

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS COHERENTES LAGRANGEANAS
PRESENTES EN LA BAHÍA TODOS SANTOS, BAJA CALIFORNIA, CON
INFORMACIÓN OBTENIDA DE RADARES DE ALTA FRECUENCIA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
O C E A N Ó L O G O
PRESENTA:

LUIS DANIEL QUINN CERVANTES

ENSENADA, B. C., SEPTIEMBRE DE 2015

Resumen

Las Estructuras Coherentes Lagrangianas (ECL) son un concepto que ofrece una manera diferente de entender el transporte en flujos complejos. Las ECL ayudan a identificar líneas materiales, atrayentes o repulsivos, que actúan como barreras para delimitar regiones con diferente comportamiento. Su localización permite estudiar el transporte de una forma más simple que el estudio directo de trayectorias de partículas. El objetivo del trabajo es utilizar el método del Exponente de Lyapunov de Tiempo Finito (ELTF) para identificar las ECL presentes en la Bahía Todos Santos (BTS) con campos de velocidades superficiales obtenidos de mediciones con Radares de Alta Frecuencia (RAF). Conociendo el campo vectorial de las velocidades superficiales, se advectan partículas de manera computacional integrando las velocidades superficiales para obtener sus posiciones después de un determinado tiempo (T). Se emplea el método ELTF que mide la separación, después del tiempo T , de partículas inicialmente cercanas entre sí. Los máximos del ELTF, que corresponden a las ECL, se extrajeron utilizando una máscara de percentil en los campos de ELTF. Para este estudio se seleccionaron dos eventos de interés; un evento denominado *extremo* con magnitudes de velocidad altas, y un evento de vientos *Santa Ana*. Se analizan los campos de ELTF y las estructuras correspondientes en cada evento. Además, se estudia la relación entre las ECL y los tiempos de residencia de partículas dentro del dominio de los radares. Finalmente se analizan trayectorias de grupos de partículas en las proximidades de las estructuras. El método ELTF resultó adecuado para la identificación de ECL en la bahía con mediciones de radares. Se encontró que las ECL delimitan regiones con diferentes tiempos de residencia y proporcionan información del comportamiento de las trayectorias de partículas en su proximidad. Durante el evento extremo, la estructura repelente más notoria se observó al norte de la bahía con orientación E-W. En el evento Santa Ana las estructuras repelentes más notorias se orientaron NE-SW. Las ECL atrayentes mostraron mayor variabilidad; sin embargo, predominó una orientación NW-SE en ambos eventos. El método de ELTF para la extracción de las ECL es una buena aproximación para el estudio de partículas a la deriva como es el plancton, los derrames petroleros o las descargas de materiales, así como una excelente herramienta en las operaciones de búsqueda y rescate.

Palabras clave: *Estructuras Coherentes Lagrangeanas, corrientes superficiales, Bahía Todos Santos.*

“IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS COHERENTES LAGRANGEANAS PRESENTES EN
LA BAHÍA TODOS SANTOS, BAJA CALIFORNIA, CON INFORMACIÓN OBTENIDA DE
RADARES DE ALTA FRECUENCIA”

TESIS

QUE PRESENTA:

LUIS DANIEL QUINN CERVANTES

APROBADA POR:



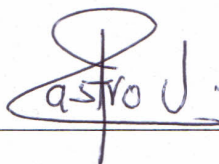
M.C. Evaristo Rojas Mayoral
Presidente del Jurado



Dr. Rafael Hernández Walls
Sinodal Propietario



Dr. Reginaldo Durazo Arvizu
Sinodal Propietario



Dr. Rubén Castro Valdez
Sinodal Propietario

Agradecimientos

A mis padres Bill y Tisu, y hermanos Pablo y María por todo el apoyo que me brindaron para estudiar Oceanología.

A Evaristo por su amistad y su dirección en la tesis y durante toda la carrera.

Al Dr. Rafael Hernández Walls por proponer un excelente tema de tesis y ser mi tutor en mi paso por la FCM.

Al Comité de Tesis conformado por: M.C. Evaristo Rojas, Dr. Rafael Hernández Walls, Dr. Rubén Castro y Dr. Reginaldo Durazo por su tiempo y sus valiosos comentarios para enriquecer el trabajo.

Al Club Científico Universitario por fortalecer mi formación académica.

A Daniela y todos mis amigos de la FCM por hacer de la licenciatura una experiencia sumamente agradable.

Los datos para este trabajo fueron generados con los proyectos:

- **Estudio de Clasificación de Playas: Bahía de Ensenada, Baja California** del fondo CONAGUA-CONACyT # 143803. Responsable: Dr. Reginaldo Durazo Arvizu
- **Circulación Estacional en la Bahía Todos Santos, B.C.**, de la 17va. Convocatoria Interna de proyectos UABC, con clave 401/1/C/89/17. No. 376. *Apoyo económico*. Responsable: Dr. Rubén Castro Valdez
- **Observatorio costero de las condiciones oceánicas dentro y frente a Bahía de Todos Santos, B.C.** Financiado por CONACyT (ref: 10494). Responsable: Dr. Xavier Flores Vidal.

Índice

Índice de figuras	2
1. Introducción	3
1.1. Estructuras Coherentes Lagrangeanas	3
1.2. Área de Estudio	5
1.3. Radares	7
1.4. Objetivo	11
1.4.1. General	11
1.4.2. Particulares	11
1.5. Hipótesis	11
2. Métodos	11
2.1. Exponente de Lyapunov de Tiempo Finito	11
2.2. Método computacional	13
2.3. Eventos de interés	15
2.3.1. Evento extremo	18
2.3.2. Evento Santa Ana	18
2.4. Tiempo de residencia y criterios de extracción de ECL	20
2.5. Partículas a la deriva	21
3. Resultados	22
3.1. Evento extremo	22
3.1.1. Campos de ELTF en tiempo hacia adelante y hacia atrás	22
3.1.2. Tiempos de residencia dentro del dominio	25
3.1.3. ECL	27
3.1.4. Partículas a la deriva	29
3.2. Evento Santa Ana	32
3.2.1. Campos de ELTF en tiempo hacia adelante y hacia atrás	32
3.2.2. Tiempos de residencia dentro del dominio	35
3.2.3. ECL	37
3.2.4. Partículas a la deriva	39
4. Discusión	43
5. Conclusiones	46
Referencias	47
A. Lista de variables y abreviaciones	49
A.1. Variables	49
A.2. Abreviaciones	50

Índice de figuras

1.	Mapa del área de estudio	6
2.	Cobertura espacio-temporal de datos	9
3.	Serie temporal de porcentaje de cobertura	10
4.	Malla de las posiciones iniciales de las partículas a advectar	14
5.	Posiciones de partículas en t_0 y después de ser advectadas $t_0 + T$	15
6.	Serie temporal de variables atmosféricas para el año 2010	17
7.	Flujo promedio de las corrientes superficiales en evento extremo	18
8.	Flujo promedio de las corrientes superficiales en evento Santa Ana	20
9.	Campos de ELTF en tiempo hacia adelante en evento extremo	23
10.	Campos de ELTF en tiempo hacia atrás en evento extremo	24
11.	Tiempo de residencia dentro del dominio en evento extremo	26
12.	ECL en evento extremo	28
13.	Posiciones iniciales de dos grupos de partículas en evento extremo	30
14.	Partículas a la deriva sobre las ECL durante evento extremo	31
15.	Campos de ELTF en tiempo hacia adelante en evento Santa Ana	33
16.	Campos de ELTF en tiempo hacia atrás en evento Santa Ana	34
17.	Tiempo de residencia dentro del dominio en evento Santa Ana	36
18.	ECL en evento Santa Ana	38
19.	Posiciones iniciales de dos grupos de partículas en evento Santa Ana	40
20.	Partículas a la deriva sobre las ECL durante evento Santa Ana	41

1. Introducción

La introducción está dividida en cinco secciones. En la primera sección se describe el concepto de las Estructuras Coherentes Lagrangianas (ECL) en los sistemas dinámicos, se mencionan algunos métodos para la identificación de las ECL incluyendo el que se utiliza en el trabajo, el Exponente de Lyapunov de Tiempo Finito (ELTF), y se mencionan algunas aplicaciones que tiene la identificación ECL en cuestiones oceanográficas. La siguiente sección describe el área de estudio. Posteriormente se mencionan algunos aspectos del funcionamiento de los radares de alta frecuencia y sus ventajas en la aplicación del método ELTF. Después se definen los objetivos generales y particulares, y finalmente la hipótesis del trabajo.

1.1. Estructuras Coherentes Lagrangeanas

Un sistema dinámico es un conjunto de ecuaciones que describe la evolución de un sistema en el tiempo. El transporte en sistemas dinámicos puede ser estudiado en términos de trayectorias. Cuando se aplica a fluidos, esta perspectiva se denomina *Lagrangeana* y se enfoca en el cambio de velocidad de las partículas individuales mientras son advectadas por el flujo (Peacock y Haller, 2013; Shadden *et al.*, 2005). Si la descripción se enfoca en estudiar el flujo en posiciones fijas en el espacio, se denomina *Euleriana* (Shadden *et al.*, 2005). En la descripción *Euleriana* no se considera la identidad y origen de la partícula (Peacock y Haller, 2013). Al omitir la difusión molecular, los trazadores pasivos siguen las trayectorias de las partículas en el fluido $\vec{x}(t)$ en 2 ó 3 dimensiones, que son solución de

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{v}(\vec{x}, t), \quad (1)$$

donde el lado derecho de la igualdad corresponde al campo de velocidades del fluido (Shadden *et al.*, 2005).

En dinámica de fluidos es común que los campos de velocidad sólo son conocidos en intervalos de tiempo finitos. Éste es el caso para modelos numéricos de la aproximación de las ecuaciones de Navier-Stokes, y para medidas de velocidades a partir de radares y datos de satélite (Peacock y Haller, 2013; Shadden *et al.*, 2005). Aún cuando el campo de velocidades tenga una forma simple, el comportamiento de las trayectorias de partículas puede ser bastante complejo e impredecible. Este fenómeno se denomina *transporte caótico* (Shadden *et al.*, 2005). Al integrar numéricamente la ecuación (1), se obtienen las trayectorias de partículas. Sin embargo, por el comportamiento caótico, cualquier perturbación en el campo de velocidades, debido por ejemplo a algún error de medición, puede

producir diferencias en las trayectorias. La interpretación directa de las trayectorias, como la interpretación de los *diagramas de espagueti*, puede resultar difícil o engañosa (Peacock y Haller, 2013; Shadden *et al.*, 2009).

Los flujos con dependencia temporal pueden mostrar patrones emergentes evidentes que controlan el transporte de trazadores denominados *estructuras coherentes*. Cuando las estructuras coherentes se estudian en términos de trayectorias de fluido, se les llaman *Estructuras Coherentes Lagrangeanas* (ECL). Las ECL revelan la geometría del flujo subyacente que en muchos casos no es evidente de los campos Eulerianos (Shadden *et al.*, 2005). La localización de los patrones coherentes robustos que dictan el transporte, como separatrices que dividen el flujo, es más reveladora que el estudio directo de las trayectorias (Shadden *et al.*, 2009). El concepto de ECL es una nueva forma de comprender el transporte en flujos complejos, ya que consiste en la identificación de líneas materiales clave que organizan el transporte en el flujo, y juegan un papel importante de atracción y repulsión en elementos del fluido adyacente, en un periodo de tiempo determinado (Peacock y Haller, 2013).

