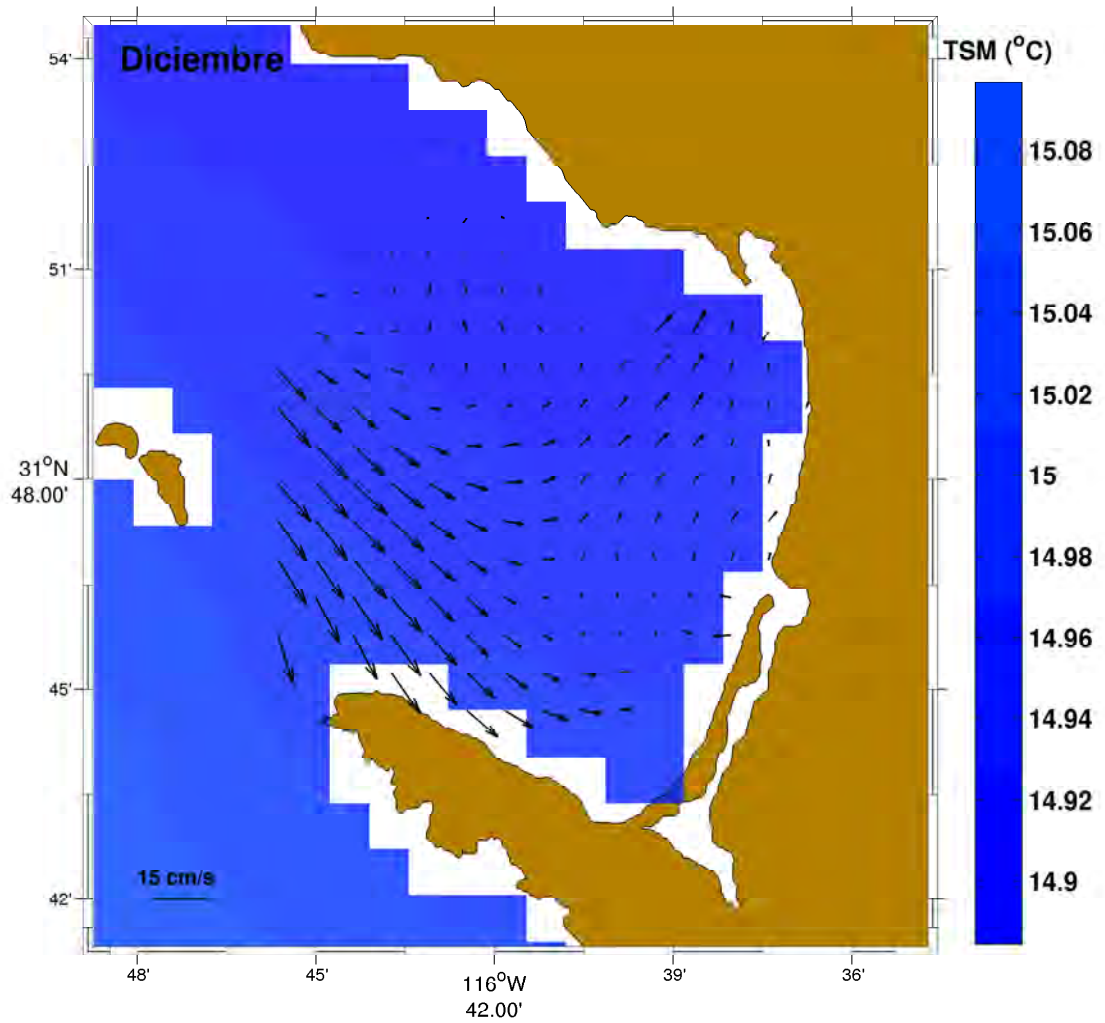


Figura 7.10: Circulación y temperatura superficial promedio para el mes de diciembre del año 2010. La escala de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.

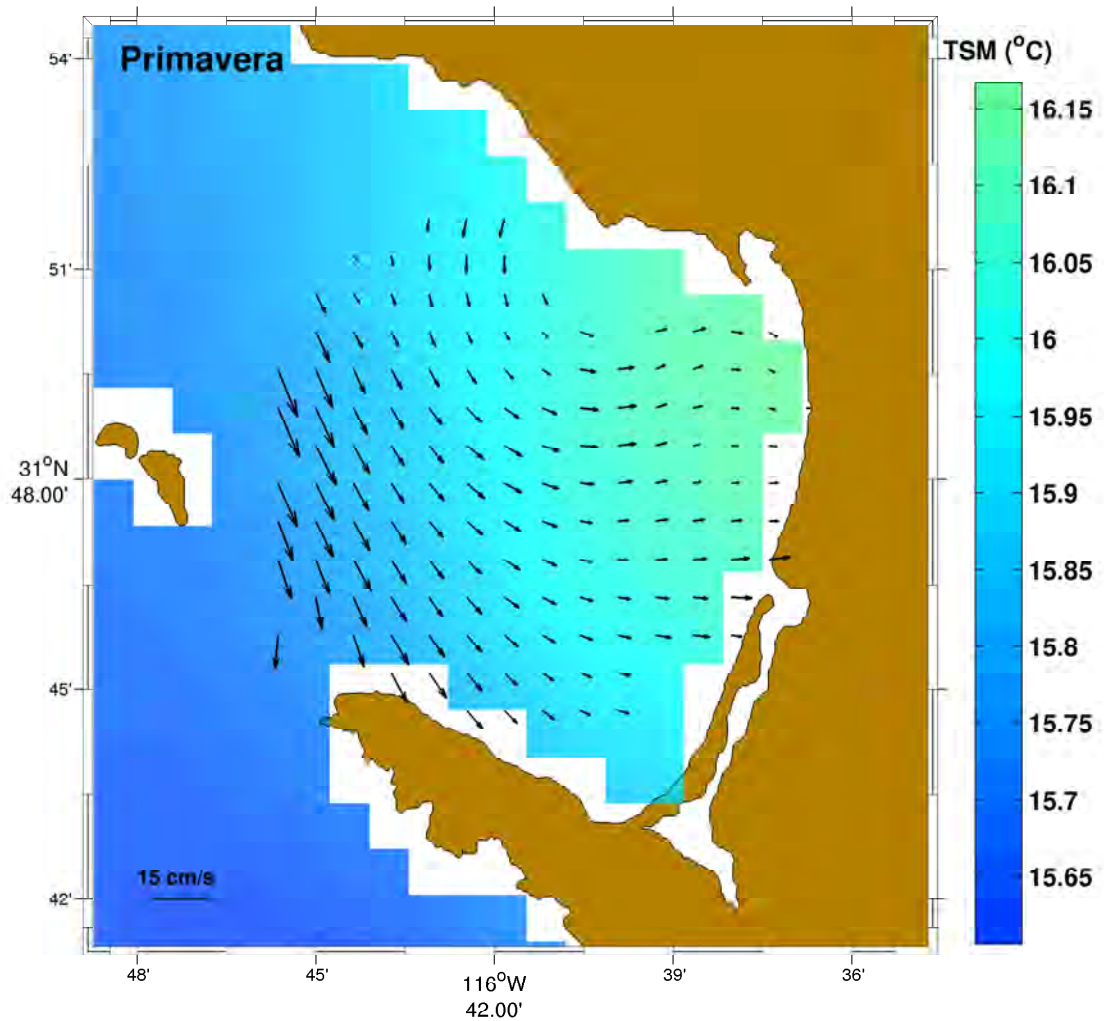


Figura 7.11: Corrientes y temperatura superficial promedio para la estación de primavera del año 2010, compuesta por los meses de abril y mayo. La barra de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.

El patrón de circulación de las corrientes superficiales durante la estación de primavera (figura 7.11) presentó una estructura similar al patrón de corrientes del promedio anual (figura 7.6). Sin embargo, el promedio de la temperatura durante la primavera fue menor que el obtenido en el promedio anual, con valores entre 15.7 °C y 16.1 °C.

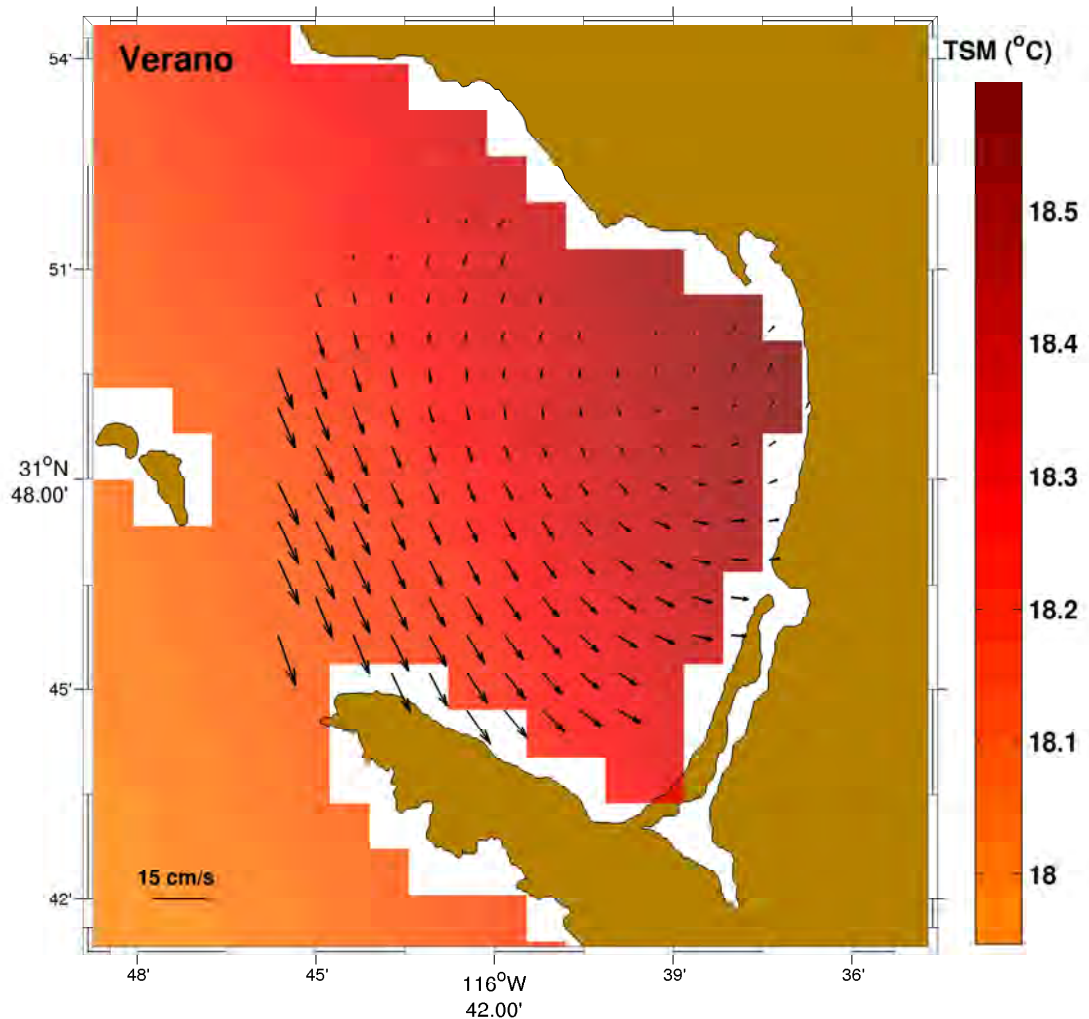


Figura 7.12: Circulación y temperatura superficial promedio para la estación de verano del año 2010, compuesta por los meses de junio, julio, agosto y septiembre. La barra de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.

El promedio estacional de la circulación superficial durante el verano presentó un patrón de comportamiento similar al promedio anual con un flujo predominante hacia el interior de la bahía (figuras 7.12 y 7.6). Como diferencia con respecto al patrón de largo periodo (promedio anual) se observó un remolino ciclónico con corrientes débiles en la región cercana al Puerto de Ensenada, el cual fue más marcado durante los meses de agosto y septiembre (Figuras 7.13 y 7.14). Durante esta estación del año los valores promedio de temperatura fueron de entre 17 °C y 18 °C, con los valores más elevados en la región NE de la bahía.

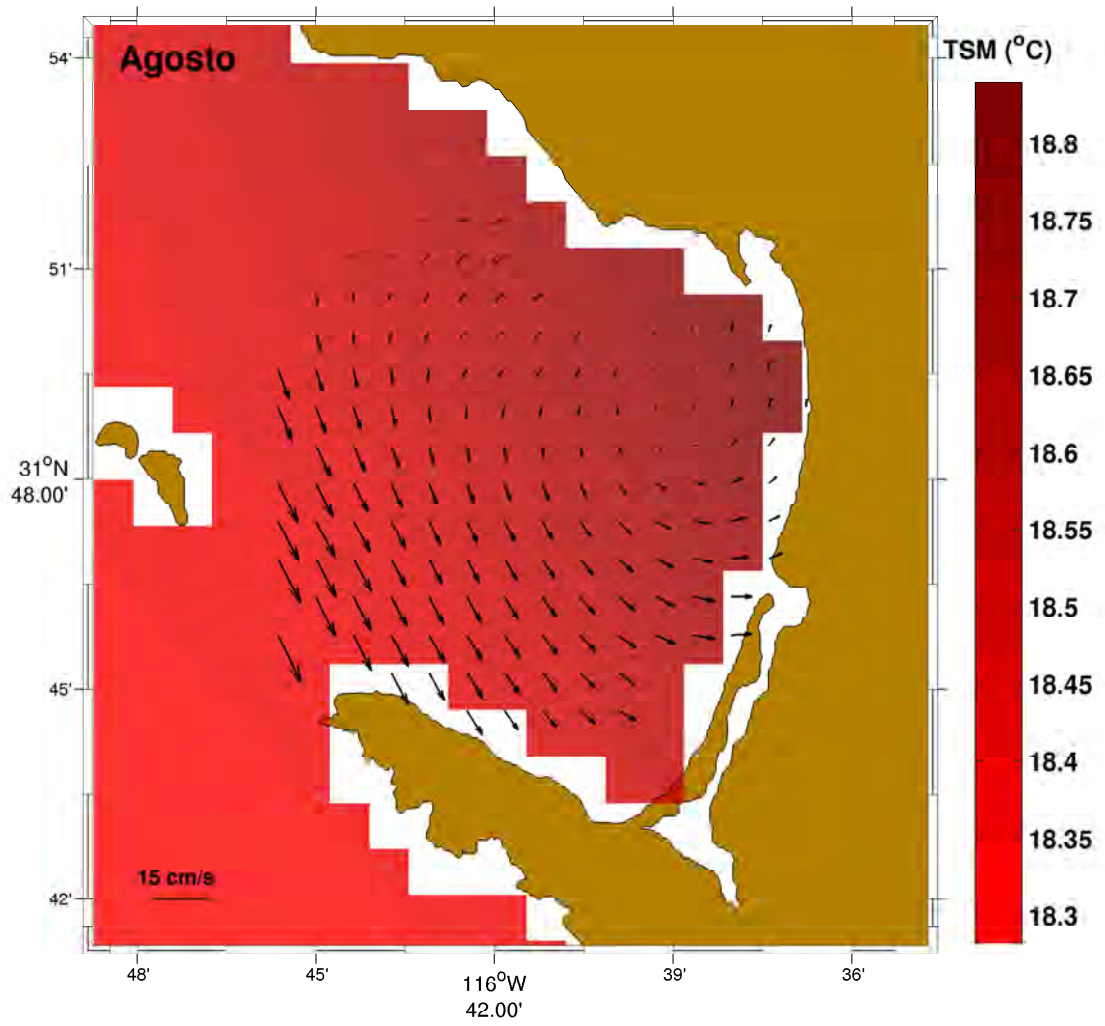


Figura 7.13: Circulación y temperatura superficial promedio para el mes de agosto del año 2010. La barra de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.