Las estructuras coherentes se han definido vagamente en la literatura, por lo que su análisis y detección exacta es complicada. Un método llamado *aproximación de tiempo hiperbólico* define las ECL como los extremos locales del campo de tiempo hiperbólico, que mide el tiempo en que cada trayectoria permanece hiperbólica, o que continuamente repele trayectorias cercanas (Shadden *et al.*, 2005, 2009). Un método alternativo consiste en definir las ECL como los extremos locales del campo del Exponente de Lyapunov de Tiempo Finito (ELTF) (Shadden *et al.*, 2005). En este método se mide la sensibilidad del comportamiento futuro de una partícula, en relación a su posición inicial (Peacock y Haller, 2013). En otras palabras, el ELTF *mide cuánto se separan las partículas después de un determinado intervalo de tiempo*. Similar al ELTF, el Exponente de Lyapunov de Tamaño Finito *mide cuánto tardan las partículas en separarse una distancia específica* (Shadden *et al.*, 2005). Karrasch y Haller (2013) comprueban que los campos de Exponente de Lyapunov de Tamaño Finito deben cumplir ciertas condiciones para ser utilizados en la identificación de las ECL ya que pueden arrojar resultados erróneos y son muy sensibles al paso temporal computacional. Shadden *et al.* (2009) afirman que el ELTF es el mejor método para mediciones crudas del océano.

El método de ELTF para la detección de ECL no está restringido a flujos superficiales. Shadden *et al.* (2009) y Peacock y Haller (2013) mencionan que se está trabajando en métodos eficientes y rigurosos para el estudio de ECL en tres dimensiones. Estos métodos revelarán superficies materiales clave en 2D que actúan como barreras de transporte en 3D. La geometría tridimensional puede ser usada en el estudio y visualización de surgencias. Con esto, habrá un mejor entendimiento del flujo de transporte en una gran

variedad de sistemas físicos.

Conociendo la posición de las ECL, es más fácil entender las estructuras globales de los flujos no estacionarios, la geometría y los procesos de transporte. En oceanografía, las ECL han sido utilizadas en estudios de dispersión de contaminantes, predicción de frentes de florecimientos algales y para definir los puntos óptimos de liberación de vehículos autónomos sumergibles (Shadden *et al.*, 2009). Las ECL pueden ser utilizadas en el estudio de cualquier tipo de partículas a la deriva (planctónicas). En el Golfo de México, se utilizaron las ECL en el estudio del derrame de petróleo, y se menciona que son de gran ayuda en la mejora de estrategias de búsqueda y rescate en las zonas costeras (Peacock y Haller, 2013). Shadden *et al.* (2009) consideraron las ECL como una *huella Lagrangeana* de surgencias en la Bahía de Monterey, California, EU. Huhn (2012) utilizó las ECL para el estudio del transporte de florecimientos de plancton.

Para el presente trabajo se utiliza el método del Exponente de Lyapunov de Tiempo Finito (ELTF) para la identificación de las ECL en la Bahía Todos Santos (BTS) por ser el mejor método para medidas crudas del océano (Shadden *et al.*, 2009). Conociendo la posición y geometría de las estructuras es posible inferir zonas de acumulamiento o dispersión de partículas a la deriva en la bahía, como pueden ser las descargas antropogénicas, además de ofrecer un panorama general del transporte al interior de la BTS.

1.2. Área de Estudio

La Bahía Todos Santos (BTS), es una bahía de aproximadamente 180 km² localizada a unos 100 km al sur de la frontera mexicana con E.U.A sobre la costa oeste de la Península de Baja California (fig. 1). La BTS se comunica con el Océano Pacífico a través de las zonas entre la Isla Todos Santos (ITS) y Punta San Miguel (PSM) de extensión 10 km, e ITS y Punta Banda (PB) con extensión de aproximadamente 5 km. En el interior de la bahía la profundidad es menor a los 50 m en alrededor del 80 % del área. Lo restante corresponde al cañón submarino entre ITS y PB al suroeste de la bahía (Mateos *et al.*, 2009). La marea que presenta la BTS es mixta semidiurna, donde el componente armónico más importantes es el M2 (Gutiérrez-Gutiérrez, 1999). El rango de marea es de aproximadamente 1.6 m (Zertuche-Chanes, 2013). Los vientos predominantes son del NW, especialmente en los meses cálidos del año (Gutiérrez-Gutiérrez, 1999; Zertuche-Chanes, 2013).

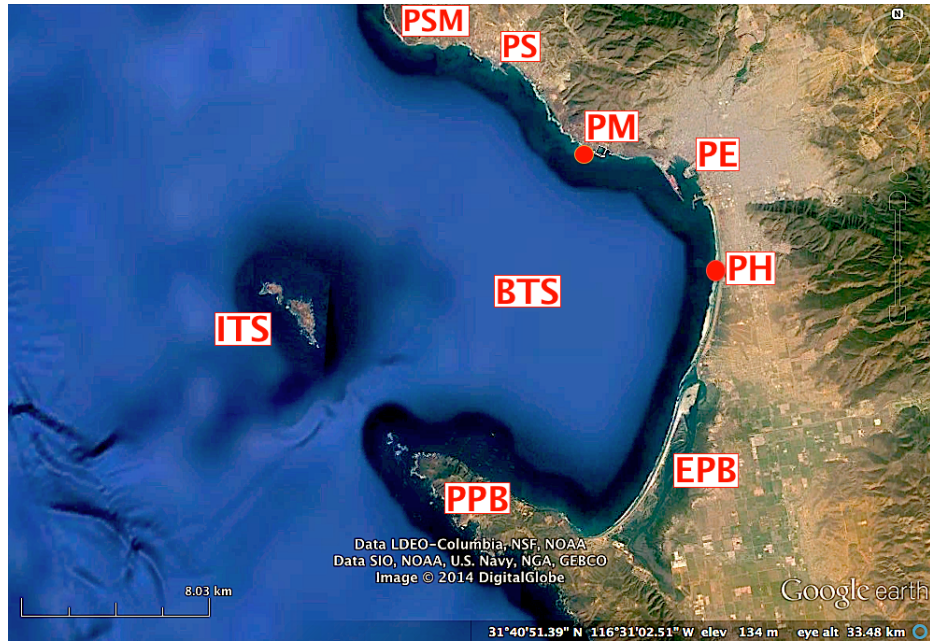


Figura 1: Bahía Todos Santos, tomada de GoogleEarth. Los puntos rojos corresponden a las posiciones de los sistemas de Radares de Alta Frecuencia (RAF). BTS - Bahía Todos Santos, PSM - Punta San Miguel, PS - Puerto del Sauzal, PM - Punta Morro, PE - Puerto de Ensenada, PH - Playa Hermosa, EPB - Estero de Punta Banda, PPB - Península de Punta Banda, ITS - Islas Todos Santos. Todas las abreviaciones se describen en el apéndice A.2.

A partir de un modelo hidrodinámico tridimensional, Mateos *et al.* (2009) mencionan que la circulación en la BTS está influenciada por la circulación al exterior de la bahía, principalmente por la Corriente de California (CC). Esta corriente transporta agua del Subártico hacia el Ecuador con una velocidad superficial promedio menor a los 25 cm s^{-1} (Lynn y Simpson, 1987). En Mateos *et al.* (2009) se identifican dos modos de la circulación subsuperficial de verano en la BTS a 5 m de profundidad. El primer modo consta de un remolino anticiclónico grande que cubre todo el norte de la bahía, y el otro, de dos remolinos - uno ciclónico y un anticiclónico - en la zona central de la bahía. La circulación de la bahía oscila entre los dos modos. Se asume que la circulación en la BTS es el resultado de la influencia de la CC, las mareas, los vientos y la restricción impuesta por la geometría de la bahía (Mateos *et al.*, 2009). Utilizando un modelo hidrodinámico bidimensional, Argote-Espinoza *et al.* (1991) afirman que el viento es el principal factor de la circulación de la bahía. Para condiciones de verano con vientos del noroeste, oeste y norte los autores sugieren que el flujo es hacia el interior de la bahía a lo largo de la costa de Punta San Miguel (PSM), en el norte. Con vientos del noroeste y norte, existe además un flujo hacia el interior de la bahía por el sur, a lo largo de la costa de la Península de Punta Banda (PPB), lo que genera una zona de convergencia cercana al Puerto de Ensenada. Para condiciones de invierno con vientos del sur y suroeste, el flujo es hacia afuera de la

bahía a lo largo de la costa de PSM. En condiciones de vientos Santa Ana (descritos más adelante) con vientos del este, se observa flujo hacia fuera de la bahía a lo largo de la costa de PSM y hacia afuera de la bahía por la PB formando una región de divergencia cercana al Puerto de Ensenada. En todos los casos estudiados las velocidades más fuertes de la corriente se encontraron a lo largo de la costa en una banda de ~ 3 km (Argote-Espinoza *et al.*, 1991).

1.3. Radares

Las corrientes superficiales en el océano son de gran importancia por muchas razones, tales como la navegación, la ecología del fitoplancton y el transporte de calor. Esta importancia cobra especial relevancia en regiones costeras que muestran un acelerado desarrollo urbano y donde existe el riesgo constante de derrames de materiales producto de la actividad antropogénica. La medición directa de las corrientes oceánicas es difícil y costosa, especialmente en la superficie debido al oleaje y al viento. Cuando se utilizan aparatos montados en barcos o instrumentos de deriva, es prácticamente imposible obtener observaciones bidimensionales continuas de las corrientes superficiales (Paduan y Rosenfeld, 1996).

Los avances tecnológicos recientes como los radares de alta frecuencia (RAF), han permitido el mejoramiento de mediciones de corrientes superficiales en regiones costeras. Con los radares es posible obtener medidas de campos de velocidades superficiales con alta resolución espacial y temporal (Shadden *et al.*, 2009). Actualmente existen cientos de sistemas de RAF instalados en todo el mundo y se han convertido en una técnica de medición ampliamente utilizada en el estudio de la circulación costera (Huhn, 2012).