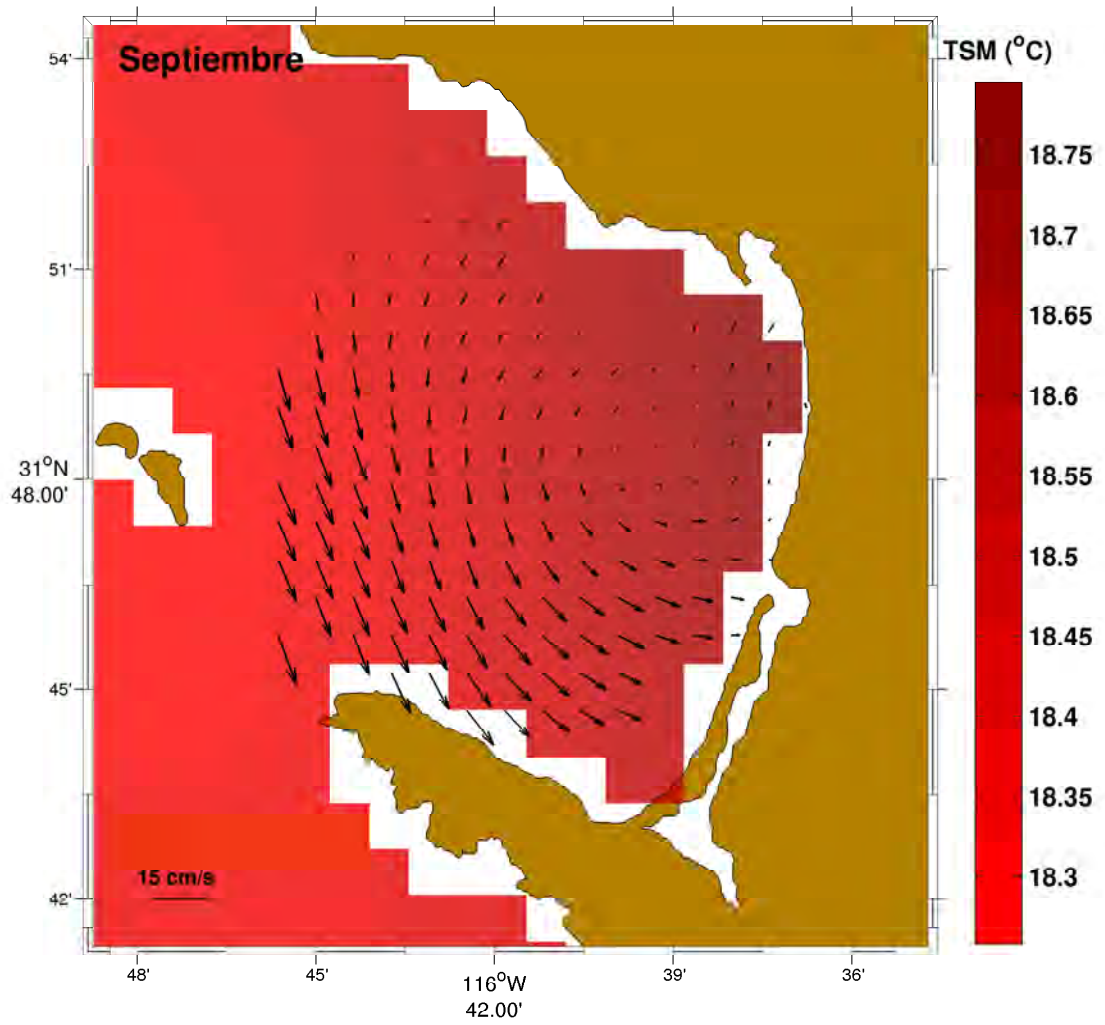


Figura 7.14: Circulación y temperatura superficial promedio para el mes de septiembre del año 2010. La barra de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.

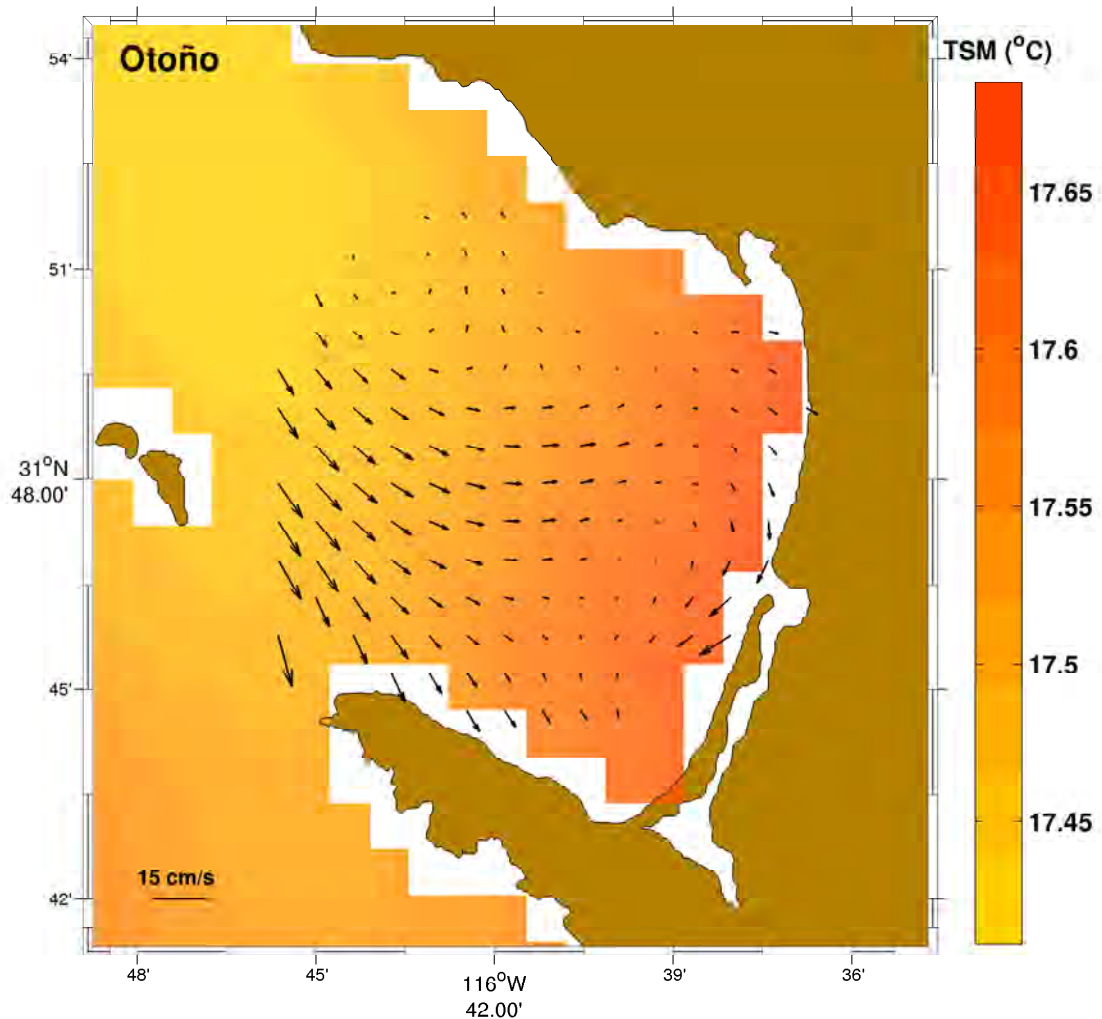


Figura 7.15: Circulación y temperatura superficial promedio para la estación de otoño, compuesta solo por el mes de octubre del año 2010. La barra de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.

Finalmente durante el otoño (7.15), el patrón promedio de las corrientes superficiales se caracterizó por un flujo con dirección hacia el SE en la región entre las Islas Todos Santos y la Península de Punta Banda. Este flujo presentó una bifurcación que formó una corriente bien definida con dirección al E y una corriente paralela a la Península de Punta Banda. Estos patrones de circulación fueron similares a los registrados durante el invierno (figura 7.7). Como diferencia entre las dos estaciones del año, durante el otoño se observó un flujo en la región central de la bahía, que al acercarse a la línea de costa (norte del Estero de Punta Banda) cambió de dirección y se orientó hacia el SW a lo largo de la barra del Estero de Punta Banda. En cuanto a la temperatura

superficial, ésta osciló entre 17.4 °C y 17.7 °C, con los valores más elevados al este de la bahía.

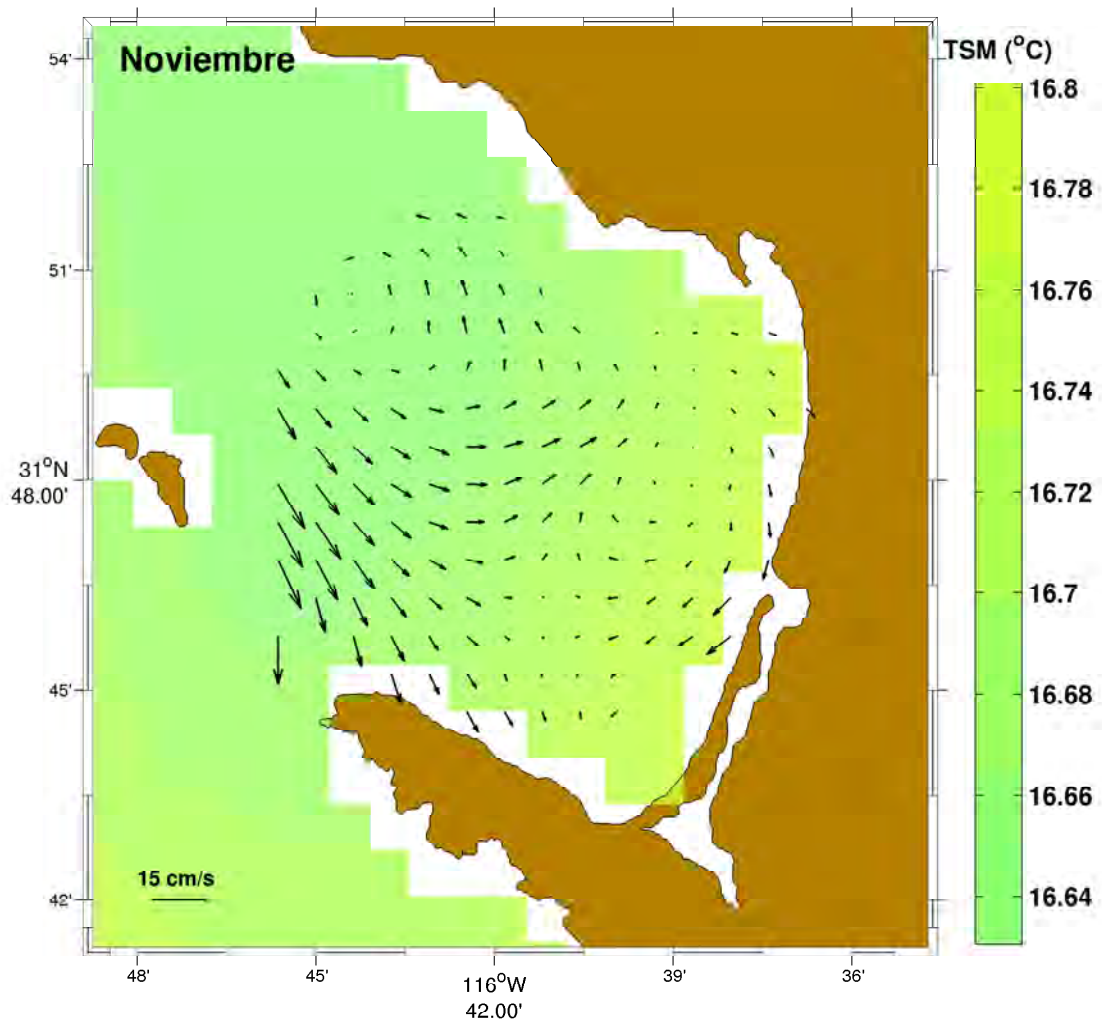


Figura 7.16: Circulación y temperatura superficial promedio para el mes de noviembre del año 2010. La barra de colores representa los valores de la temperatura superficial del mar.

Al analizar la variabilidad de los patrones de la circulación superficial dentro de la bahía a lo largo del año, fueron observadas notables diferencias entre las estaciones de invierno y verano. Para el caso del flujo medio que corresponde al invierno se observaron corrientes con dirección y magnitud bien definidas, las cuales fueron asociadas a la interacción de remolinos dentro la bahía. En cambio durante el verano, la circulación promedio se vió dominada por un remolino ciclónico que cubrió gran parte de la bahía, con su núcleo y las velocidades más bajas en las cercanías del

Puerto de Ensenada, mientras que las corrientes con mayor intensidad se localizaron en las regiones W y SW de la Bahía.

Al igual que la circulación superficial dentro de la bahía, el viento medido en la estación Punta Morro presentó diferencias entre las estaciones de invierno y verano. Durante el invierno se observó un dominio de la variabilidad sobre el comportamiento del viento y éste fue típicamente intenso durante pocas horas del día. Este comportamiento trajo consigo una menor influencia del viento sobre las corrientes marinas, por lo que los patrones de la circulación que se observaron en el invierno pudieron ser generados por otros mecanismos diferentes al viento. En cambio durante el verano, la menor variabilidad y mayor magnitud del viento a lo largo del día permitió un mayor flujo de agua hacia el interior de la bahía. Éste flujo presentó modificaciones en magnitud y dirección al interactuar con la línea de costa, lo que propició el acarreo de agua hacia la región NE de la bahía. Este comportamiento tuvo como resultado la formación de una zona con poca dinámica y mayor tiempo de residencia del agua, lo que concuerda con la presencia de agua más cálida en el núcleo del remolino. El aumento de la temperatura fue generado por la recirculación del agua y el mayor tiempo de exposición a la radiación solar.