El principio de medición de los RAF se basa en el desfase Doppler. Los radares emiten ondas electromagnéticas en el rango de alta frecuencia del espectro (3-30 MHz) y con longitudes de onda de $\lambda_{RAF} \sim 10-100$ m (Paduan y Graber, 1997). Las ondas luego son reflejadas por la superficie rugosa del océano y detectadas de regreso como un espectro de señal de retorno. Cuando las ondas superficiales en el océano son de longitud de onda exactamente la mitad de la onda emitida por el radar, se produce un fenómeno de resonancia conocido como *esparcimiento Bragg* que se observa como un pico en el espectro de la señal de retorno. El nivel de este pico es mucho mayor que el nivel espectral debido a la reflexión de otras superficies, y se puede determinar su frecuencia precisa (Paduan y Rosenfeld, 1996). El movimiento del océano con respecto a la estación del radar produce un desfase Doppler. El desfase de frecuencia Doppler, relativo a la frecuencia incidente del radar, se debe a la velocidad del agua que se adiciona a la velocidad de fase de la superficie reflejante, que son las ondas gravitatorias de longitud de onda $\frac{\lambda_{RAF}}{2}$. En este caso, el movimiento de la superficie reflejante está dado por la velocidad de fase de las

ondas gravitatorias en aguas profundas: $c^2 = g\lambda/2\pi$ donde g es la aceleración de la gravedad, y $\lambda = \frac{\lambda_{RAF}}{2}$ la longitud de onda. Debido a que la contribución de las ondas gravitatorias al desfase de Doppler es conocida, el resto del desfase se le atribuye a las corrientes subyacentes (Paduan y Rosenfeld, 1996).

Una instalación individual de RAF mide una sola componente de la velocidad en la dirección radial. Esto es porque el espacimientto Bragg solo es efectivo en ondas viajando directamente desde o hacia el radar. Para obtener mapas bidimensionales de las corrientes en un área grande, es necesario obtener mediciones de al menos dos sistemas de radar en diferente posición. El error al calcular los vectores de corriente, es función del ángulo entre las observaciones radiales (Paduan y Rosenfeld, 1996) que en general debe de ser $>30^\circ$ y $<150^\circ$ (Paduan y Graber, 1997). Aunque la energía del espacimientto Bragg es mucho mayor que el de otras reflexiones, en la práctica es necesario promediar sobre un área grande para obtener la estimación estadísticamente confiable de los picos espectrales (Paduan y Rosenfeld, 1996).

El error en las mediciones de los radares no está del todo definido. Se utilizan aparatos *in situ* para comparar las mediciones con las de los radares. El problema es que resulta difícil determinar si las diferencias se deben al radar, al instrumento *in situ* o a la misma cantidad medida. En Shadden *et al.* (2009) se menciona que existe una incertidumbre de error de 10 cm s^{-1} para componentes de velocidad medidas por radares. Chapman y Graber (1997) encontraron diferencias de $8\text{-}15 \text{ cm s}^{-1}$ al comparar directamente mediciones de radares con instrumentos *in situ*. Sin embargo, los mismos autores mencionan que el error se puede disminuir examinando la dependencia espacial y sugieren que el error es más bien del orden de $7\text{-}8 \text{ cm s}^{-1}$.

Para el presente trabajo, se utilizaron datos obtenidos a partir de un arreglo de dos sistemas de RAF CODAR de 25 MHz, uno localizado en Punta Morro, y el otro en CONALEP (figura 2). La resolución espacial de los datos es de alrededor de 1 km, y la resolución temporal de 1 hr (Larrañaga Fu, 2013). Los datos cubren prácticamente todo el interior de la BTS. La figura 2 muestra la cobertura espacio-temporal de los datos para el año 2010. La posición de los radares se muestra como recuadros negros en el mapa. En la figura 3 se muestra la serie temporal del porcentaje de nodos de los radares con alguna medición durante el año 2010. Los porcentajes están normalizados al máximo de mediciones en un instante. Además, en la misma figura se muestran los dos eventos que se analizan en este trabajo, que se describen más adelante.

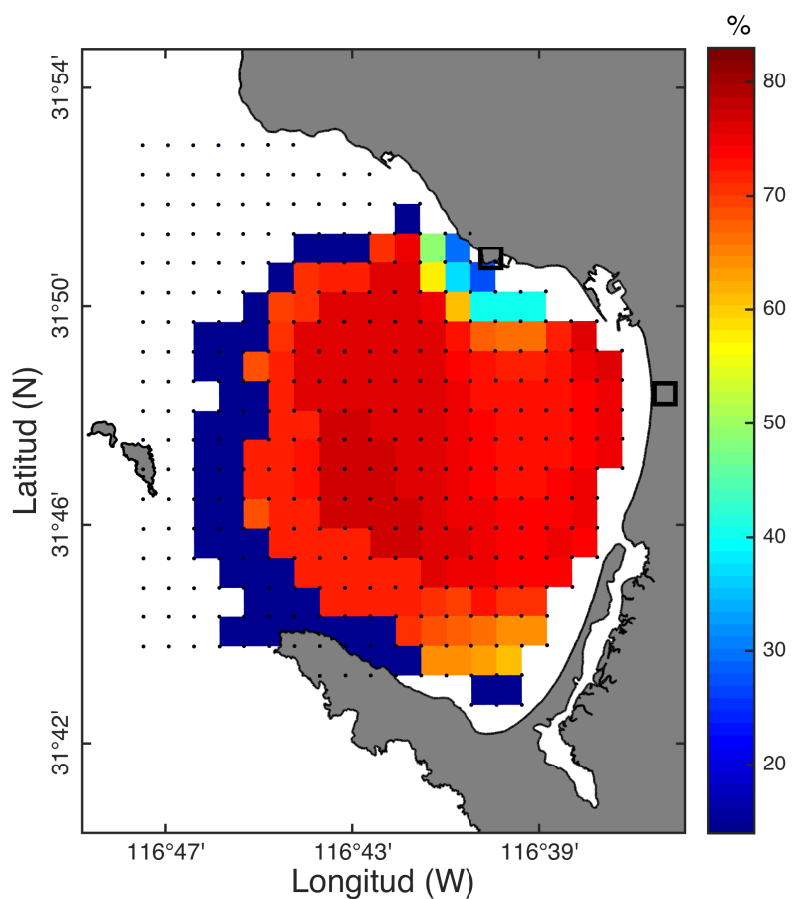


Figura 2: Porcentaje de cobertura temporal de los datos en 2010. Los puntos corresponden a la malla de las mediciones de los RAF. Los recuadros negros sobre el borde costero muestran la posición de los sistemas de RAF. El recuadro al norte corresponde a Punta Morro, y el recuadro más al sur a CONALEP.

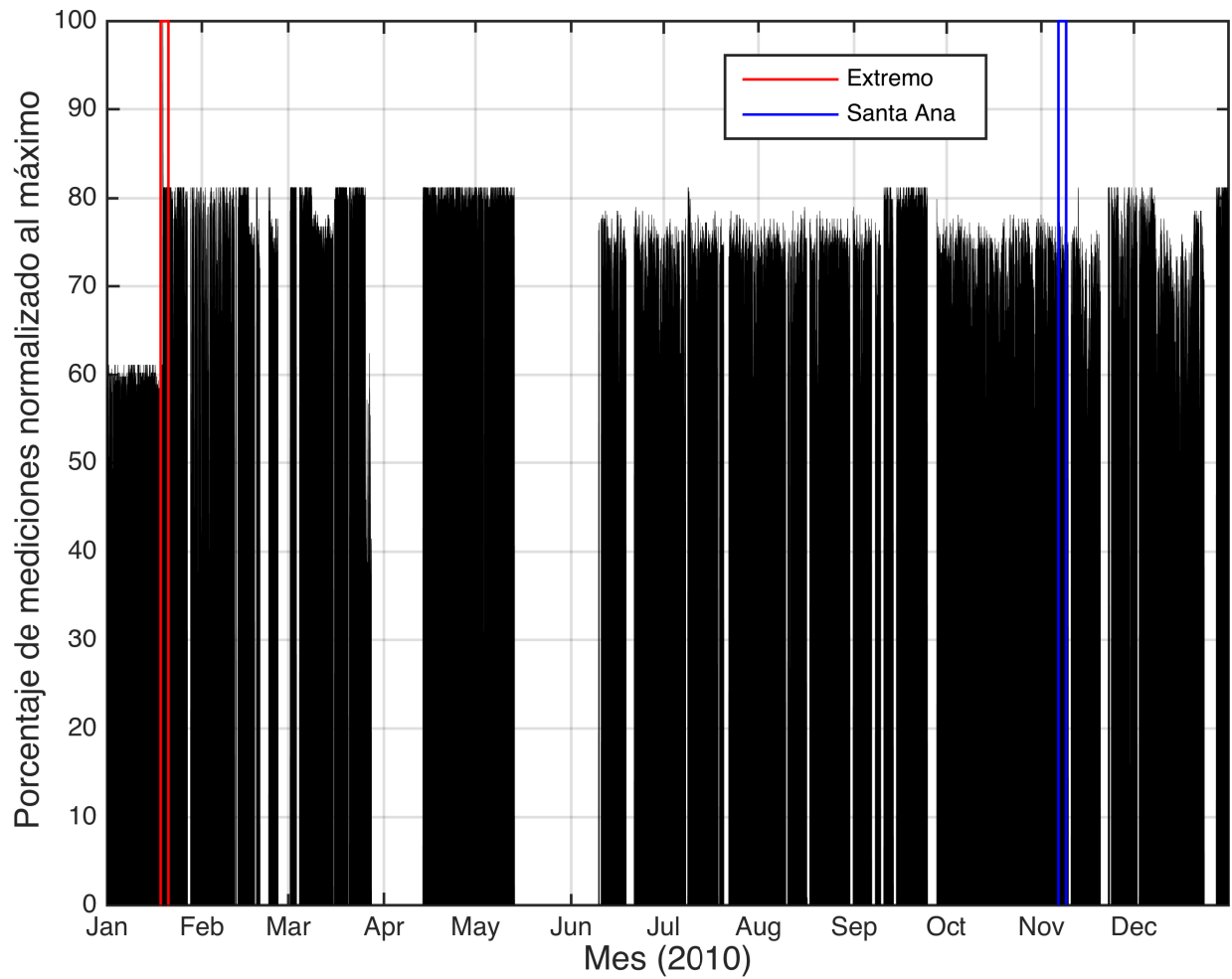


Figura 3: Serie temporal del porcentaje de mediciones con respecto al máximo número de mediciones en un instante (ver fig.2). Se muestran en color rojo y azul los eventos extremo y Santa Ana ocurridos del 17 al 23 de enero y del 3 al 12 de noviembre de 2010, respectivamente.

1.4. Objetivo

1.4.1. General

Utilizar el método del Exponente de Lyapunov de Tiempo Finito para identificar las Estructuras Coherentes Lagrangianas presentes en la Bahía Todos Santos con velocidades obtenidas de Radares de Alta Frecuencia.

1.4.2. Particulares

- Analizar la geometría de las ECL durante el evento extremo (17 al 23 de enero) y el evento Santa Ana (3 al 12 de noviembre) ocurridos en 2010, reportados por Cervantes-Audelo (2013)
- Analizar la relación entre ECL y tiempos de residencia dentro del dominio
- Estudiar el comportamiento de trayectorias de partículas en la proximidad de las ECL

1.5. Hipótesis

La geometría de las ECL en los dos eventos son muy diferentes. Los tiempos de residencia dentro del dominio son menores durante el evento extremo comparado con el evento de viento Santa Ana debido a las corrientes de mayor intensidad presentes durante el evento extremo. En ambos casos las ECL se comportarán como barreras que delimitan zonas con diferente comportamiento de partículas.