7.2.2 Elipses de variabilidad

Se representa la variabilidad anual y estacional de las corrientes superficiales mediante una comparación entre los vectores promedio y sus elipses de variabilidad. Para facilitar el análisis la bahía fue dividida en cuatro regiones (figura 7.17). Las series de tiempo de las corrientes superficiales fueron promediadas espacialmente con la finalidad de obtener parámetros representativos de las elipses de variabilidad en las diferentes región de la bahía (tabla III).

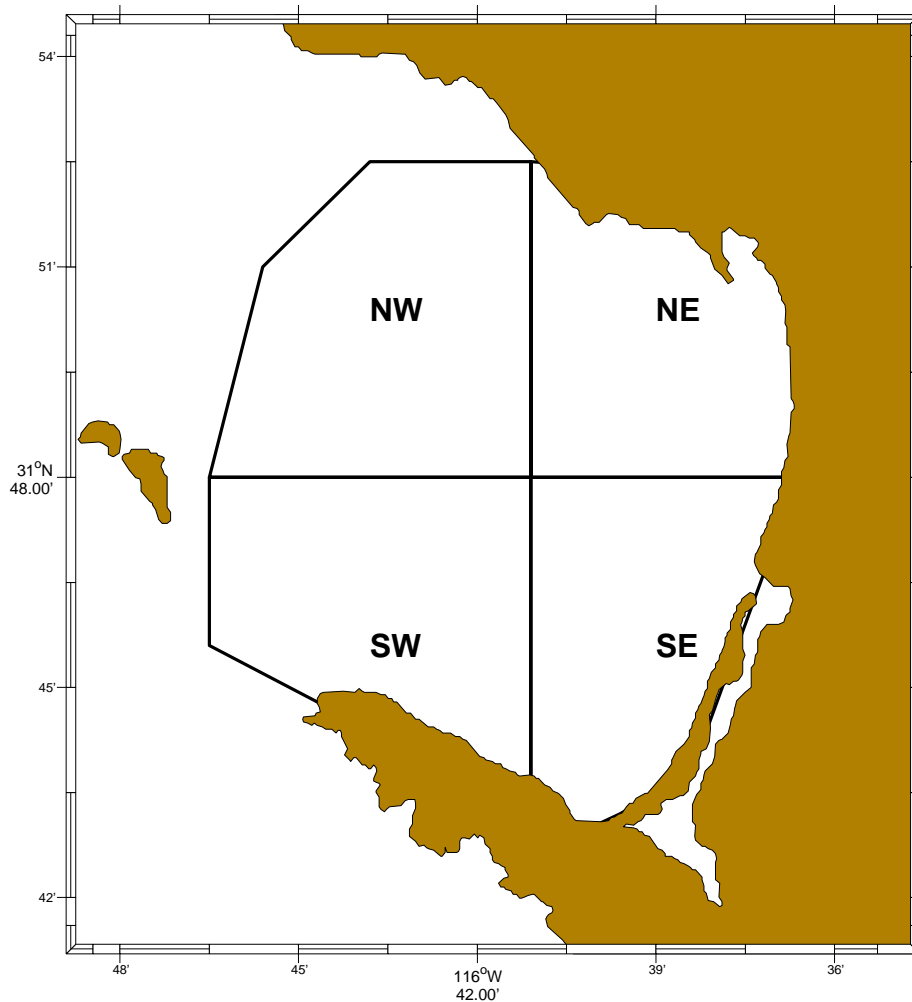


Figura 7.17: Regiones en las que fue dividida la Bahía Todos Santos para el análisis de las elipses de variabilidad de las corrientes superficiales.

En el análisis anual (figura 7.18 y tabla III) se observaron elipses de variabilidad bien definidas en la región NW de la bahía, con una excentricidad promedio de 0.46 y una desviación estándar en el eje de máxima variabilidad de 16 cms^{-1} . Se realizó una comparación entre la magnitud promedio y la variabilidad de las corrientes superficiales, en donde el parámetro β (0.26) indicó un dominio de la variabilidad sobre la circulación promedio en esta zona. La región SW presentó elipses bien definidas, con una excentricidad promedio de 0.56 y una desviación estándar en el semieje de máxima variabilidad de 13.8 cms^{-1} . El ángulo de inclinación de la elipse promedio fue de -51° con respecto al este, similar al ángulo de inclinación de la Península de Punta Banda,

lo que evidencia el efecto de la península sobre el comportamiento de las corrientes superficiales en esta región. El parámetro β (0.56) indicó un dominio de la variabilidad sobre la corriente promedio en ésta zona. En la región SE de la bahía se observan elipses bien definidas con una excentricidad promedio de 0.61 y una desviación estándar en el semieje de máxima variabilidad de 9.8 cms^{-1} . El parámetro β mostró un dominio de la variabilidad sobre el flujo medio en esta zona. La región NE, a diferencia de los cuadrantes anteriores, presentó elipses con una forma más circular (excentricidad promedio de 0.82), lo que indicó que las corrientes en esta zona presentaron una mayor variabilidad en dirección y menor variabilidad en magnitud, con una desviación estándar en el semieje de máxima variabilidad de 7.9 cms^{-1} . Este patrón de comportamiento general fue consistente con un transporte de agua con corrientes moderadas de las regiones NW y W hacia la bahía con dirección al SE, tal como se mostró en los mapas promedio (figura 7.29). Estos flujos de agua fueron modificados tanto en magnitud como en dirección por efecto de la batimetría y la línea de costa y redirigidos hacia la zona del Puerto de Ensenada (NE), en donde las velocidades de las corrientes fueron menores. Ésto favoreció la presencia de valores más elevados en la temperatura superficial del mar cerca del Puerto de Ensenada (7.29).

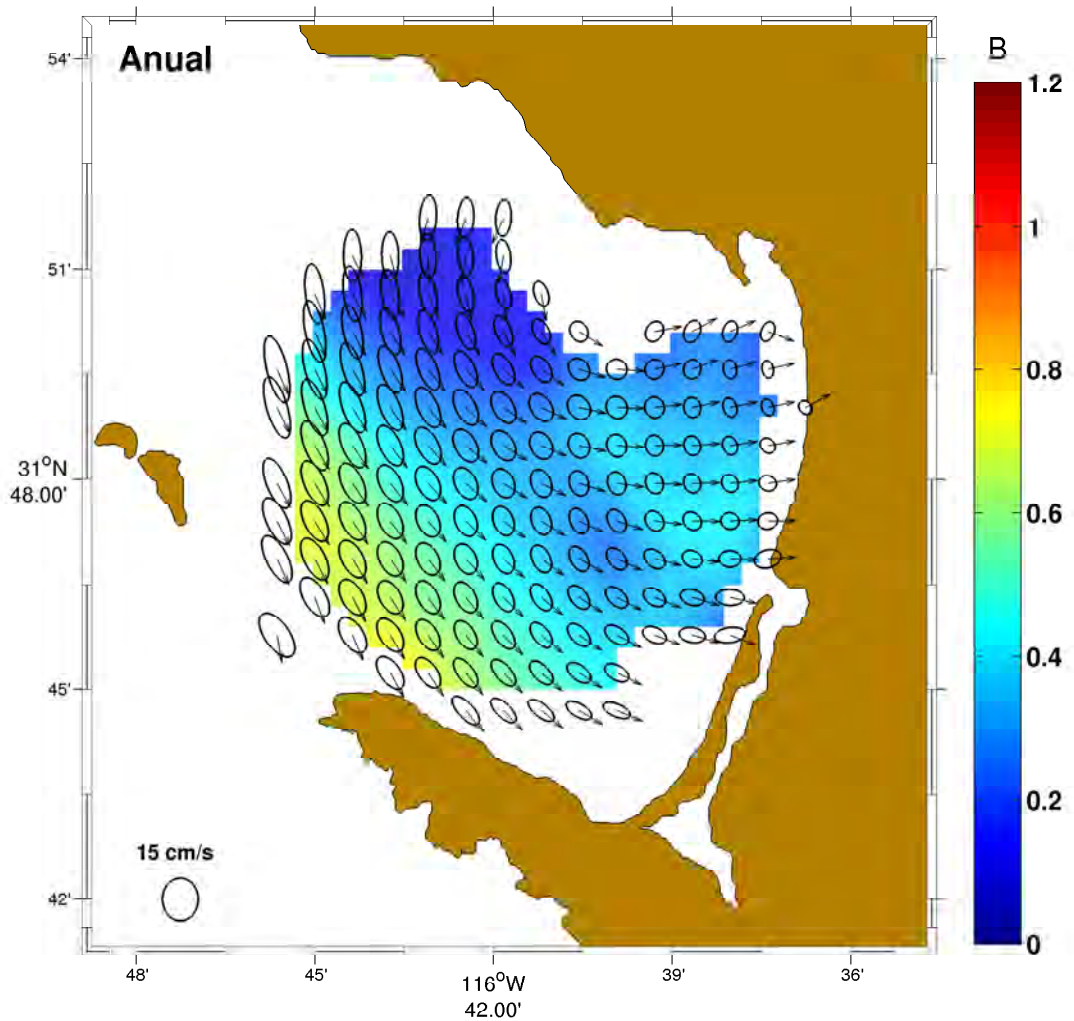


Figura 7.18: Elipses de variabilidad para las corrientes superficiales para el año 2010. La barra de colores representa a la magnitud de la corriente superficial en cada nodo normalizada con la desviación estándar de su eje de máxima variabilidad. Los vectores color negro representan la dirección de las corrientes superficiales.

Los valores promedio de los parámetros de las elipses de variabilidad obtenidos para el invierno fueron similares a los obtenidos en el análisis anual (figuras 7.7, 7.6 y tabla III). Como diferencia el parámetro β mostró la presencia de corrientes más débiles en las regiones NW, SW y SE durante el invierno, con la dirección del flujo de las corrientes en forma perpendicular a la orientación de la mayoría de las elipses de las regiones NW y SW. Este patrón de comportamiento fue generado por dos remolinos que se localizaron en estas zonas, los cuales generaron un aumento en la magnitud del flujo promedio en la región NE de la bahía con un índice β de ~ 0.4 . Aún así, el parámetro

β mostró un dominio de la variabilidad sobre la magnitud de la circulación superficial promedio durante el invierno.

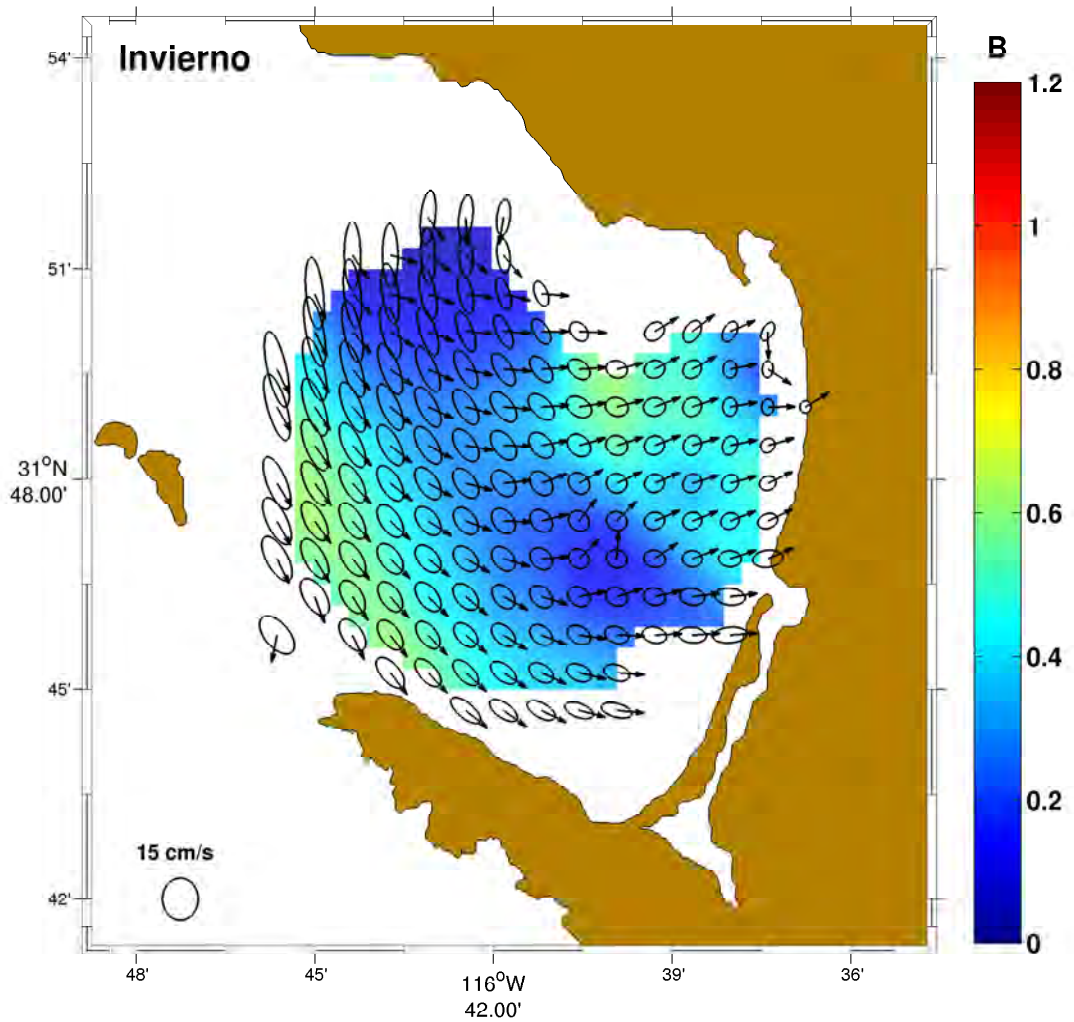


Figura 7.19: Elipses de variabilidad de las corrientes superficiales totales para la estación de invierno del año 2010, compuesta por los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre. La barra de colores representa a la magnitud de la corriente superficial en cada nodo normalizada con la desviación estándar de su eje de máxima variabilidad. Los vectores color negro representan la dirección de las corrientes superficiales.

Durante el verano (figura 7.20 y tabla III), el parámetro β presentó valores mayores a 1 en la región SW los cuales disminuyeron hacia la región NE de la bahía. Este comportamiento fue generado por un incremento en la magnitud promedio de las corrientes superficiales y un decremento de la desviación estándar del semieje mayor de las elipses de variabilidad en las regiones SW, SE y NW. En la región NE, el parámetro β y la excentricidad presentaron los valores más

bajos para esta zona en comparación con las demás estaciones del año. Este comportamiento es resultado de la presencia y constancia de un remolino ciclónico en esta región.