2. Métodos

La metodología se divide en 5 secciones. La primera detalla el origen de la ecuación para el cálculo del ELTF. Posteriormente se describen los pasos computacionales para calcular los campos de ELTF a partir de los datos obtenidos de los RAF. En la siguiente sección se definen los eventos de interés que se analizan en el trabajo. Después se mencionan los criterios de extracción de las estructuras, y finalmente se describe un experimento de partículas a la deriva en las proximidades de las ECL.

2.1. Exponente de Lyapunov de Tiempo Finito

Para identificar las ECL es necesario calcular los campos del Exponente de Lyapunov de Tiempo Finito (ELTF). El ELTF es un escalar $\sigma_{t_0}^T(\vec{x})$ que representa la magnitud de estiramiento del fluido, desde un tiempo inicial (t_0) hasta un tiempo posterior ($t_0 + T$) en una posición del dominio. El intervalo de tiempo está dado por (T). En fluidos superficiales de dos dimensiones, normalmente hay curvas bien definidas de valores altos de ELTF. Estas curvas o cordilleras de valores altos de ELTF son la definición de las ECL, las cuales muestran las barreras atrayentes o repelentes para tiempos de integración positivos y negativos respectivamente (Shadden *et al.*, 2005, 2009). A continuación se muestra el procedimiento para derivar la ecuación del ELTF descrito por Shadden *et al.* (2005) y Zeekant (2011).

El ELTF se puede derivar considerando dos partículas vecinas en un dominio. Una partícula en $\vec{x}(t_0) \in D$ es afectada por el flujo y por lo tanto se traslada a una nueva posición después de un tiempo T .

$$\vec{x} \mapsto \phi_{t_0}^{t_0+T}(\vec{x}) \quad (2)$$

El punto vecino se comportará de una manera similar a $\vec{x}(t_0)$ cuando es afectado por el mismo flujo. Cuando el intervalo de tiempo aumente, la distancia entre los dos puntos seguramente cambiará. El punto cercano a $\vec{x}$ se puede describir como $\vec{y} = \vec{x} + \delta\vec{x}(t_0)$ donde $\delta\vec{x}(t_0)$ es una distancia muy pequeña, orientada arbitrariamente. Después de un intervalo de tiempo T , la distancia entre los dos puntos es

$$\delta\vec{x}(t_0 + T) = \phi_{t_0}^{t_0+T}(\vec{y}) - \phi_{t_0}^{t_0+T}(\vec{x}) = \frac{d\phi_{t_0}^{t_0+T}(\vec{x})}{d\vec{x}}\delta\vec{x}(t_0) + \mathcal{O}(\|\delta\vec{x}(t_0)\|^2) \quad (3)$$

Debido a que la perturbación inicial es muy pequeña, el término de orden mayor $\mathcal{O}(\|\delta\vec{x}(t_0)\|^2)$ se puede despreciar. Utilizando la norma Euclideana estándar, la magnitud

de la perturbación está dada por

$$||\delta\vec{x}(t_0 + T)|| = \sqrt{\left\langle \delta\vec{x}(t_0), \frac{d\phi_{t_0}^{t_0+T}(\vec{x})^*}{d\vec{x}} \frac{d\phi_{t_0}^{t_0+T}(\vec{x})}{d\vec{x}} \delta\vec{x}(t_0) \right\rangle} \quad (4)$$

donde M^* indica la matriz transpuesta conjugada de M . Aquí, se reconoce una versión de tiempo finito del tensor de deformación de Cauchy-Green

$$\Delta = \frac{d\phi_{t_0}^{t_0+T}(\vec{x})^*}{d\vec{x}} \frac{d\phi_{t_0}^{t_0+T}(\vec{x})}{d\vec{x}} \quad (5)$$

El máximo estiramiento entre los puntos $\vec{x}$ y $\vec{y}$ ocurre cuando se elige un $\delta\vec{x}(t_0)$ alineado con el eigenvector del máximo eigenvalor de Δ ,

$$\max_{\delta\vec{x}(t_0)} ||\delta\vec{x}(t_0 + T)|| = \sqrt{\langle \delta\vec{x}(t_0), \lambda_{\max}(\Delta) \delta\vec{x}(t_0) \rangle} = \sqrt{\lambda_{\max}(\Delta)} ||\delta\vec{x}(t_0)|| \quad (6)$$

donde $\delta\vec{x}(t_0)$ está alineado con el eigenvector asociado a $\lambda_{\max}(\Delta)$. Si $\sigma_{t_0}^T(\vec{x})$ se define como

$$\sigma_{t_0}^T(\vec{x}) = \frac{1}{|T|} \ln \sqrt{\lambda_{\max}(\Delta)} \quad (7)$$

la ecuación 6 se puede reescribir usando la ecuación 7

$$\max_{\delta\vec{x}(t_0)} ||\delta\vec{x}(t_0 + T)|| = e^{\sigma_{t_0}^T(\vec{x})|T|} ||\delta\vec{x}(t_0)|| \quad (8)$$

La ecuación 7 representa el máximo ELTF en el punto $\vec{x} \in D$ en el instante (t_0) con un tiempo de integración finito T . Se toma el valor absoluto del tiempo de integración T para poder calcular el ELTF tanto hacia adelante como hacia atrás en el tiempo. Utilizando

$$||M||_2 = \sqrt{\lambda_{\max}(M^*M)} \quad (9)$$

la ecuación 7 se puede reescribir como

$$\sigma_{t_0}^T(\vec{x}) = \frac{1}{|T|} \ln \left\| \frac{d\phi_{t_0}^{t_0+T}(\vec{x})}{d\vec{x}} \right\|_2 \quad (10)$$

2.2. Método computacional

Para calcular el ELTF a partir de los datos de RAF, primero es necesario crear una malla de dos dimensiones para discretizar el cómputo del ELTF. La malla cubre el mismo dominio que los radares (fig.2), considerando solo los nodos con un porcentaje de cobertura temporal mayor al 65 %, pero con una resolución espacial 144 veces mayor. Los puntos de la malla se toman como las posiciones iniciales de las partículas a adveectar.

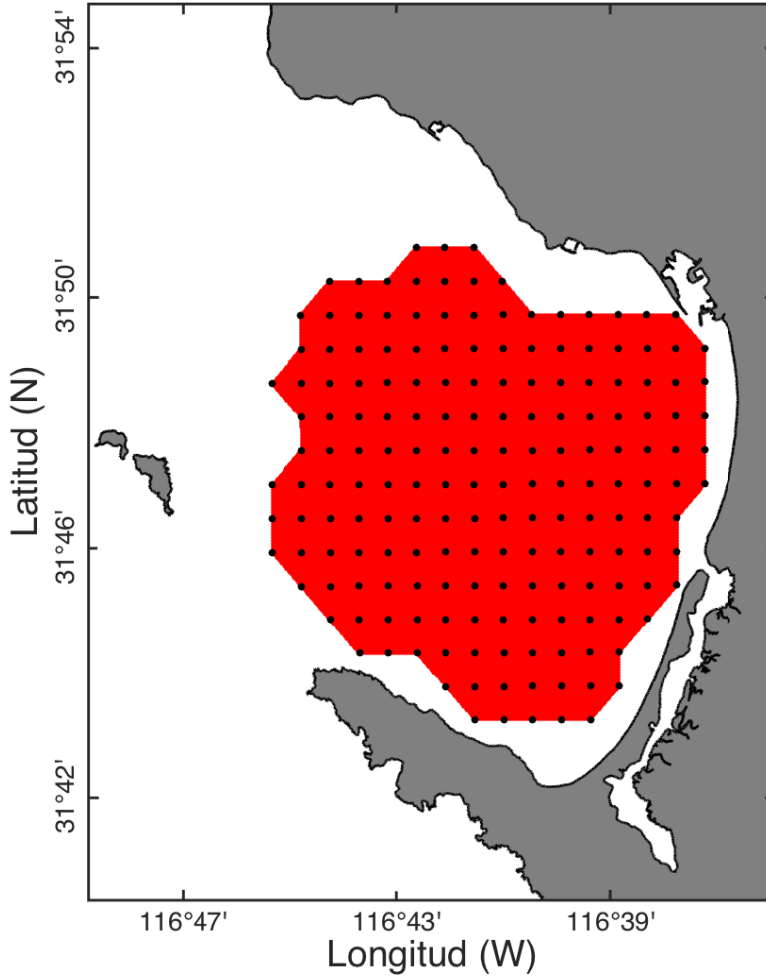


Figura 4: Malla de las posiciones iniciales de las partículas a advectar (área roja) $\sim 90,000$ partículas. Se utiliza el área con más de 65 % de cobertura temporal (fig. 2). Los puntos negros son los nodos con medición de los radares en el área seleccionada

Las partículas son advectadas desde t_0 hasta $t_0 + T$ al integrar numéricamente los vectores del campo de velocidades superficiales de los RAF. El tiempo T se determina en función del tiempo que tarda en salir la mayoría de las partículas del dominio. En cada posición de las partículas, se calcula el vector de velocidad por medio de una interpolación lineal de las mediciones de los radares. Con los campos de velocidad se advectan las partículas numéricamente utilizando el método de Euler

$$\begin{aligned} x_{i,j}^{t+dt} &= u_{i,j}^t dt + x_{i,j}^t \\ y_{i,j}^{t+dt} &= v_{i,j}^t dt + y_{i,j}^t \end{aligned} \quad (11)$$

donde el superíndice denota el instante, el subíndice la posición en la matriz, (x, y) la posición geográfica, (u, v) el vector de velocidad y dt el paso temporal de las mediciones de los radares.

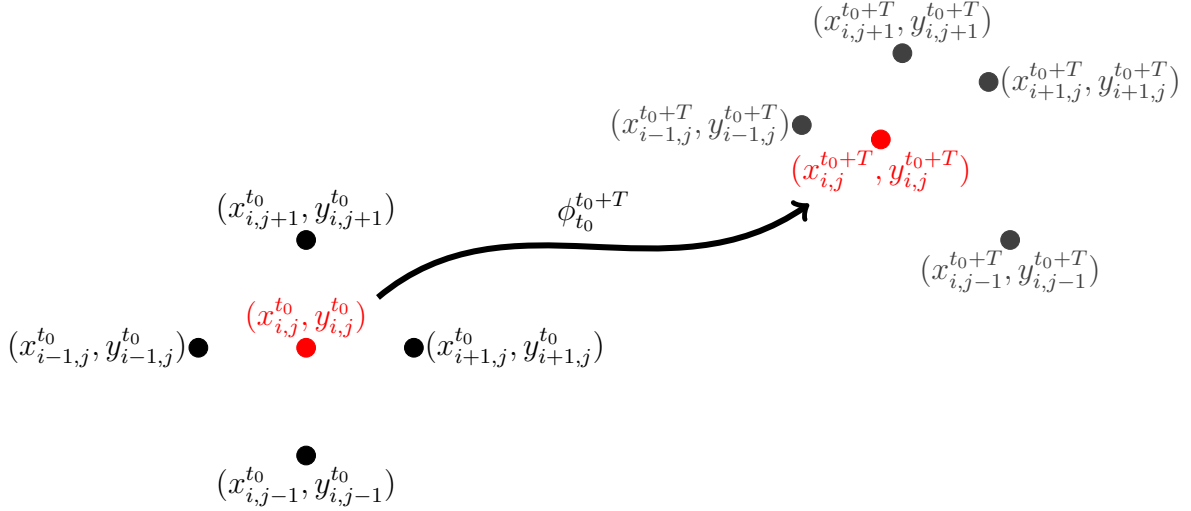


Figura 5: Posiciones de partículas en t_0 y después de ser advectadas $t_0 + T$

Después de la advección, se conoce la posición inicial de las partículas $\vec{x}(t_0)$ y la posición después del tiempo de integración $\vec{x}(t_0 + T)$. Con estas posiciones se puede determinar el gradiente del mapa de flujo. El gradiente, utilizando un esquema de diferencias finitas centrado, está dado por

$$\left. \frac{d\phi_{t_0}^{t_0+T}(\vec{x})}{d\vec{x}} \right|_{x_{i,j}} = \begin{bmatrix} \frac{x_{i+1,j}^{t_0+T} - x_{i-1,j}^{t_0+T}}{x_{i+1,j}^{t_0} - x_{i-1,j}^{t_0}} & \frac{x_{i,j+1}^{t_0+T} - x_{i,j-1}^{t_0+T}}{y_{i,j+1}^{t_0} - y_{i,j-1}^{t_0}} \\ \frac{y_{i+1,j}^{t_0+T} - y_{i-1,j}^{t_0+T}}{x_{i+1,j}^{t_0} - x_{i-1,j}^{t_0}} & \frac{y_{i,j+1}^{t_0+T} - y_{i,j-1}^{t_0+T}}{y_{i,j+1}^{t_0} - y_{i,j-1}^{t_0}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Una vez calculado el gradiente del mapa de flujo, se evalúa la ecuación 10 directamente para calcular el campo de ELTF. Para observar la evolución de los campos de ELTF y de las ECL en el tiempo, se hace variar t_0 . Si al momento de calcular el ELTF se utiliza un $T > 0$, las ECL correspondientes serán repelentes. Si se utiliza un $T < 0$, las ECL correspondientes son de tipo atrayente (Shadden *et al.*, 2009).

2.3. Eventos de interés

Durante el año 2010 se registraron dos eventos de interés. Un evento de corrientes intensas denominado *extremo* del 17 al 23 de enero, y un evento de vientos *Santa Ana* del 3 al 12 de noviembre (Cervantes-Audelo, 2013). La figura 3 muestra la serie temporal de cobertura de mediciones, y los dos eventos de interés seleccionados. Para cada evento se seleccionaron 4 instantes separados 3 horas entre sí para cubrir casi medio día. En cada instante se advectaron las partículas durante 2 días, con posiciones iniciales denotadas en la figura 4. Conociendo las posiciones finales e iniciales, se calcularon los campos de

ELTF con tiempo *normal* ($T > 0$) y tiempo *hacia atrás* ($T < 0$) en cada uno de los 4 instantes. En la figura 6 se muestran series temporales para el año 2010 de: presión, humedad, temperatura, velocidad y dirección del viento. Los eventos extremo y Santa Ana se muestran en sombreados verde y azul respectivamente.

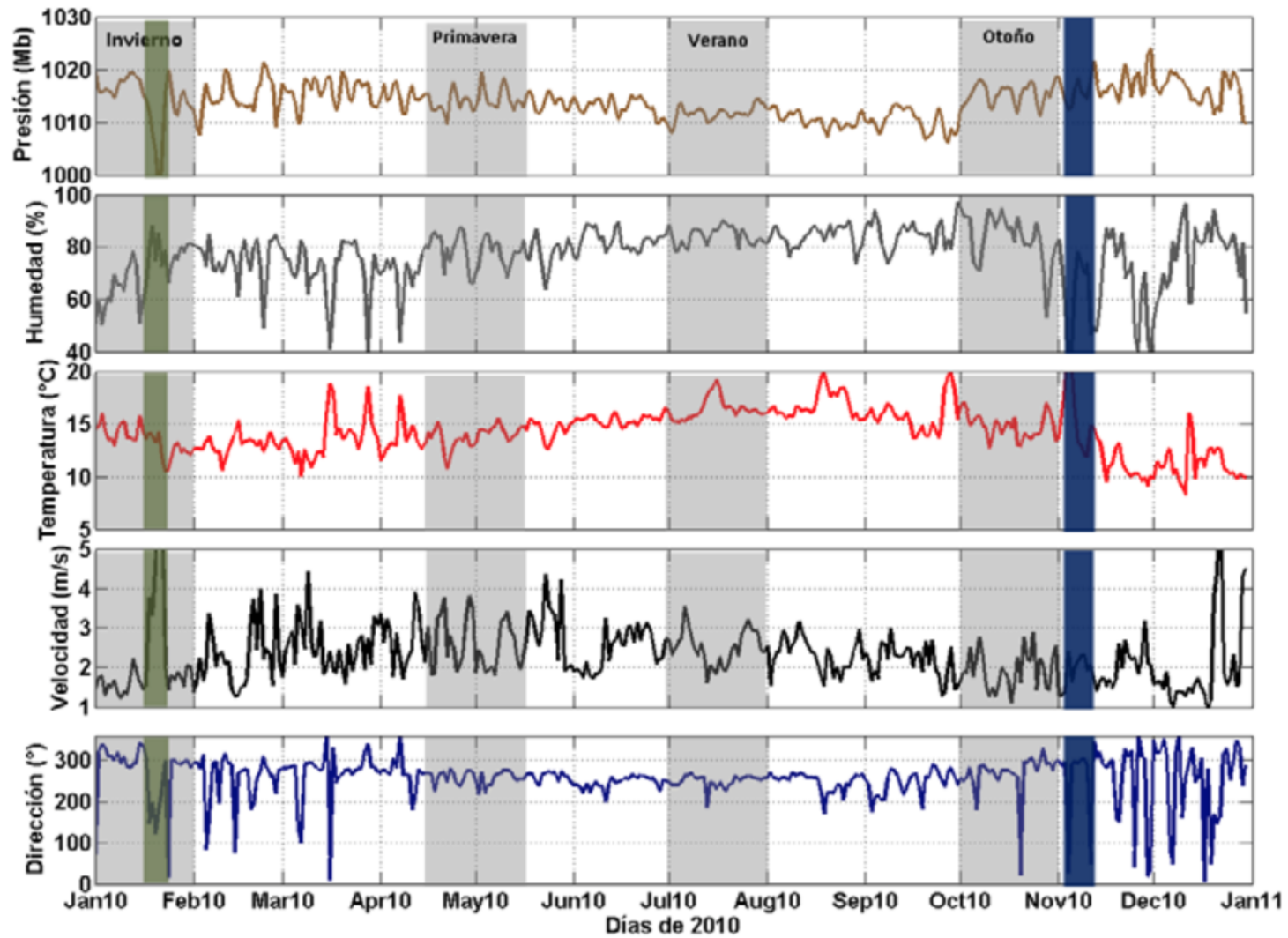


Figura 6: Serie temporal de variables atmosféricas para el año 2010. El área sombreada en verde corresponde al evento extremo (17 al 23 de enero) y el área sombreada en azul al evento Santa Ana (3 al 12 de noviembre). Figura tomada de (Cervantes-Audelo, 2013).

2.3.1. Evento extremo

Durante el evento extremo se registró un drástico descenso de presión atmosférica y vientos intensos del suroeste (Cervantes-Audelo, 2013). Además se presentaron corrientes intensas que sobrepasaron los 15 cm s^{-1} en la mayor parte de la zona oeste de la bahía. En la zona al sur de las islas la dirección predominante fue hacia el este-sureste, y al norte de las Islas Todos Santos (ITS) la dirección predominante fue hacia el noreste. En la figura 7 se muestra el flujo medio de las corrientes superficiales durante el evento extremo.

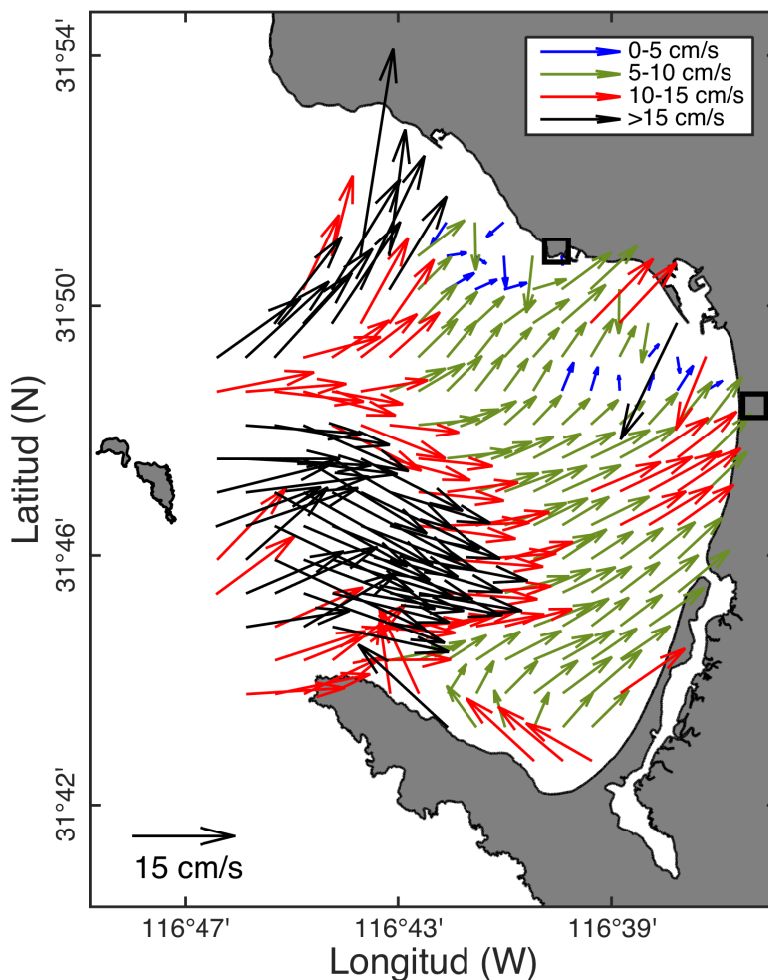


Figura 7: Flujo promedio de las corrientes superficiales durante el evento extremo. Se definen 4 clases para separar la magnitud de los vectores y se representan en colores. Los recuadros negros muestran la posición de los sistemas de RAF. El recuadro al norte corresponde a Punta Morro, y el recuadro más al sur a CONALEP.

2.3.2. Evento Santa Ana

Los eventos Santa Ana son eventos esporádicos de vientos de tierra a mar entre los meses de octubre a marzo. Su duración es de 2-3 días y se caracterizan por su extrema-

damente baja humedad relativa, alta temperatura y condiciones de cielo completamente despejado (Castro *et al.*, 2003; Larrañaga Fu, 2013). Los vientos Santa Ana son provenientes de regiones desérticas y transportan gran cantidad de arena y plovo (Castro *et al.*, 2003). El promedio anual de la componente principal del viento frente a las costas de Baja California es predominante hacia el sureste, sin embargo, en un evento Santa Ana los vientos se dirigen aproximadamente hacia el suroeste y oeste (Castro *et al.*, 2003). El efecto de los vientos puede cubrir varios cientos de kilómetros sobre el océano y puede modificar el campo de corrientes superficiales (Castro *et al.*, 2003).