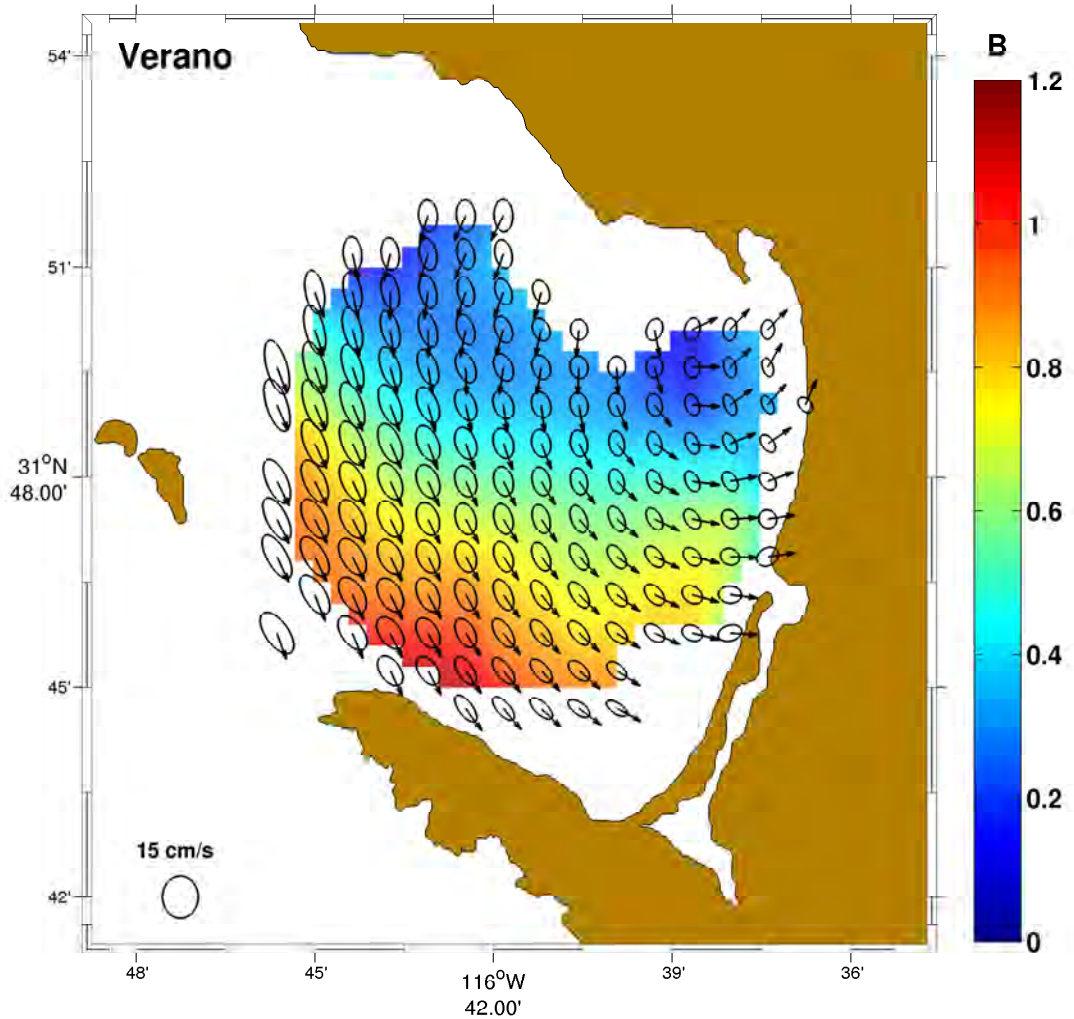


Figura 7.20: Elipses de variabilidad de las corrientes superficiales totales para la estación de verano del año 2010, compuesta por los meses de junio, julio, agosto y septiembre. La barra de colores representa a la magnitud de la corriente superficial en cada nodo normalizada con la desviación estándar de su eje de máxima variabilidad. Los vectores color negro representan la dirección de las corrientes superficiales.

El parámetro β mostró un marcado contraste estacional, con mayor variabilidad en la circulación superficial durante el invierno y menor durante el verano. Las estaciones de primavera y otoño fueron consideradas como periodos transicionales. Este mismo patrón de comportamiento fue registrado en los datos de viento de la estación meteorológica, lo cual sugiere que la corriente

superficial pudiera responder a las variaciones estacionales del viento de carácter sinóptico durante el verano y local durante el invierno.

Tabla III: Parámetros de las elipses de variabilidad y vectores promedio de la corriente superficial para cada región de la bahía durante las diferentes estaciones del año 2010. **Mag** representa a la magnitud promedio de la corriente superficial, **S_u** es el eje de mayor variabilidad, **S_v** el eje de menor variabilidad, **β** es la relación entre magnitud promedio de la corriente superficial con respecto a la desviación estándar del eje de mayor variabilidad, **π** indica la excentricidad de la elipse y **θ** el ángulo de inclinación.

		Mag (<i>cms</i> ⁻¹)	S_u (<i>cms</i> ⁻¹)	S_v (<i>cms</i> ⁻¹)	β	π	θ (°)
Región NW	Anual	4.24	16.05	7.38	0.26	0.46	-56
	Invierno	3.36	17.71	6.76	0.21	0.40	-55
	Primavera	7.65	11.25	4.47	0.71	0.40	-67
	Verano	5.33	9.00	6.31	0.61	0.70	-58
	Otoño	1.84	8.31	4.69	0.32	0.56	-70
Región NE	Anual	2.37	7.86	6.41	0.31	0.82	-18
	Invierno	3.02	8.13	6.00	0.38	0.75	23
	Primavera	4.38	6.15	4.17	0.73	0.68	-3
	Verano	1.37	6.95	4.58	0.34	0.66	-37
	Otoño	1.22	5.88	3.16	0.25	0.54	-11
Región SE	Anual	3.52	9.82	6.03	0.37	0.61	-25
	Invierno	2.00	9.80	6.10	0.23	0.62	-4
	Primavera	5.00	9.83	4.34	0.52	0.44	-2
	Verano	6.03	7.86	5.34	0.80	0.68	-36
	Otoño	1.33	6.58	3.67	0.32	0.56	-13
Región SW	Anual	7.91	13.86	7.78	0.56	0.56	-51
	Invierno	5.52	13.53	7.29	0.42	0.54	-46
	Primavera	9.66	11.73	9.04	0.85	0.77	-58
	Verano	11.58	10.58	7.30	1.09	0.69	-69
	Otoño	4.38	10.36	7.35	0.45	0.71	-46

7.2.3 Análisis espectral y coherencia

Fue aplicado un análisis espectral a los datos de la corriente superficial mediante el método del periodograma promedio de Welch con un intervalo de confianza del 95% (figura 7.21). Cada una de las series de tiempo que componen la malla de datos se dividió en 1, 2, 4 y 8 particiones para generar el análisis espectral. Posteriormente las series de tiempo fueron promediadas para formar un solo espectro representativo para la bahía.

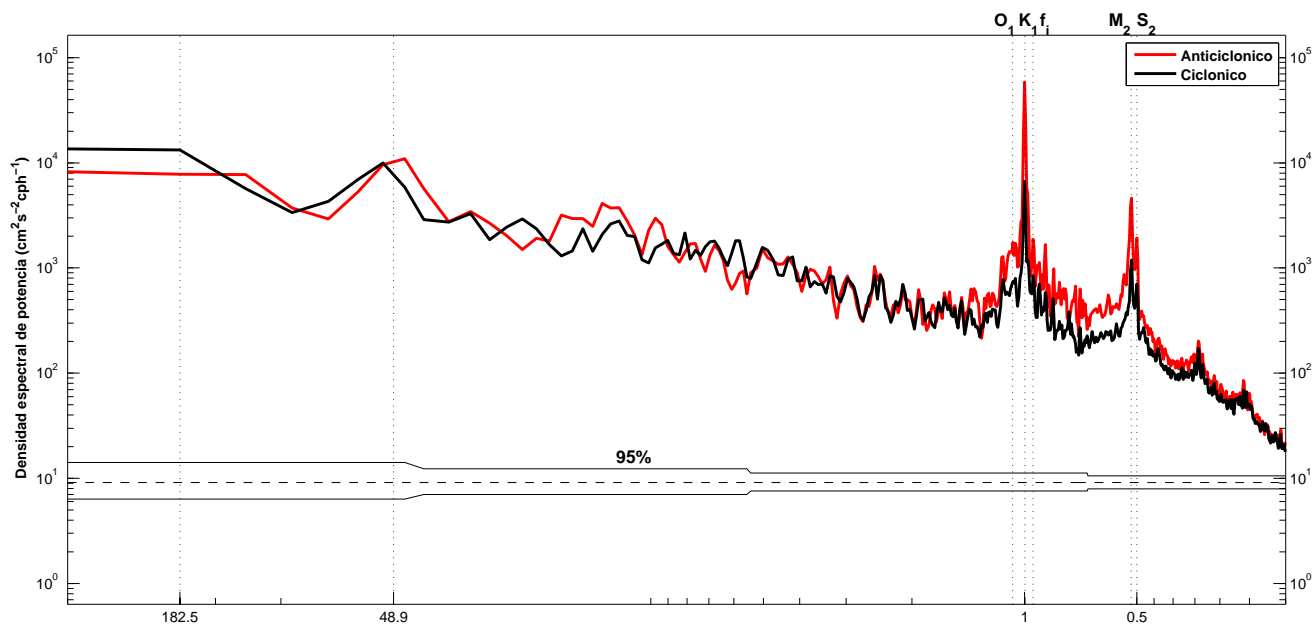


Figura 7.21: Densidad espectral de potencia para las corrientes superficiales. La línea color roja indica corrientes con sentido de rotación a favor de las manecillas del reloj, la línea negra indica un sentido de rotación en contra de las manecillas del reloj.

El espectro rotacional indica que las bandas más energéticas presentaron periodos diurnos (24 horas) y semidiurnos (12 y 12.4 horas), donde sobresalieron las que presentaron un sentido de rotación anticiclónico. Este mismo comportamiento fue registrado en el análisis espectral de los datos de viento de la estación meteorológica, donde las bandas con periodos de 24 y 12 horas con sentido de rotación anticiclónico fueron las más energéticas (figura 7.5). Ésto sugiere que la corriente superficial pudiera ser influenciada por procesos de viento con estos periodos. Otros forzante que presentan oscilaciones con periodos similares son la marea (componente de marea K_1

con periodo de 23.93 hrs, M_2 con periodo de 14.42 hrs y S_2 con periodo de 12 hrs) y los flujos inerciales (periodo de 22.77 horas), donde el periodo que corresponde a la componente de marea M_2 fue el segundo más energético en el análisis espectral.

Se utilizó un análisis de coherencia con 10 particiones y un límite de confianza del 95% (figura 7.22) para identificar las frecuencias en las que existe una mayor interacción entre los espectros rotacionales del viento y las corrientes superficiales. La figura 7.22 representa al promedio espacial de la coherencia, el cual se generó con la finalidad de obtener un valor de coherencia representativo para la bahía en cada periodo (o frecuencia). Este análisis mostró picos con coherencias significantes en los periodos de 1 día con sentido de rotación ciclónico y anticiclónico, y 2.43 y 18.25 días con sentido de rotación anticiclónico.

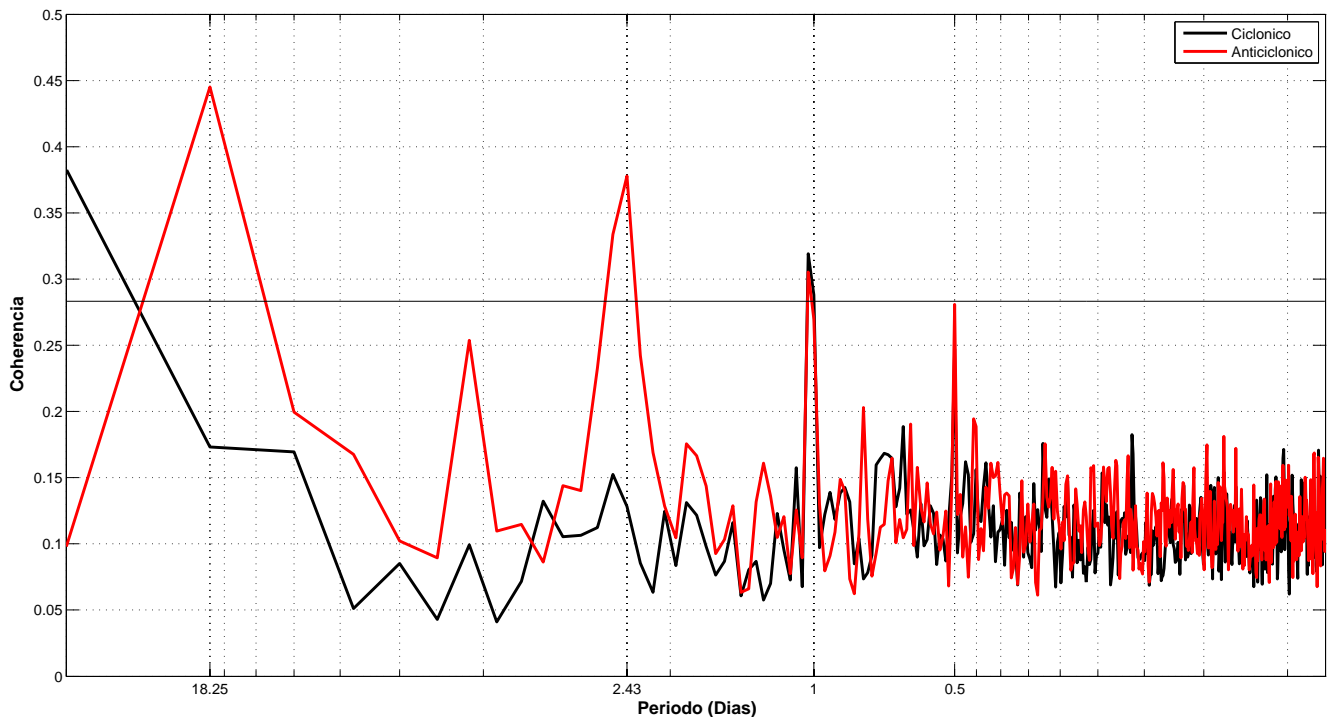


Figura 7.22: Coherencia espectral entre los espectros rotacionales del viento y las corrientes superficiales. La línea roja indica un sentido de rotación a favor de las manecillas del reloj, la línea negra indica un sentido de rotación en contra de las manecillas del reloj. La línea color negro representa al límite de confianza del 95%.

Enseguida se esquematiza la variación espacial de la coherencia con periodo de 1 día con sentido

de rotación ciclónico y anticiclónico (figuras 7.23 y 7.24). Los resultados mostraron coherencias significativas superiores a 0.4 y valores máximos de ~ 0.7 en las regiones W y SW de la bahía. En cuanto a las coherencias más bajas, éstas se presentaron en las zonas NW, NE y E. La baja coherencia en esta última región se presentó como una franja costera en las zonas someras que colindan con la barra del Estero de Punta Banda y Playa Hermosa.