Durante el evento Santa Ana de noviembre de 2010 se registró un descenso drástico de humedad relativa, acompañado de un aumento en la temperatura ambiente. Los vientos fueron débiles y del este (Cervantes-Audelo, 2013). Además se presentaron dos remolinos definidos: uno ciclónico en el norte de la bahía, y otro anticiclónico frente a la boca del Estero de Punta Banda (EPB). En la figura 8 se muestra el flujo medio de las corrientes superficiales durante el evento Santa Ana.

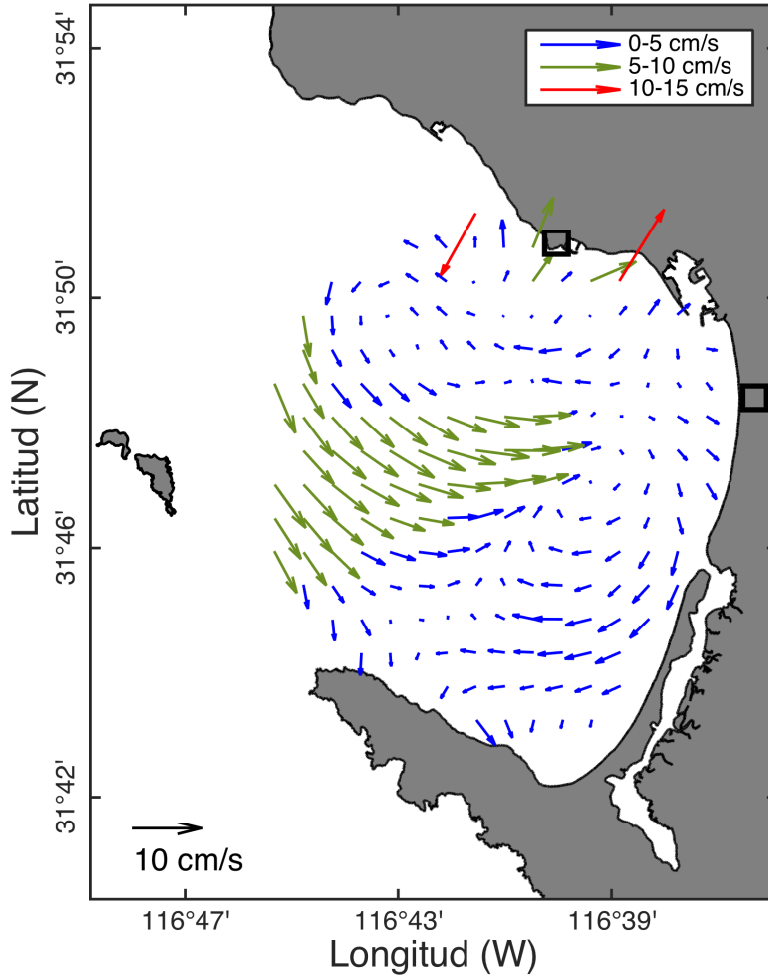


Figura 8: Flujo promedio de las corrientes superficiales durante el evento Santa Ana. Se definen 3 clases para separar la magnitud de los vectores y se representan en colores. Los recuadros negros muestran la posición de los sistemas de RAF. El recuadro al norte corresponde a Punta Morro, y el recuadro más al sur a CONALEP.

2.4. Tiempo de residencia y criterios de extracción de ECL

Cuanto mayor sea T , más evidentes son las ECL, y en general la posición de las ECL es insensible al tiempo de integración (Shadden *et al.*, 2009). Cuando T aumenta aparecen nuevas estructuras, aunque las ECL principales permanecen presentes. Sin embargo, si se utiliza un T demasiado grande, el ELTF puede perder su estructura espacial completamente (Huhn, 2012). Para definir T , es necesario considerar el tiempo que duran las partículas advectadas dentro del dominio, ya que cuando las partículas salen del mismo por las fronteras abiertas, ya no se puede seguir advectando por falta de información de las velocidades superficiales, y debe detenerse la integración. En estos casos el ELTF debe ser calculado con base en la trayectoria disponible. Se utiliza la posición y tiempo T individual de cada partícula justo antes de salir del dominio para evaluar la ecuación

10.

Con la información de los tiempos en que salió cada una de las partículas del dominio, se generaron mapas de tiempo de residencia. En este trabajo se utiliza el término de tiempo de residencia como el tiempo que dura una partícula dentro del dominio de los radares (fig. 4). Los mapas de tiempo de residencia son de gran utilidad para observar regiones de acumulamiento de partículas y las regiones en que las partículas salen rápidamente de la bahía.

Como se mencionó anteriormente, las coordilleras de valores altos en el campo del ELTF corresponden a las ECL. Para identificar los valores máximos del campo, se optó por utilizar una máscara de percentil (entre $P_{90} - P_{96}$). El tiempo T actúa como denominador en la ecuación 10, y para las partículas que salen del dominio rápidamente, el tiempo T individual es bajo, lo que produce valores de ELTF muy altos. A la hora de extraer las ECL se despreciaron las regiones donde T individual fuera menor a $\frac{T}{2}$, esto para evitar que los valores altos del exponente en las orillas del dominio opacaran estructuras interesantes en el interior y poder analizar el comportamiento de grupos de partículas en las proximidades de las ECL durante un mayor tiempo. Al extraer las estructuras de los campos ELTF en tiempo *normal* y tiempo *hacia atrás*, es posible representarlas en un solo mapa como ECL *atrayentes* y *repelentes* respectivamente.

2.5. Partículas a la deriva

La geometría de las ECL está relacionada directamente con las trayectorias de partículas. Para observar cómo influyen las ECL en el transporte, se generaron mapas donde se muestra la posición de dos grupos de partículas sobrepuestas a las ECL en diferentes instantes con separación de 1 hora. Para cada mapa de ECL se utilizó un T de 1 día. Los grupos de partículas se posicionan inicialmente cercanos entre sí, y a cada lado de una ECL repelente y relativamente cercanos a una estructura atrayente. La intersección de una estructura repelente y atrayente se comporta como un punto de silla en las trayectorias de partículas. Cada grupo de partículas es un arreglo cuadrado de 100 partículas equiespaciadas, y la distancia inicial entre los centros de los grupos es menor a 1 km.

3. Resultados

Además de los resultados mostrados en el presente trabajo, se estudiaron los patrones estacionales de las ECL. Se generaron mapas de campos de ELTF diarios para todo el año 2010. Los campos mostraron una alta variabilidad temporal y no fue posible identificar ningún patrón estacional o permanente. Por esta razón se optó por estudiar los dos eventos de interés en el año 2010.

Los resultados se dividen en dos secciones. La primera corresponde al evento *extremo* y la segunda al evento *Santa Ana*. Para cada evento se muestran los mapas de campos ELTF hacia adelante y hacia atrás en 4 instantes. También se muestran los mapas de tiempo de residencia dentro del dominio y las ECL extraídas en los mismos 4 instantes. Finalmente se presenta una serie de 12 mapas horarios con dos grupos de partículas que son advectadas en el dominio y sobrepuestas a las ECL. Para cada figura se describen los aspectos más relevantes.

3.1. Evento extremo

3.1.1. Campos de ELTF en tiempo hacia adelante y hacia atrás

Durante el evento extremo se obtuvieron los campos de ELTF en cuatro instantes con intervalo de 3 horas, en tiempo hacia adelante (figura 9) y tiempo hacia atrás (figura 10). El primer instante corresponde al 19 de enero de 2010 a las 04:00 horas y el último el mismo día a las 13:00 horas. Las barras de color de los campos ELTF hacia adelante muestran valores altos en color rojo y negro, y los valores bajos en color amarillo y blanco. En los campos de ELTF hacia atrás, los valores altos se muestran en color azul y negro, y los valores bajos en color cian y blanco.

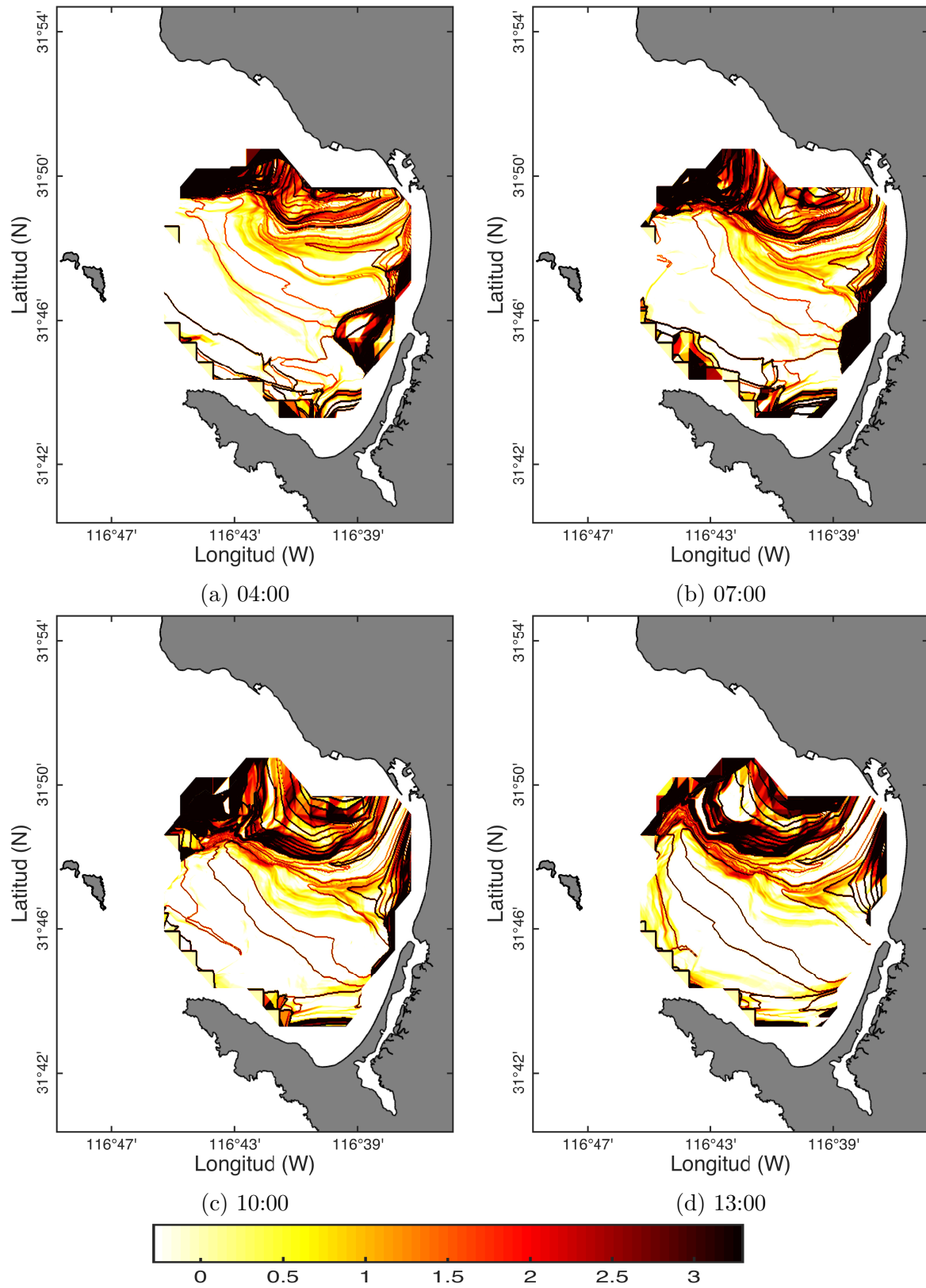


Figura 9: Campos de ELTF en tiempo hacia adelante en evento extremo. Las unidades de la barra de color son días^{-1}

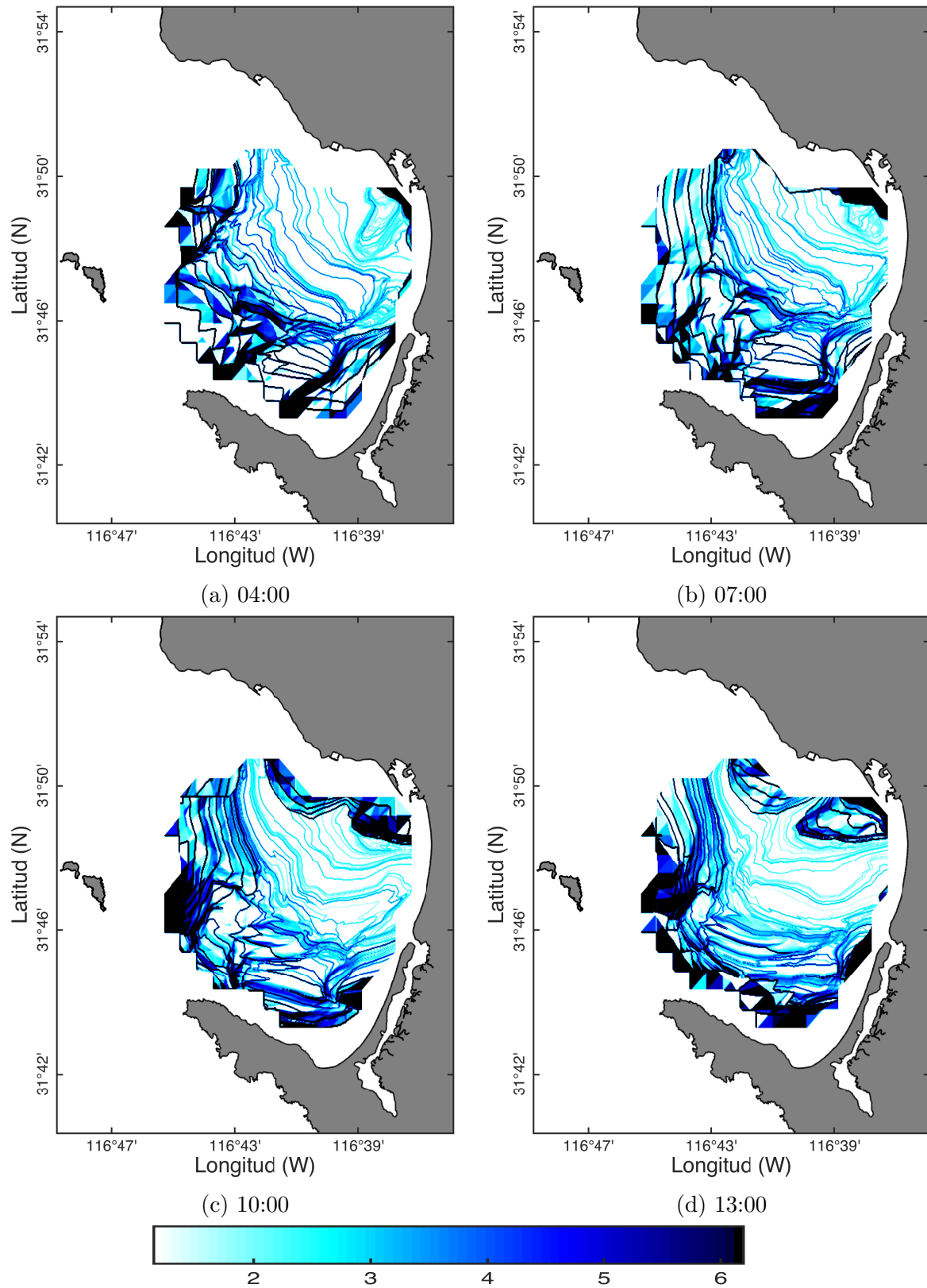


Figura 10: Campos de ELTF en tiempo hacia atrás en evento extremo. Las unidades de la barra de color son días^{-1}

Los campos ELTF durante el evento extremo muestran características muy similares en los 4 instantes. El primer instante (figura 9a) muestra zonas de valores altos en la zona norte del dominio, y en la zona cercana a la boca del EPB. Además, existen cordilleras de valores altos que dividen el dominio a la mitad, con orientación NW-SE. También se observan valores altos en las zonas sur y suroeste del dominio. En las figuras 9b - 9d se mantiene una geometría similar a la del primer instante. Persiste la mancha de valores altos del norte, aunque se curva hacia el centro de la bahía. Las cordilleras con orientación NW-SE, se recorren un poco hacia el suroeste. La mancha cercana a la boca del estero disminuye su tamaño hasta desaparecer en la figura 9d. En general los rasgos más importantes persisten durante casi medio día. Al comparar el campo ELTF hacia adelante con la figura de tiempos de residencia (figura 11) se observa que las regiones de valores de ELTF altos al norte del dominio coinciden con regiones de valores bajos de tiempo de residencia. El mismo resultado se observa en la zona cercana a la boca del estero en los primeros dos instantes (figuras 9a y 9b).

Para el primer instante del campo ELTF en tiempo hacia atrás, se observan zonas de valores altos en todo el W, SW y S del dominio (figura 10a). También existe una pequeña zona de valores altos justo en la entrada del Puerto de Ensenada (PE). En las zonas central, norte y este del dominio hay una prevalencia de valores bajos, aunque destacan algunas estructuras delgadas con valores de ELTF relativamente altos con orientación NW-SE. En los instantes siguientes, se mantienen las zonas de los valores más altos rodeando el dominio. En la entrada del PE crece la pequeña zona de valores altos y se expande por toda la zona noreste. Las estructuras delgadas rotan levemente hasta conseguir una orientación E-W en la figura 10d.

3.1.2. Tiempos de residencia dentro del dominio

Los tiempos de residencia de los mismos 4 instantes durante el evento extremo se muestran en la figura 11. Las unidades del tiempo de residencia están dadas en días. La barra de colores de la figura muestra valores altos en color negro y rojo, y valores bajos en color amarillo y blanco.

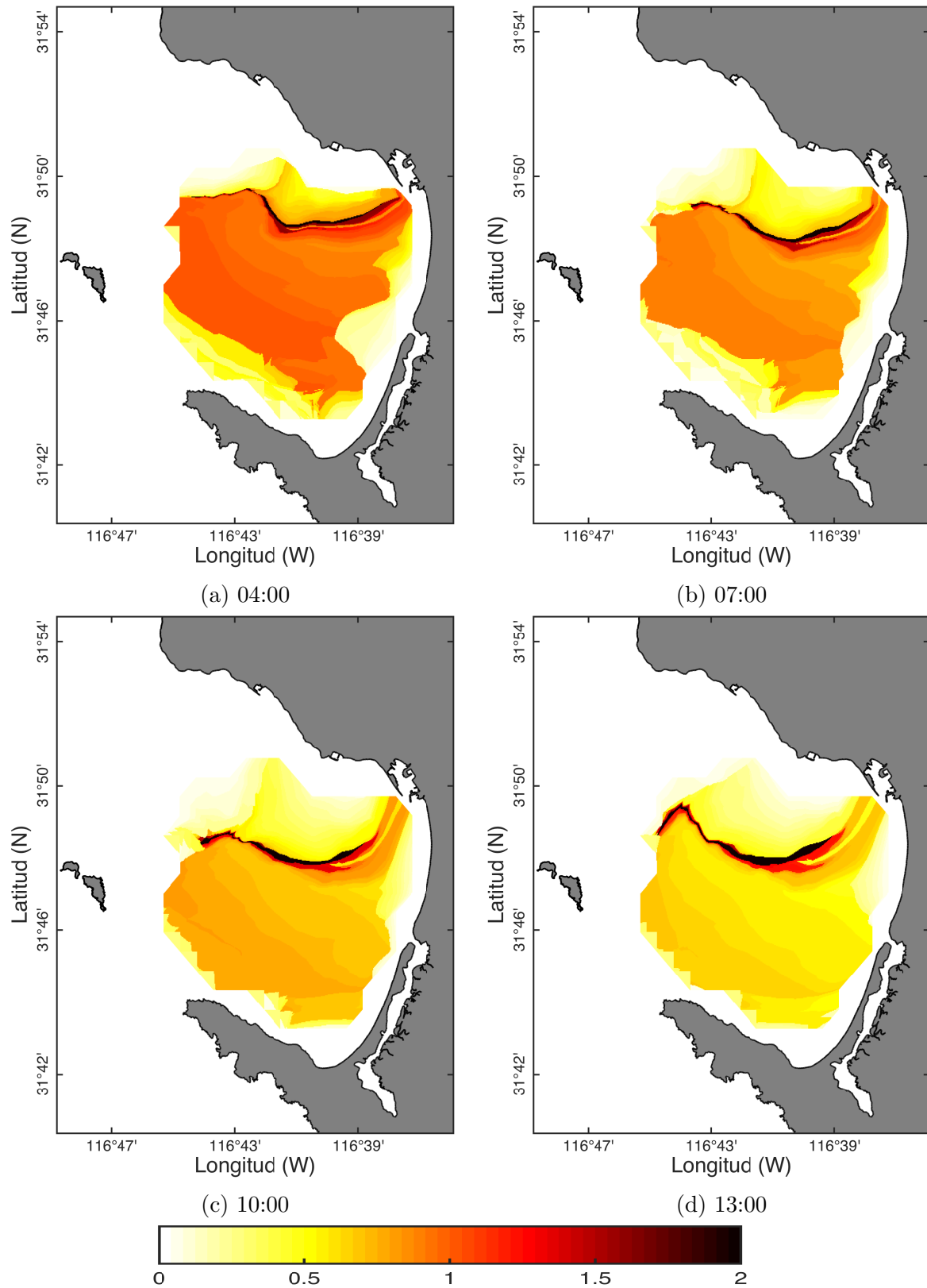


Figura 11: Tiempo de residencia dentro del dominio en evento extremo. Las unidades de la barra de color están dadas en días.