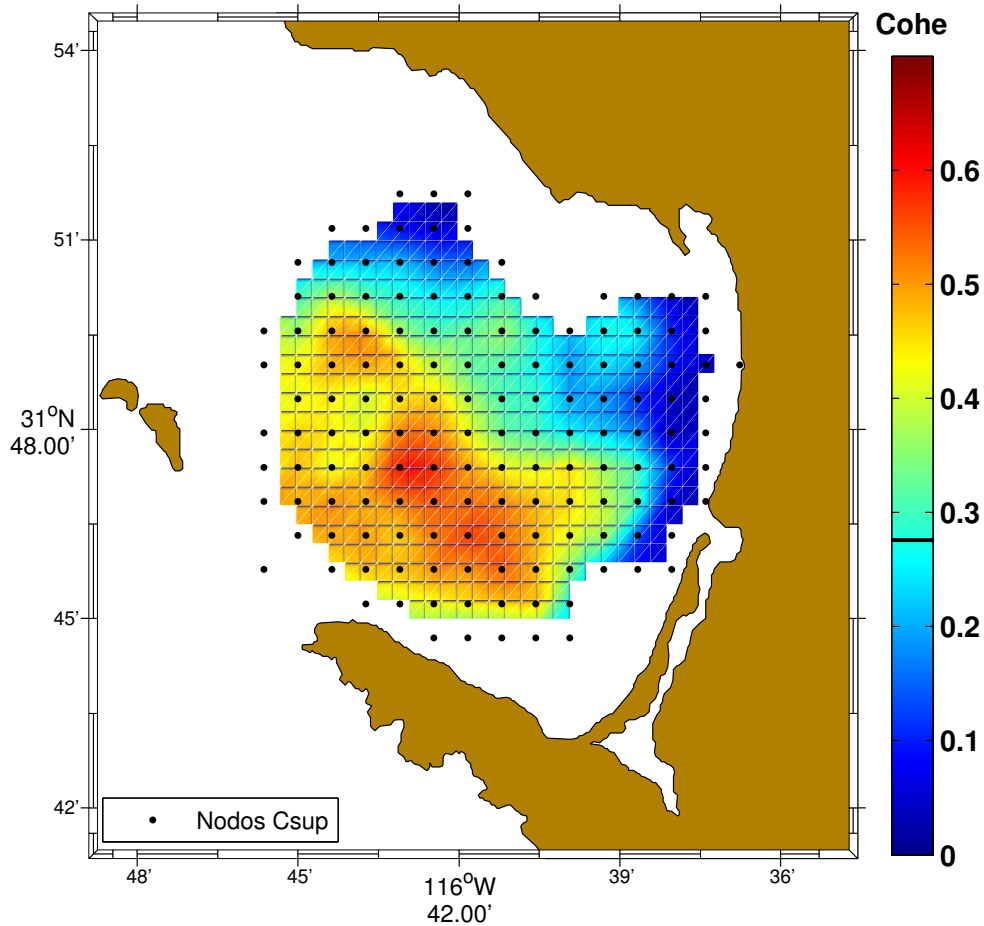


Figura 7.23: Variabilidad espacial de la coherencia con sentido de rotación ciclónico entre los espectros rotacionales del viento y las corrientes superficiales con periodicidad diurna. Los puntos color negro muestran la posición de los nodos de las corrientes superficiales. La línea color negro en la barra de colores muestra el límite de significancia.

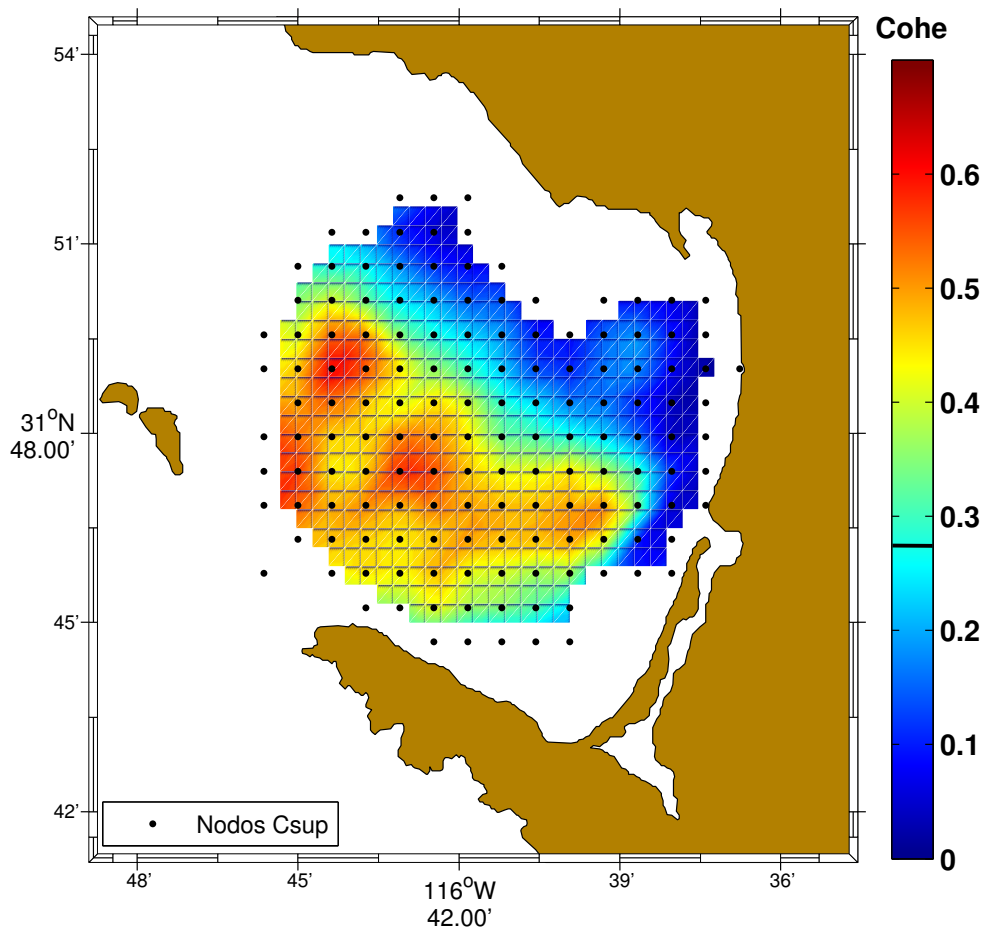


Figura 7.24: Variabilidad espacial de la coherencia con sentido de rotación anticiclónico entre los espectros rotacionales del viento y las corrientes superficiales con periodicidad diaria. Los puntos color negro muestran la posición de los nodos de las corrientes superficiales. La línea color negro en la barra de colores muestra el límite de significancia.

Los resultados de los espectros rotacionales y su coherencia indicaron que las corrientes superficiales con periodos diurnos y sentidos de rotación ciclónicos y anticiclónicos presentaron una amplitud y fase similar a los procesos de viento con periodicidad diaria en las regiones W y SW. Esto sugiere que el viento explica gran parte de la variabilidad de la circulación superficial en estas regiones.

7.2.4 Efecto del sistema de brisas y viento sinóptico sobre la variabilidad diurna de la circulación superficial

Con la finalidad de evaluar la variabilidad estacional del comportamiento diurno del viento y la corriente superficial, se realizó una comparación entre los días típicos de las variables antes mencionadas durante los meses de enero y agosto, los cuales fueron considerados como los meses representativos de las estaciones de invierno y verano. A continuación se muestran las diferencias entre los patrones de circulación que se generaron típicamente durante la noche en donde predominaron vientos débiles, y durante el día en donde se presentaron vientos con mayor magnitud.

En horas del día típico de enero con viento intenso (16 horas; figura 7.25), se observaron corrientes superficiales con un flujo predominante hacia el interior de la bahía con velocidades entre 15 y 25 cms^{-1} en la región W y velocidades de entre 5 y 15 cms^{-1} en la región E de la bahía. Del mismo modo, en horas del día típico del mes de agosto, existieron corrientes con un flujo predominante hacia dentro de la bahía. Estas corrientes sobrepasaron los 30 cms^{-1} en la región SW y disminuyeron su velocidad entre 5 y 15 cms^{-1} conforme se adentraron a la región SE.

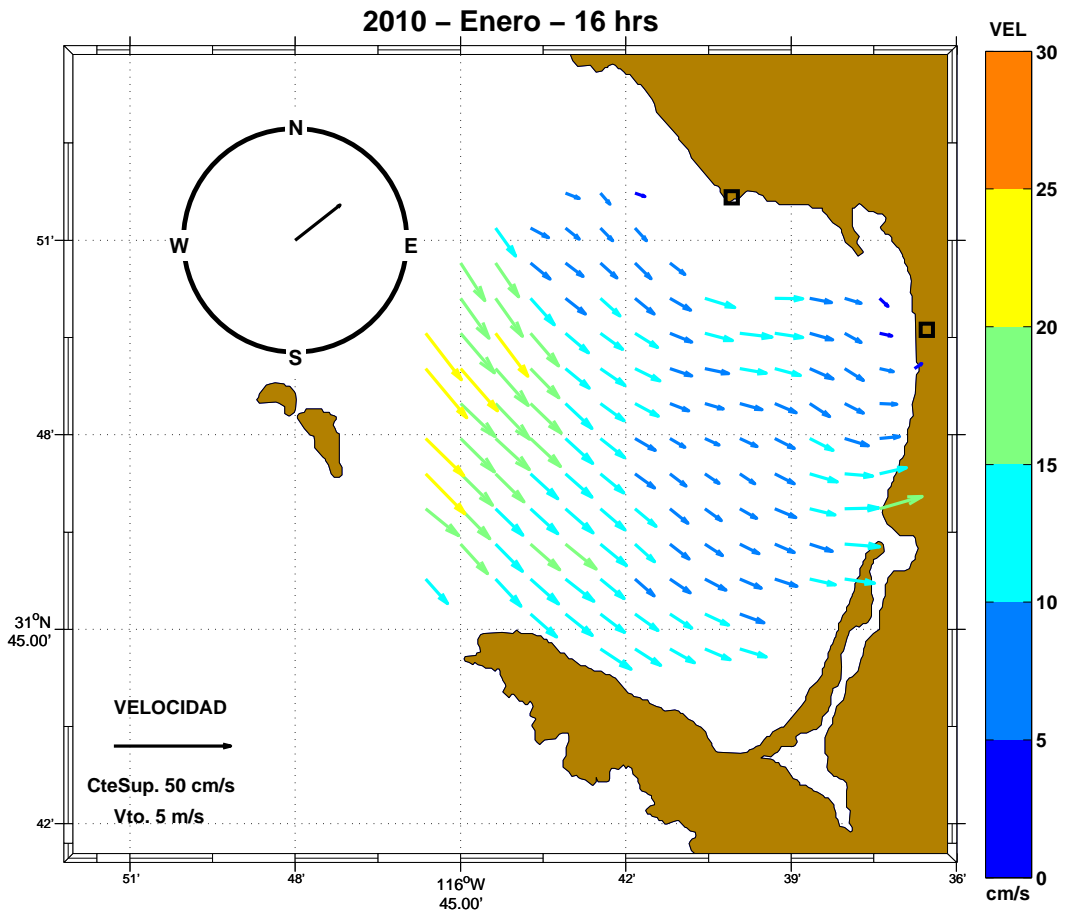


Figura 7.25: Representación de viento y corrientes superficiales típicas del mes de enero a las 16:00 horas.

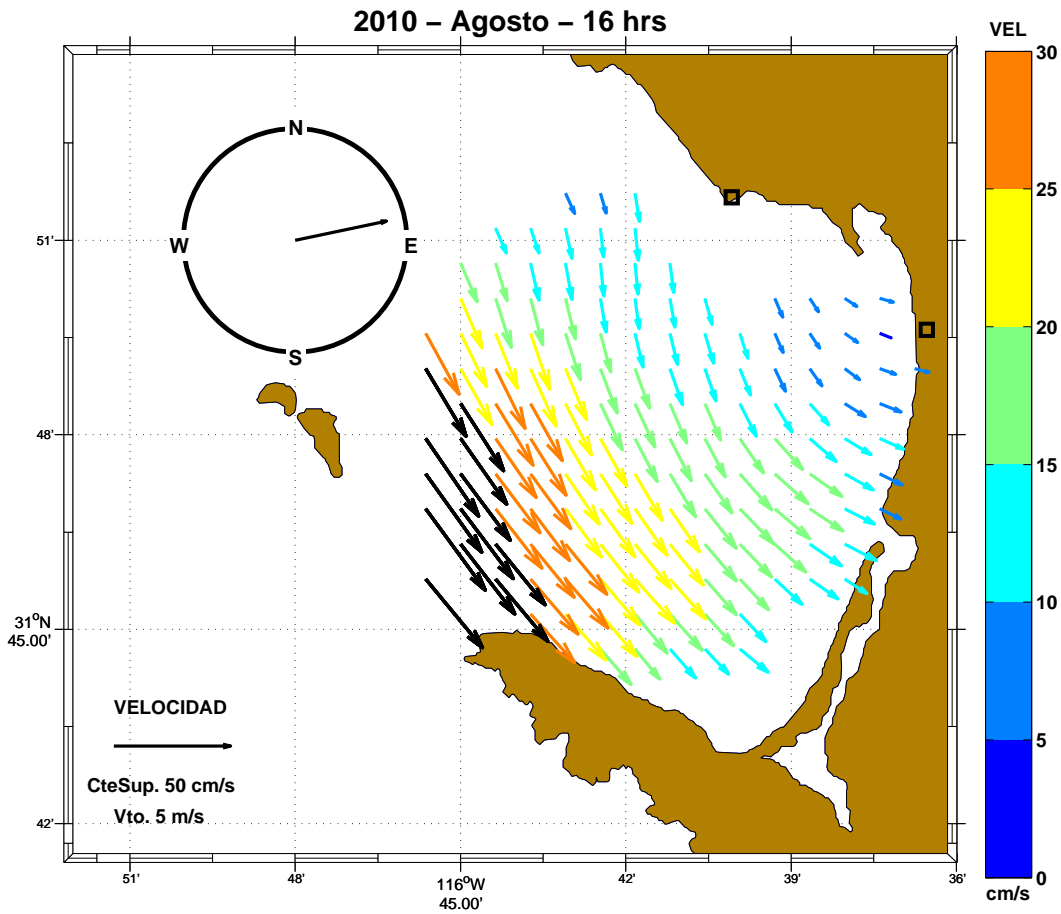


Figura 7.26: Representación de viento y corrientes superficiales típicas del mes de agosto a las 16:00 horas.

Durante la noche el comportamiento típico del mes de enero (figura 7.27) se caracterizó por presentar una corriente bien definida al oeste de la bahía, con velocidades de entre 0 y 15 cm s^{-1} con dirección al sur, y una corriente costera bien definida en la región este de la bahía, con velocidades de entre 0 y 10 cm s^{-1} con dirección al norte. Estas corrientes fueron generadas por la presencia de dos remolinos ciclónicos ubicados uno en la región central-norte de la bahía y otro en la región central-sur.

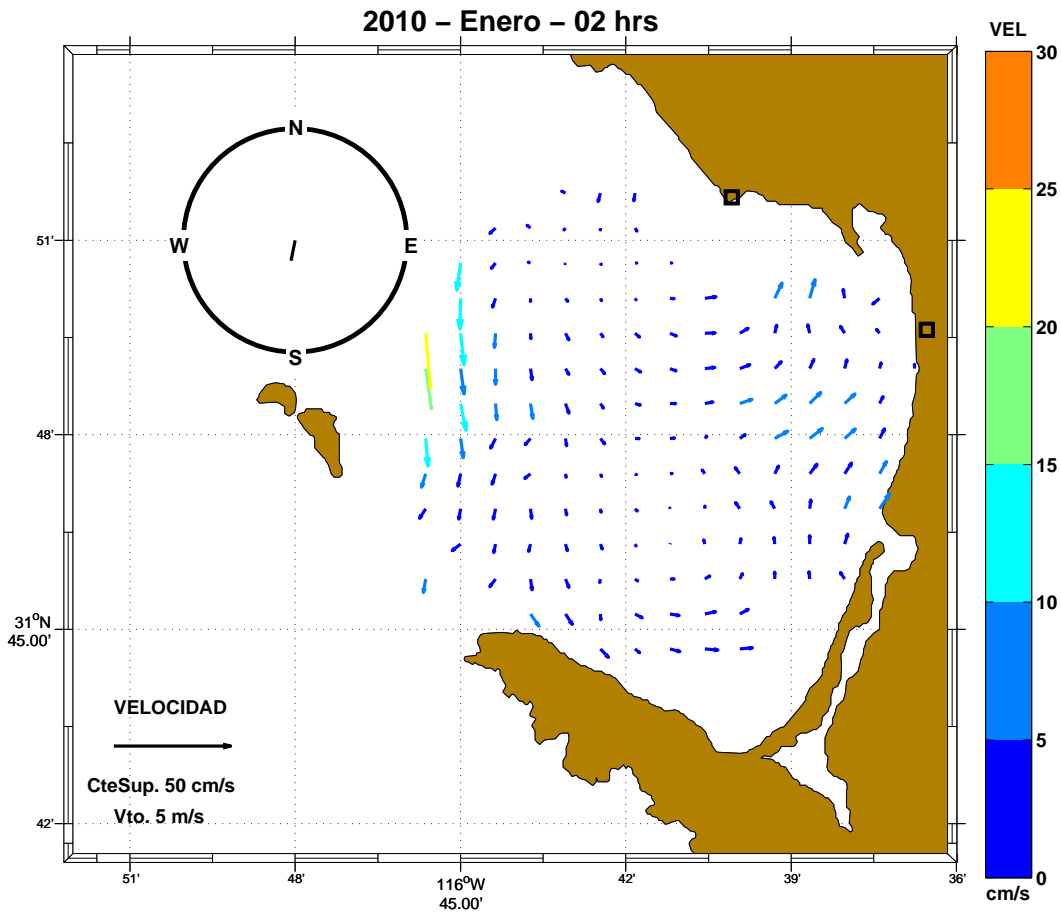


Figura 7.27: Representación de viento y corrientes superficiales típicas del mes de enero a las 02:00 horas.

Durante el mes típico de agosto, fue formado un remolino ciclónico en la región E de la bahía alrededor de las 21 horas, el cual se trasladó hacia fuera de la bahía con una velocidad de $\sim 43.5 \text{ cm s}^{-1}$ (figura 7.28). Este remolino formó una corriente costera estrecha en la región este de la bahía, la cual fue de mayor magnitud (entre 10 y 15 cm s^{-1}) que la corriente que se formó durante el invierno.

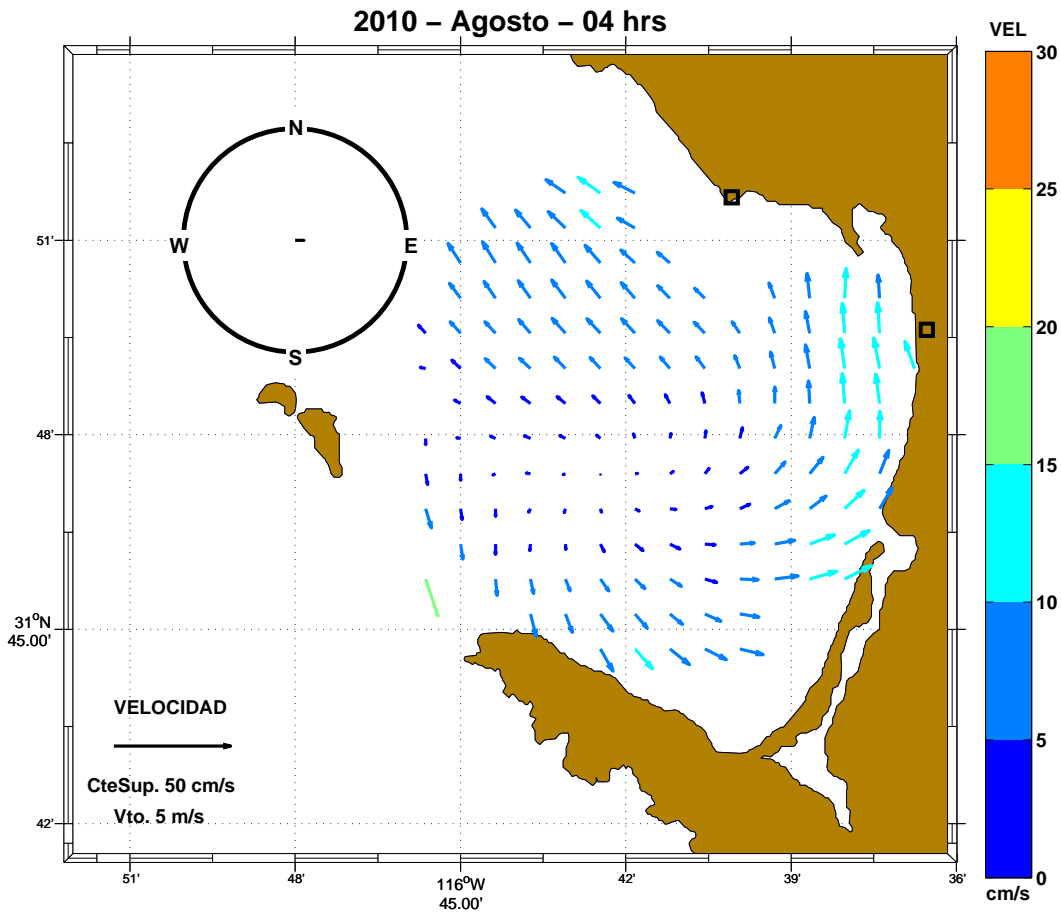


Figura 7.28: Representación de viento y corrientes superficiales típicas del mes de agosto a las 04:00 horas.

Las variaciones diurnas que presentaron el viento y las corrientes superficiales a lo largo de las estaciones del año se encuentran asociadas al sistema de brisas y al atenuamiento que este presenta por efecto de procesos de escala sinóptica. Los datos indican que el sistema de brisas fue más marcado durante la estación de invierno, donde se presentaron vientos con mayor intensidad hacia el continente durante el mediodía (entre las 11 y 17 horas del día) y vientos de menor intensidad hacia el mar durante la noche. Este comportamiento tuvo un efecto marcado en la circulación superficial, con corrientes hacia el interior de la bahía durante las horas con vientos de mayor intensidad y la formación de remolinos con corrientes bien definidas y de poca duración durante la noche.

Por otra parte, durante el verano el viento fue dominado por procesos sinópticos, esto favoreció la presencia de vientos intensos hacia el continente durante la mayor parte del día (entre las 9 y 19 horas) y vientos de menor intensidad pero persistentes en dirección durante la noche. La persistencia de la dirección del viento aunado a la presencia de vientos intensos durante gran parte del día, propicia un mayor dominio del viento sobre la circulación superficial diurna de la bahía.

No es claro que forzante domina sobre la dinámica superficial en ausencia del viento. Los análisis espectrales (sección 7.2.3) mostraron que las frecuencias de marea M_2 y S_2 generaron una variabilidad importante en cuando a la dinámica superficial de la bahía. Aún así, otros forzantes como el flujo medio de la Corriente de California o procesos inerciales pueden influir sobre la circulación superficial en ausencia del viento.

7.2.5 Correlación vectorial entre el viento y las corrientes superficiales

Con la finalidad de estimar la covarianza entre las velocidades totales entre el viento medido en Punta Morro y las corrientes superficiales dentro de la bahía, se aplicó una correlación vectorial entre la magnitud de las series de tiempo.

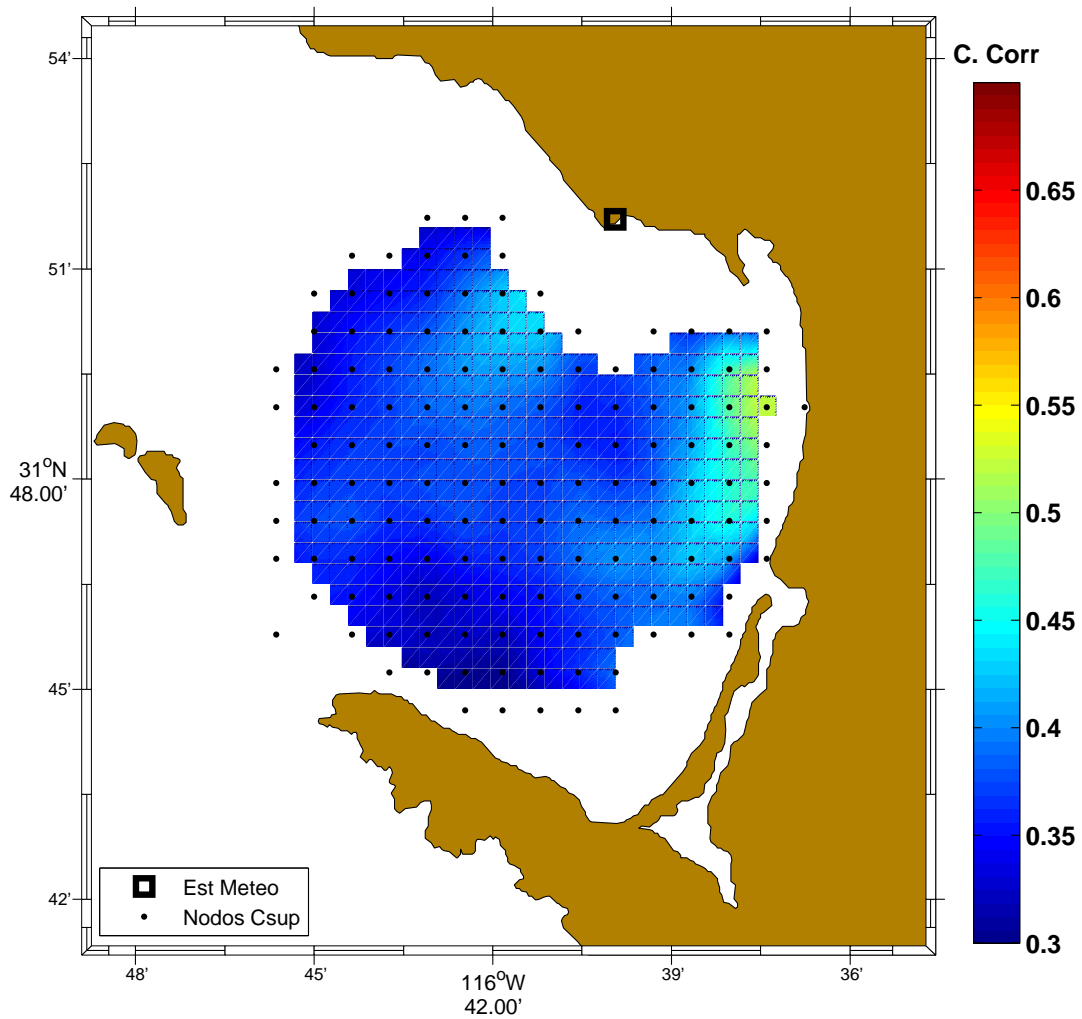


Figura 7.29: Correlación vectorial estacional entre el viento y las corrientes superficiales para el año 2010. La barra de colores indica el coeficiente de la correlación vectorial. Los puntos color negro muestran la posición de los nodos de las corrientes superficiales.

Tanto para los resultados de la correlación vectorial anual (figura 7.29), como para los resultados de las estaciones de invierno (figura 7.30) y verano (figura 7.31), la amplitud de la correlación fue mayor (entre 0.5 y 0.7) en la zona que se encuentra entre Punta Morro y la región ENE de la bahía, con un mejor acomplamiento entre las series de tiempo durante el verano.

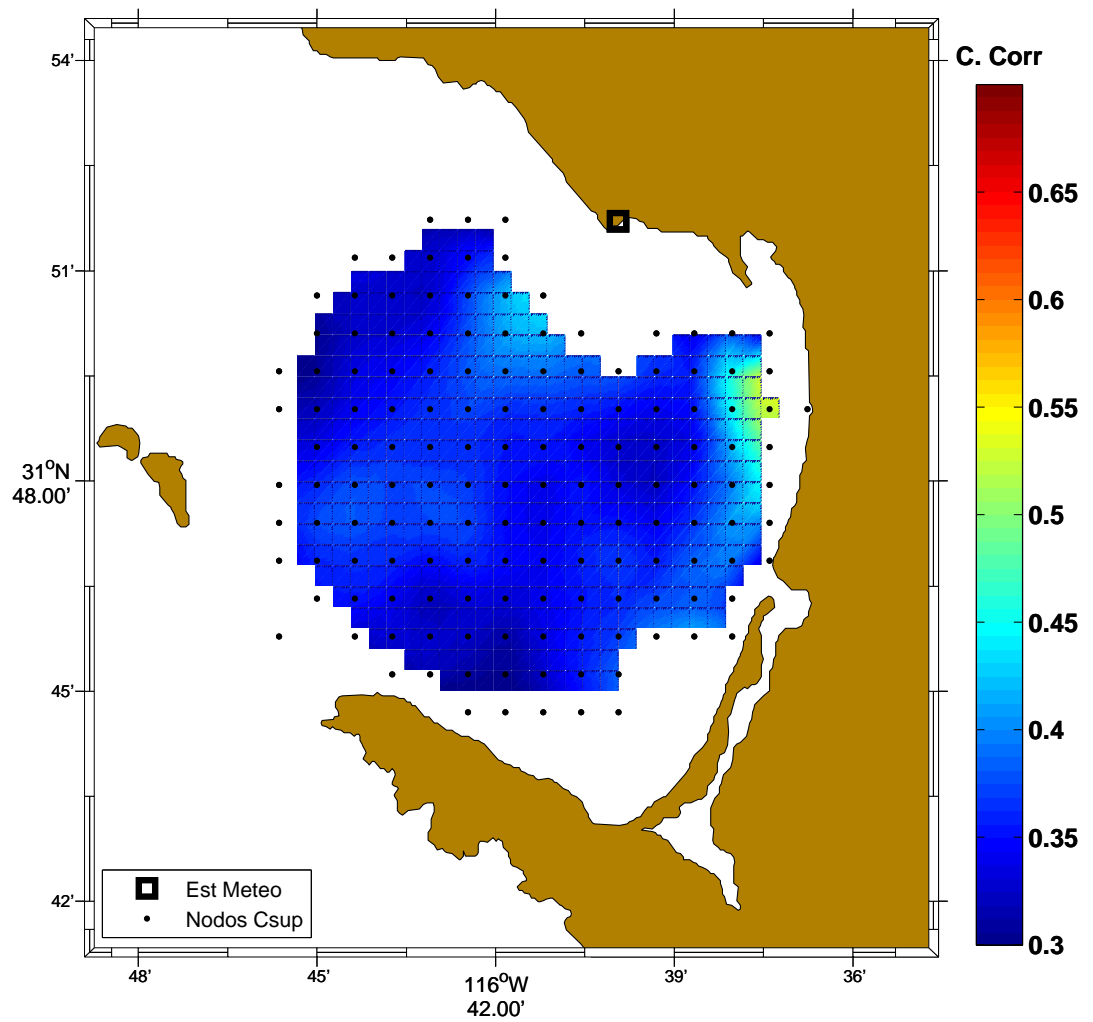


Figura 7.30: Correlación vectorial estacional entre el viento y las corrientes superficiales para la estación de invierno durante el año 2010. La barra de colores indica el coeficiente de la correlación vectorial. Los puntos color negro muestran la posición de los nodos de las corrientes superficiales.

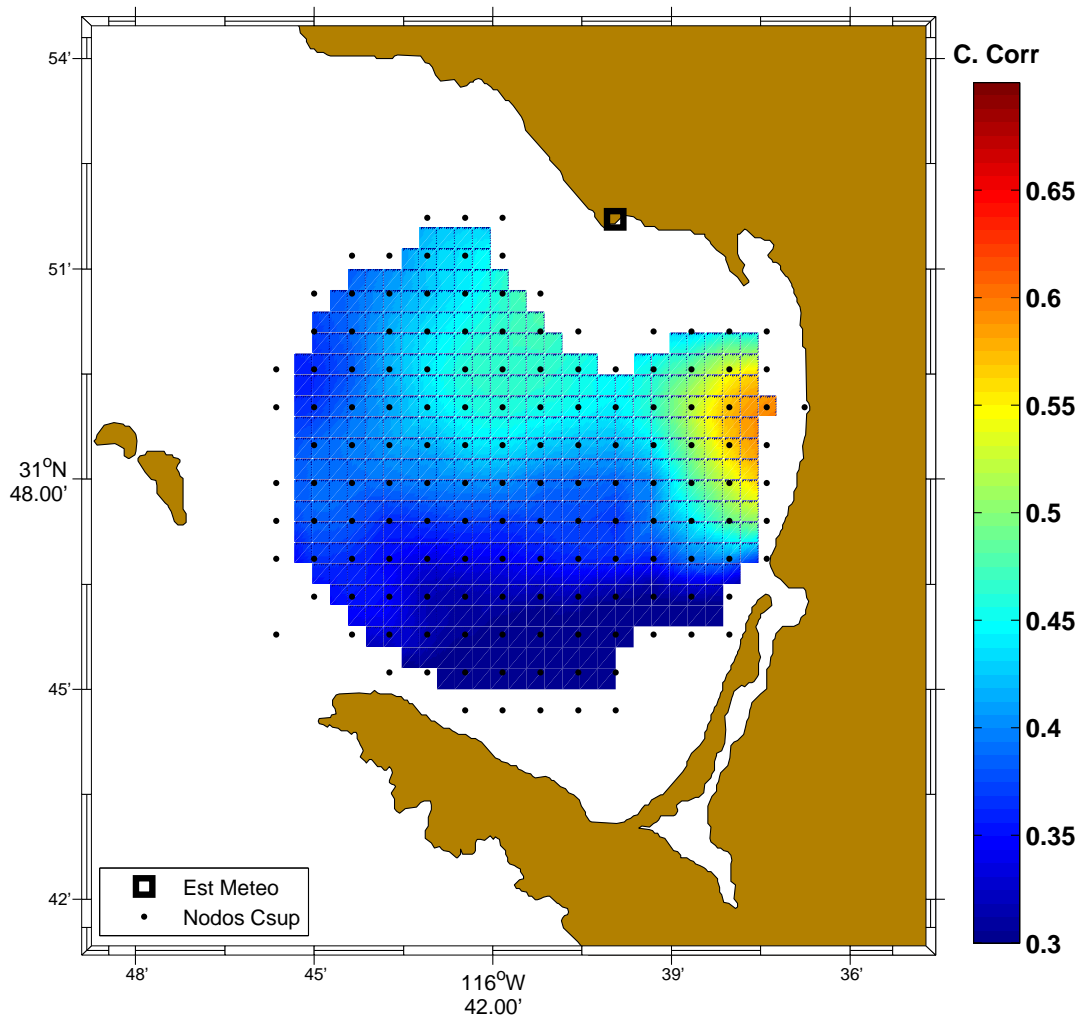


Figura 7.31: Correlación vectorial estacional entre el viento y las corrientes superficiales para la estación de verano durante el año 2010. La barra de colores indica el coeficiente de la correlación vectorial. Los puntos color negro muestran la posición de los nodos de las corrientes superficiales.

El análisis de coherencia (figuras 7.22, 7.23 y 7.24) mostró covarianzas significativas para la frecuencia diaria entre la serie de tiempo del viento y los nodos de las corrientes superficiales en las regiones oeste y central de la bahía. En cambio las regiones noreste y noroeste presentaron las correlaciones vectoriales más elevadas (~ 0.6). Aún así los análisis del comportamiento típico (sección 7.2.4) mostraron que las corrientes superficiales presentaron una notable respuesta sobre el efecto del viento con periodicidad diaria dentro de la bahía.

Los resultados de la coherencia espectral y la correlación vectorial sugieren que el viento que

interactúa en el interior de la bahía presenta una marcada periodicidad diurna. Del mismo modo, este comportamiento ocurre en las corrientes superficiales. Como se mencionó en la sección 7.2.2, la región NE de la bahía es la que presenta una mayor variabilidad en cuanto a la dirección de los flujos de las corrientes. Con base en lo anterior, se propone que las características batimétricas y la morfología de la zona generan modificaciones no lineales en la dirección de las corrientes superficiales, lo que explicaría la baja coherencia y la alta correlación vectorial en esta región de la bahía.

7.2.6 Análisis armónico

Con el propósito de estimar que porcentaje de la variabilidad de las corrientes superficiales fue generado por efecto de las corrientes de marea, se realizó un análisis armónico basado en las frecuencias de los principales constituyentes de la marea astronómica.

El análisis armónico mostró que durante el año 2010 (figura 7.32), la variabilidad de las corrientes totales de los nodos que se encontraron en zonas con profundidades menores a 10 m, y en particular los cercanos a la boca del Estero de Punta Banda y al Puerto de Ensenada, fueron los más influenciados por los procesos de marea ($\sim 12\%$). Las regiones con profundidades de entre 10 y 25 m con pendientes pronunciadas presentaron una variabilidad explicada por la marea del $\sim 5\%$, mientras que al W y en la región central de la bahía el porcentaje de variabilidad por efecto de la marea fue de $\sim 3\%$. Las zonas cercanas a la Península de Punta Banda y al NW de la bahía presentaron porcentajes de variabilidad del 2%. Este comportamiento fue similar durante las estaciones del año.

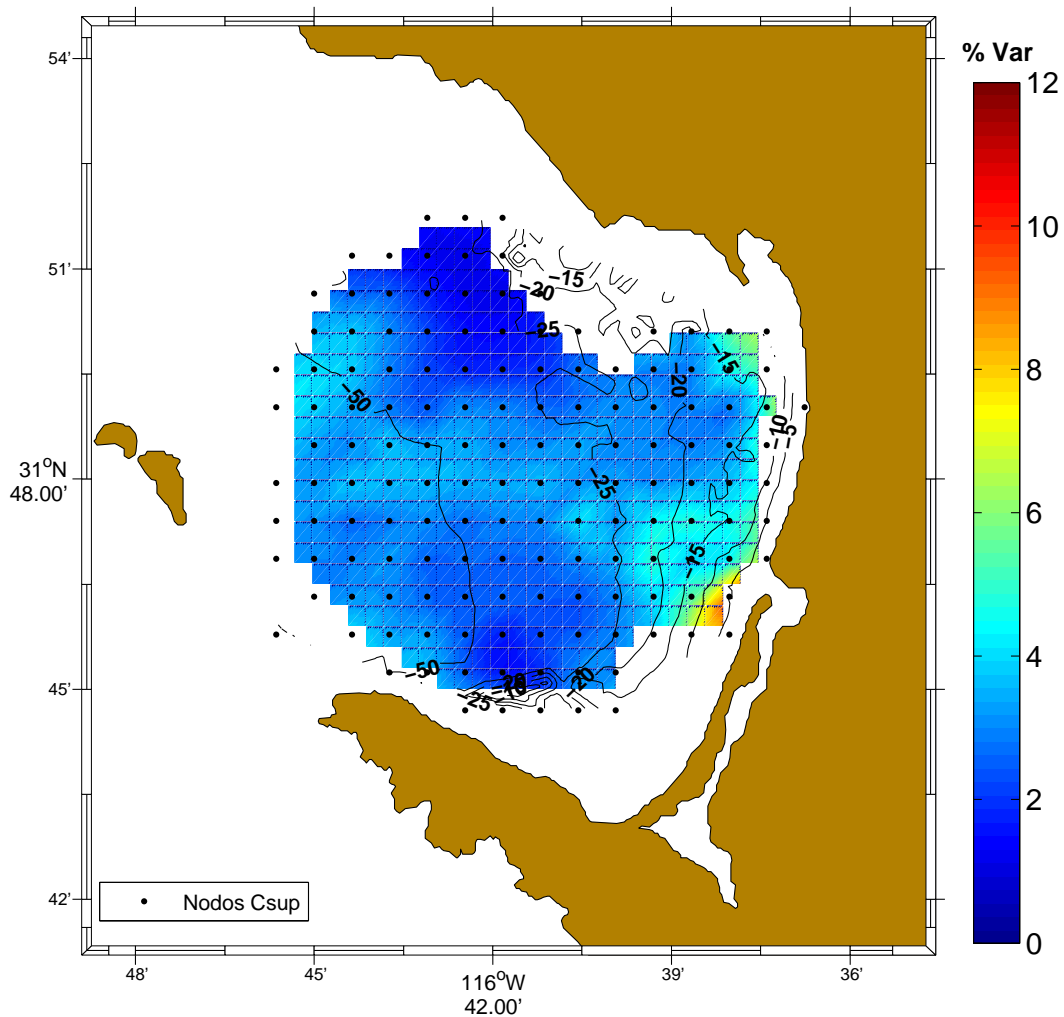


Figura 7.32: Porcentaje de la variabilidad de la corriente superficial explicada por la marea para el año 2010. La barra de colores indica el porcentaje de la variabilidad total de la circulación superficial que es explicada por la corriente de marea. Los contornos color negro hacen referencia a la batimetría de la bahía (m). Los puntos color negro muestran la posición de los nodos de las corrientes superficiales.

8 Discusión

8.1 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 Álvarez-Sánchez (1977), Pares-Sierra (1981) y Reyes *et al.* (1983). Este comportamiento fue más marcado durante el invierno. Durante el verano los vientos fueron más

intensos y persistentes en dirección durante la mayor parte del día (figura 7.2) debido a que el viento sinóptico generó modificaciones sobre el viento local.

El análisis de densidad espectral de potencia con un intervalo de confianza de 95%, mostró que en la estación Punta Morro los vientos con peridiocidad diurna son los más energéticos, este comportamiento fue reportado por Reyes *et al.* (1982) y Pavía y Reyes (1983).

8.2 Corrientes superficiales

Se observó que tanto en el promedio anual como en los promedios estacionales de la corriente superficial, existió un flujo predominante hacia el interior de la bahía, con corrientes más intensas en la región W y mas débiles en la región E. Del mismo modo se observó que durante la mayor parte del año los valores máximos de la temperatura superficial se encontraron en la región E, principalmente en las zonas cercanas al Puerto de Ensenada.

Los datos sugieren que existe un flujo que entra por la región NW de la bahía (paralelo a la Península de Punta Banda) con dirección al SE, el cual cambia su dirección hacia el NE (paralelo al Estero de Punta Banda) por efecto de la morfología costera. Este comportamiento propicia la formación de un remolino ciclónico en la región NE de la bahía donde la magnitud de la corriente superficial es menor.

El flujo promedio estacional durante el invierno mostró una corriente bien definida en la región NW hacia el interior de la bahía, la cual presentó una bifurcación y generó una corriente que continuó hacia al SE y una corriente con dirección hacia el Puerto de Ensenada. Estas corrientes fueron producto de la interacción de un remolino ciclónico al NW de la bahía y un remolino

anticiclónico al E, frente a Playa Hermosa y el Estero de Punta Banda (figura 8.34).

Con base en simulaciones numéricas, otros autores han propuesto diferentes patrones de comportamiento en la circulación superficial en la Bahía Todos Santos. Argote y colaboradores (1991) reportaron que los flujos más intensos son corrientes costeras, que durante el invierno fluyen desde el Estero de Punta Banda hacia Punta San Miguel, mientras que en verano el flujo es en sentido contrario. Esta corriente costera con dirección hacia el S de la bahía fue registrada por los radares de alta frecuencia durante los meses que componen la estación de invierno y otoño, la cual fluye desde la zona del Puerto de Ensenada hacia el S de la boca del Estero de Punta Banda. La corriente que fluye hacia el N de la bahía identificada por Argote y colaboradores ha sido reportada por Álvarez-Sánchez *et al.* (1988) y Durazo y Álvarez-Sánchez (1988). En experimentos recientes con boyas a la deriva realizados por el grupo OCOMEX (Observatorio de Corrientes Oceánicas Mexicanas) se detectaron corrientes costeras con dirección hacia el N en las zonas de la Barra del Estero de Punta Banda y la región NE de la bahía, entre Playa Hermosa y Punta Morro. Los radares de alta frecuencia parecen no identificar claramente los patrones cercanos a la costa debido a la configuración de su arreglo. Aún así, los radares de alta frecuencia permiten generar mediciones simultáneas de la corrientes superficiales con una mayor cobertura en tiempo y espacio, a diferencia de las boyas de deriva o los corrientímetros estacionarios.

Durante el invierno, Mateos (2010) reportó la presencia de remolinos anticiclónico frente a San Miguel y en la boca sur de la bahía, así como un remolino ciclónico frente al Puerto de Ensenada, lo que dió lugar a una corriente bien definida entre los dos remolinos con dirección hacia la Península de Punta Banda. En cambio, los resultados obtenidos con los radares de alta frecuencia mostraron una corriente bien definida a lo largo de la bahía con dirección al E. Durante la estación de verano,

los resultados de Mateos (2010) mostraron un remolino ciclónico que cubrió la mayor parte de la bahía, con su centro en las cercanías del Puerto de Ensenada. Este resultado fue consistente con los obtenidos por los radares de alta frecuencia.

La corriente superficial presentó una marcada variación espacio-temporal dentro de la bahía. Se observó que durante el invierno (figura 7.19) la variabilidad de las corrientes dominó sobre la circulación promedio, comportamiento que fue más marcado en las regiones NW y SE de la bahía. Durante el verano (figura 7.20), la variabilidad dominó en la mayor parte de la bahía, con excepción de la región SW. Aún así, el parámetro β mostró que las corrientes superficiales fueron más variables durante el invierno que durante el verano. Este comportamiento pudo ser generado por efecto del viento, el cual presentó variaciones estacionales similares en su comportamiento (figura 7.2). Con base en lo anterior, se proponen los siguientes patrones de circulación superficial para las estaciones de invierno y verano (figuras 8.34 y 8.33).

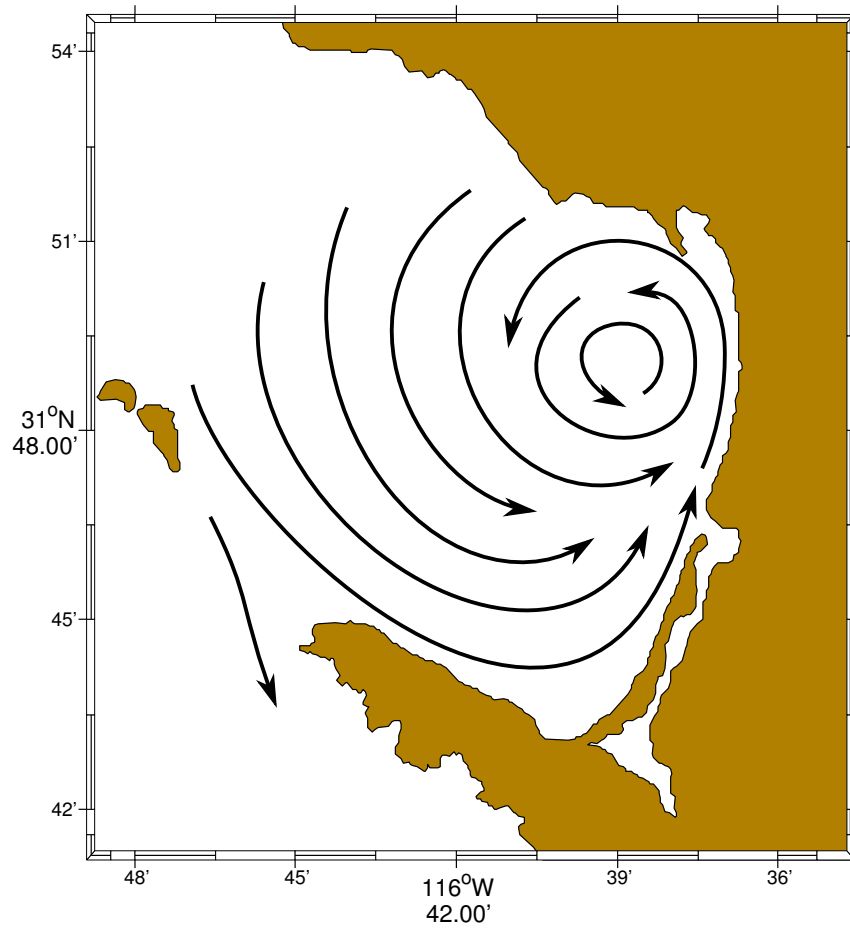


Figura 8.33: Patrón de circulación propuesto para la circulación superficial en la Bahía Todos Santos para el verano

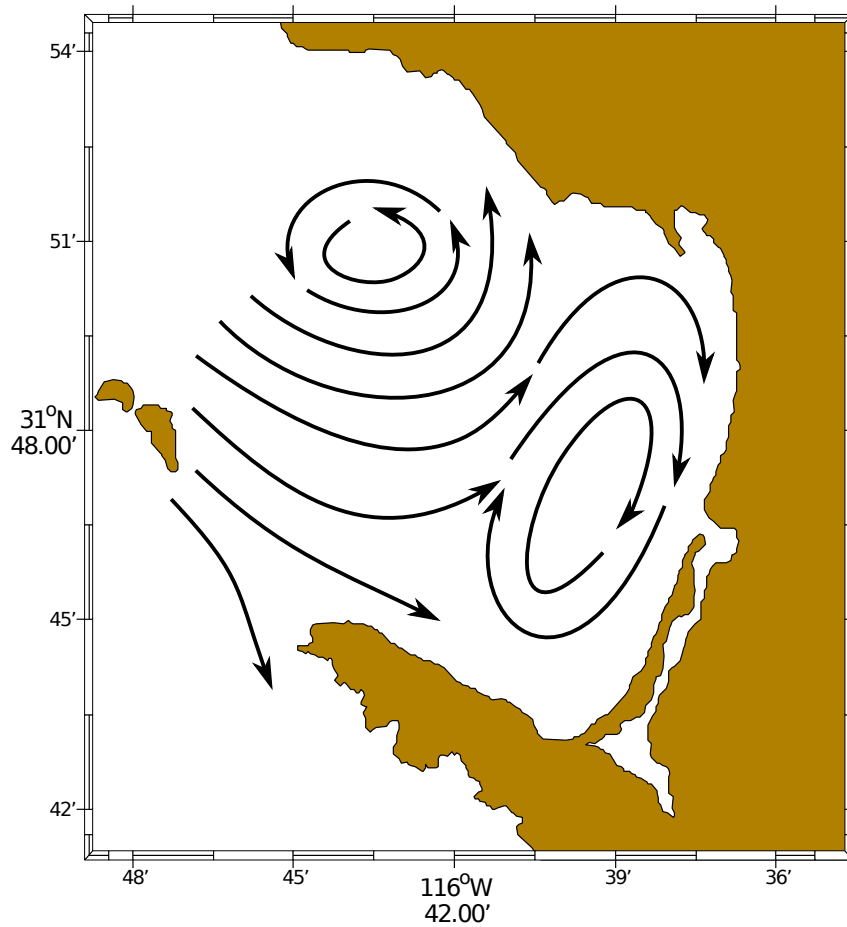


Figura 8.34: Patrón de circulación propuesto para la circulación superficial en la Bahía Todos Santos para el invierno

El análisis espectral mostró que las bandas más energéticas fueron las que presentaron periodos diurnos (24 horas) y semidiurnos (12.04 y 12 horas; figura 7.21). Este mismo comportamiento se observó en los resultados del análisis espectral del viento, en donde las bandas con mayor energía presentaron periodos diurnos (24 horas) y semidiurnos (12 horas). Estos resultados sugieren que corrientes superficiales con estos periodos pueden ser influenciadas por el viento. Cabe considerar que existen otros procesos físicos que oscilan con periodos similares a los antes mencionados, tales como las componentes de marea K_1 (23.93 horas), M_2 (14.42 horas) y S_2 (12 horas) y el periodo inercial (22.77 horas).

Un análisis de coherencia mostró que los mayores índices de la covarianza entre los espectros rotacionales de las corrientes superficiales y el viento presentaron una periodicidad diurna en las regiones oeste y central de la bahía. En cambio la correlación vectorial entre la magnitud total del viento y las corrientes superficiales mostró que los nodos que presentaron mayor covarianza se encontraron en las regiones NW y NE de la bahía, zonas en donde se encuentran los nodos más cercanos a la estación meteorológica. Esto sugiere que el viento que fluye dentro de la Bahía Todos Santos fue variable espacialmente, aunque del mismo modo fue dominado por procesos diurnos. Los nodos de las corrientes superficiales que se localizan frente al Puerto de Ensenada presentaron modificaciones en la dirección de los flujos con periodicidad diurna, tal como se observó en los análisis de coherencia (figuras 7.24 y 7.23). Estas modificaciones en la dirección de las corrientes pudieron ser generadas por efecto de la batimetría, la línea de costa.

En general el comportamiento diurno del viento y la corriente superficial, mostró que el viento tuvo una mayor influencia sobre el comportamiento de las corrientes durante el día (brisas o viento local), cuando el viento sopla de mar a tierra. Durante el invierno el efecto del viento se presentó entre las 11 y las 17 horas, mientras que durante el verano el viento dominó sobre la circulación superficial entre las 9 y 19 horas del día. Estos resultados indican que el viento influye tanto en las variaciones del comportamiento estacional como en las variaciones del comportamiento diurno de la corriente superficial dentro de la bahía.

El análisis armónico indicó que en los nodos cercanos a la boca del Estero de Punta Banda las corrientes superficiales son más susceptibles a la influencia de la marea debido al flujo y reflujo que se genera por los cambios en el nivel del mar ($\sim 12\%$ de la variabilidad). Del mismo modo se observó que las corrientes en los nodos que se encuentran a menos de 15 *m* de profundidad presentaron una

importante influencia por los cambios de marea. En el resto de la bahía la variabilidad explicada por la marea fue de entre el 2% y 4%.

Se recomienda realizar estudios enfocados a eventos de marea con y sin viento con la finalidad cuantificar el efecto de las mareas sobre la circulación superficial en una menor escala temporal, así como el de otros procesos físicos que puedan generar variabilidad sobre la circulación superficial en la bahía.

9 Conclusiones

Los patrones de circulación superficial obtenidos mediante radares de alta frecuencia en la Bahía Todos Santos, presentaron un flujo predominante hacia el interior, con corrientes de mayor intensidad en la región W. En las regiones E y NE de la bahía se encontraron las corrientes de menor intensidad pero con mayor variabilidad en dirección. En Estas zonas se observaron valores más altos de la temperatura superficial, lo que permitio inferir que el agua tiende a permanecer más tiempo en estas regiones.

La corriente superficial presentó una mayor variabilidad durante la estación de invierno, mientras que durante el verano fue más estable.

Se observó que la circulación superficial dentro de la bahía responde notablemente tanto a las variaciones estacionales del viento como a las variaciones diurnas que este presenta, con una mayor influencia durante el día cuando el viento sopla de mar a tierra.

Por otra parte, la morfología de la bahía juega un papel importante en cuanto a modificaciones de la dirección y la magnitud de las corrientes superficiales.

10 REFERENCIAS

- Álvarez-Sánchez, L. G., 1971. Medición de corrientes superficiales en la Bahía de Todos Santos, B. C. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. 54 pp.
- Álvarez-Sánchez, L. G., 1971. Vientos en la Bahía Todos Santos, Baja California. *Ciencias Marinas*. 4, 81-89.
- Álvarez-Sánchez, L. G., R. Hernandez Walls y R. Durazo-Arvizu, 1988. Patrones de deriva de trazadores lagrangeanos en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*. 14, 135-162.
- Argote-Espinoza, M. L., F.J. Gavidia-Medina, A. Amador-Buenrostro, 1991. Wind induced circulation in Todos Santos Bay, B. C. Mexico. *Atmósfera*. 4, 101-115.
- Castro R, A. Mascarenhas, A. Martínez, R. Durazo And E. Gil-Silva, 2006. Spatial influence and oceanic thermal response to Santa Ana events along the Baja California peninsula. *Atmósfera*. 19, 195-211.
- Castro R, A. Martínez, 2010. Variabilidad espacial y temporal del campo de viento. En: Gaxiola-Castro G, Durazo R (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. 129-147.
- 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 Maestría. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. 98 pp.
- Durazo-Arvizu, R. y L. G. Álvarez Sánchez., 1988. Cinemática de la región sur de la Bahía de Todos Santos, B. C. *Ciencias Marinas*. 14, 95-114.
- Emery, J. W., R. E. Thompson, 1998. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon. 634 pp.
- 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.

Gil-Silva, E., O. Delgado-González, A. Mejía-Trejo, R. Castro-Valdez, F. Domínguez-Preciado, 2010. Informe de datos meteorológicos de la estación Punta Morro, Ensenada, B. C., Reporte Técnico IIO. 40 pp.

Godin, G., 1988. Tides. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 290 pp.

Giffard-Mena, I., 1997. Variación del fitoplancton con relación a las aguas residuales en la Bahía Todos Santos, B. C. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. 53 pp.

Harlan, J., E. Terrill, L. Hazard, C. Keen, D. Barrick, C. Whelan, S. Howden, J. Kohut, 2010. The integrated ocean observing system high-frequency radar network: Status and local, regional and national applications. *Marine Technology Society Journal*. 44, 122-132.

Hayashi, Y., 1997. Space-time spectral analysis of rotary vector series. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 36, 757-766.

Hisaki, Y., sometido en 2003. Development of HF ocean radar in Japan. The International conference on Radar, IEEE. 510-514 pp.

Lipa B., D. E. Barrick, 1983. Least-squares methods for the extraction of surface currents from CODAR crossed-loop data: Application at ARSLOE. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 8, 226-253.

Lynn, R., J. Simpson, 1987. The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*. 90, 12,947-12,966.

Mateos, E., S. G. Marinone, A. Parés-Sierra, 2009. Towards the numerical simulation of the summer circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, B. C. Mexico. *Ocean Modelling*. 27, 107-112.

Pavía, E., S. Reyes, 1983. Variaciones espaciales y estacionales del viento superficial en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*. 9, 151-167.

- 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.
- Pérez-Brunius, P., M. López, A. Parés-Sierra y J. Pineda, 2007. Comparison of upwelling indices off Baja California derived from three different wind data sources. *CalCOFI Rep.* 48, 204-214.
- Reyes, S., G. Vogel, E. Pavía, A. Parés, 1983. Synoptic effects on the local winds in Todos Santos Bay: A case study. *Monthly Weather Review.* 111, 1494-1500.
- Sierra-Carrascal, E., 2003. Influencia de las brisas en las corrientes superficiales a lo largo de la zona costera oceánica entre Rosarito, B. C., México y Punta Loma, California, EUA. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. Tesis de Licenciatura, 79 pp.
- Sosa-Ávalos, R., G. Gaxiola-Castro, R. Durazo, B. G. Mitchell, 2005. Efecto de los vientos Santa Ana en las propiedades bio-ópticas frente a Baja California. *Ciencias Marinas.* 31, 339-348.
- Trasviña, A., M. Ortiz-Figueroa, H. Herrera, M. A. Cosío, E. Gonzalez, 2003. Santa Ana winds and upwelling filaments off Northern Baja California. *Dynamics of Atmospheres and Oceans.* 37, 113-129.