En el primer instante del evento extremo, se observan valores bajos de tiempo de residencia (<12 horas) en la zona S-SW, en el E y en el N con excepción de una franja cercana a Punta Morro (PM) y el área cercana al puerto (figura 11a). La mayor parte del resto del dominio presenta valores cercanos a 1 día de tiempo de residencia. Existe una estructura delgada que va desde la entrada al PE con orientación E-W con valores altos que llegan a los 2 días de tiempo de residencia. La estructura se desvía hacia el NW en la mitad del dominio. En los instantes siguientes, la franja de valores bajos localizada en el S-SW se hace más angosta hasta desaparecer en la figura 11d. La estructura delgada con valores altos se mantiene aunque con el paso del tiempo se curva hacia el centro de la bahía. El área al norte de la estructura aumenta su tamaño con valores menores a 10 horas. La zona sur del dominio de los radares está rodeada de barreras terrestres como es la península de Punta Banda y la barra del estero. En cambio la zona norte del dominio de los radares colinda con un área de bahía sin barreras terrestres cercanas. Esto sugiere que las partículas al norte del dominio están mas propensas a salir del mismo, a diferencia de las del sur. Observando el flujo promedio del evento (figura 7) se observa un flujo hacia el NE en el norte del dominio responsable de la rápida salida de las partículas en esta zona. Al sur de las ITS las corrientes son hacia el E-NE, por lo que las partículas que inician en el sur del dominio se mantienen dentro de la bahía durante más tiempo.

3.1.3. ECL

Las ECL atrayentes y repelentes del evento extremo se extrajeron de los campos ELTF en tiempo hacia adelante y hacia atrás respectivamente. Los mapas con las estructuras se muestran en la figura 12. Las ECL atrayentes se representan en color negro, y las repelentes en color rojo. Las flechas negras representan el campo de velocidades instantáneo medido por los RAF.

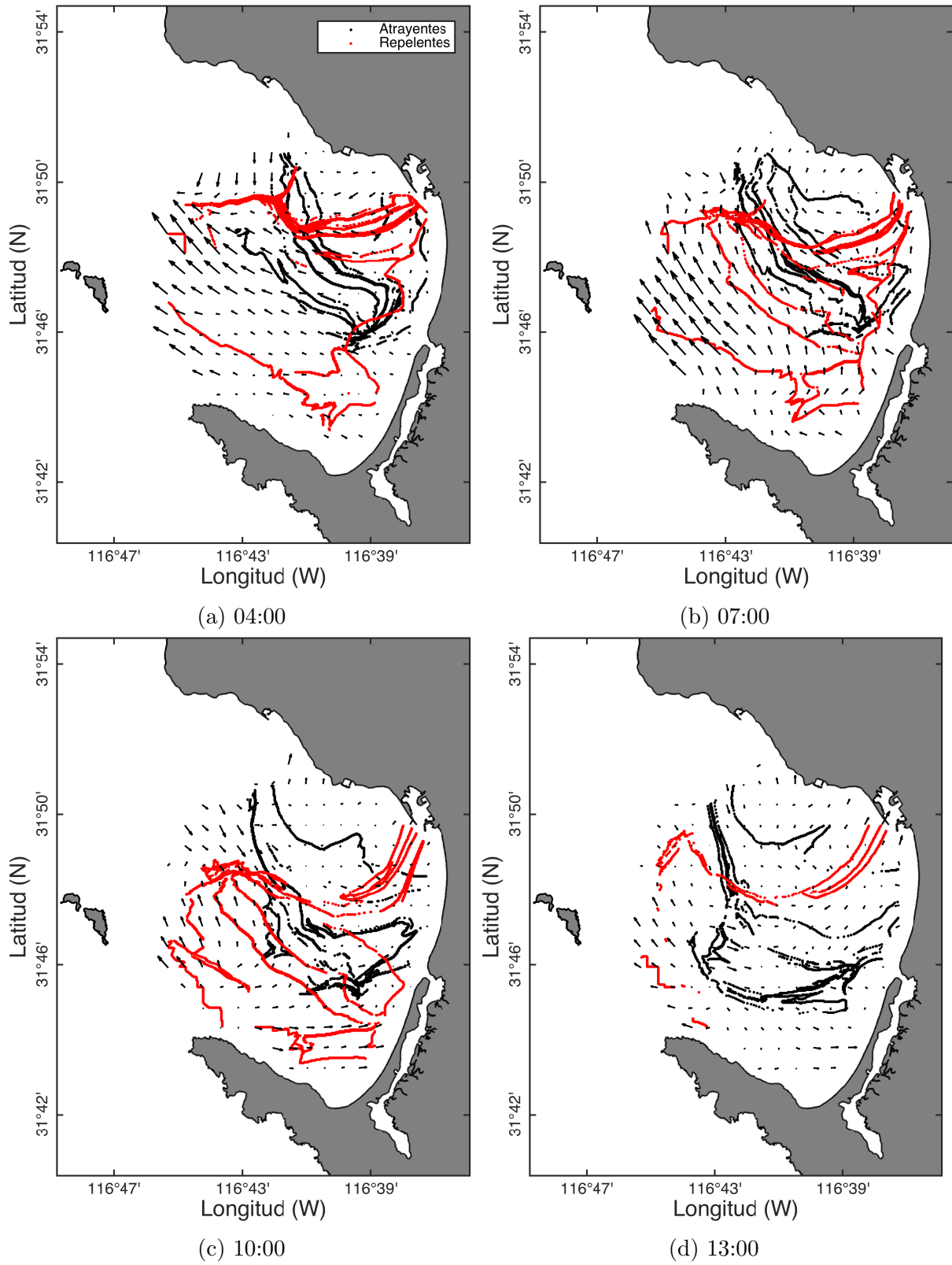


Figura 12: ECL en evento extremo de enero de 2010. Las ECL atrayentes se representan en color negro, y las repelentes en color rojo. Las flechas negras representan el campo de velocidades instantáneo.

Las ECL extraídas coinciden con las cordilleras de valores altos de ELTF (figura 12). Una vez que se desprecian las regiones con bajo tiempo de residencia se aprecian las estructuras más importantes de la región central del dominio. Las estructuras repelente más evidente se localizan en la zona norte desde el PE con orientación E-W. En los siguientes instantes se va curvando hacia el centro de la bahía. Existen otras estructuras repelentes con orientación NW-SE en la región central y suroeste del dominio aunque no logran aparecer en todos los instantes (figura 12d). Las estructuras atrayentes parten de la región norte de la bahía en todas las figuras. En los primeros dos instantes se orientan NW-SE, sin embargo, en los últimos se expanden hacia el centro del dominio. En general la geometría de las estructuras se mantiene durante las 12 horas.

Los vectores de la velocidad instantánea (flechas negras) muestran una corriente fuerte hacia el noroeste a las 4:00 y 7:00 (figura 12b y figura 12c). En los siguientes instantes el campo de velocidades instantáneo muestra corrientes de menor fuerza. Al observar las 4 figuras es evidente que no se pueden relacionar las velocidades instantáneas y las ECL, puesto que el cálculo de las estructuras involucra varios campos de velocidad para cada campo de ELTF.

3.1.4. Partículas a la deriva

Para observar la relación entre las trayectorias de partículas y las ECL durante el evento extremo, se posicionaron dos grupos de partículas a cada lado de una estructura repelente. Las partículas se advectaron a lo largo de 11 horas. La figura 14 muestra las posiciones de los grupos de partículas, sus posiciones iniciales, las ECL calculadas, y el campo de velocidades superficiales en cada instante. La figura (14a) corresponde a las 11:00 del 19 de enero y la última figura (14l) al 19 de enero a las 22:00. El intervalo temporal en cada figura es de 1 hora. Las posiciones iniciales de los grupos de partículas se muestran en la figura 13. Un conjunto de partículas se localiza al norte de la estructura (verdes) y el otro al sur (azules). Cada grupo cuenta con 100 partículas acomodadas en una malla cuadrada. La distancia inicial entre los centros de cada grupo es de 820 m.

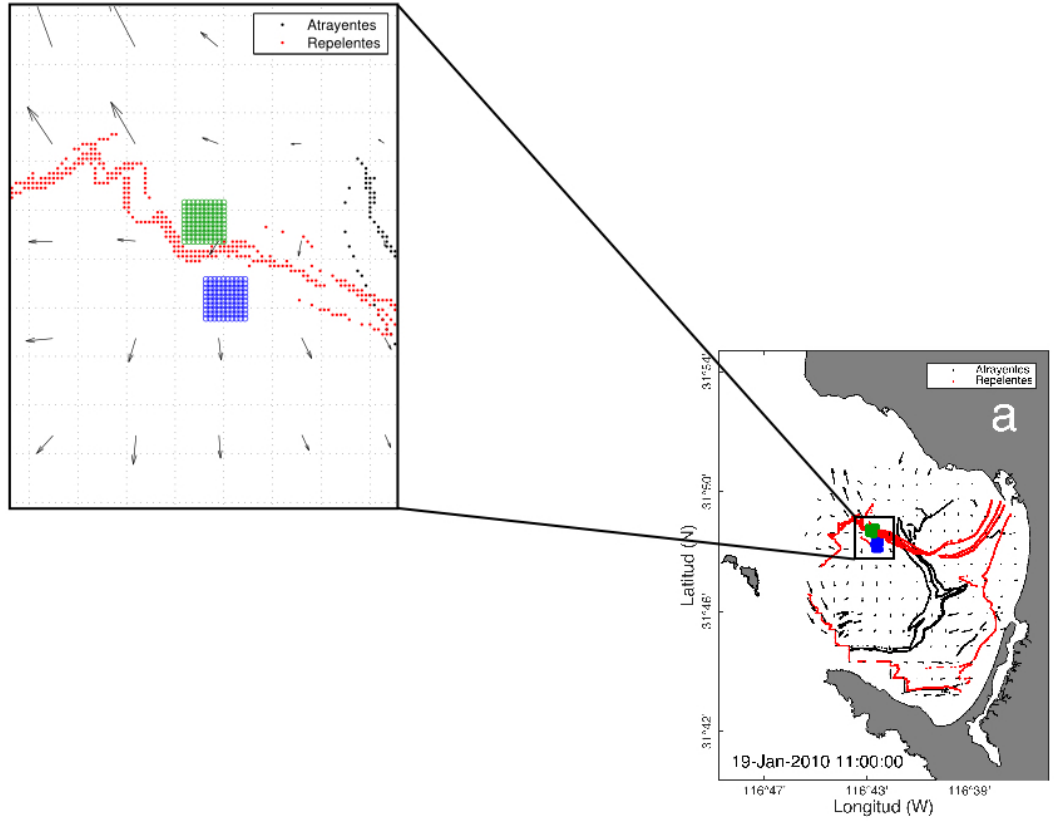


Figura 13: Posiciones iniciales de dos grupos de partículas (azul y verde) durante evento extremo. La franja roja entre los grupos corresponde a una ECL repelente . La distancia inicial entre los centros de los grupos de partículas es de 820 m. Distancia entre partícula y partícula del mismo grupo es $\Delta x = \Delta y = 45\text{m}$.

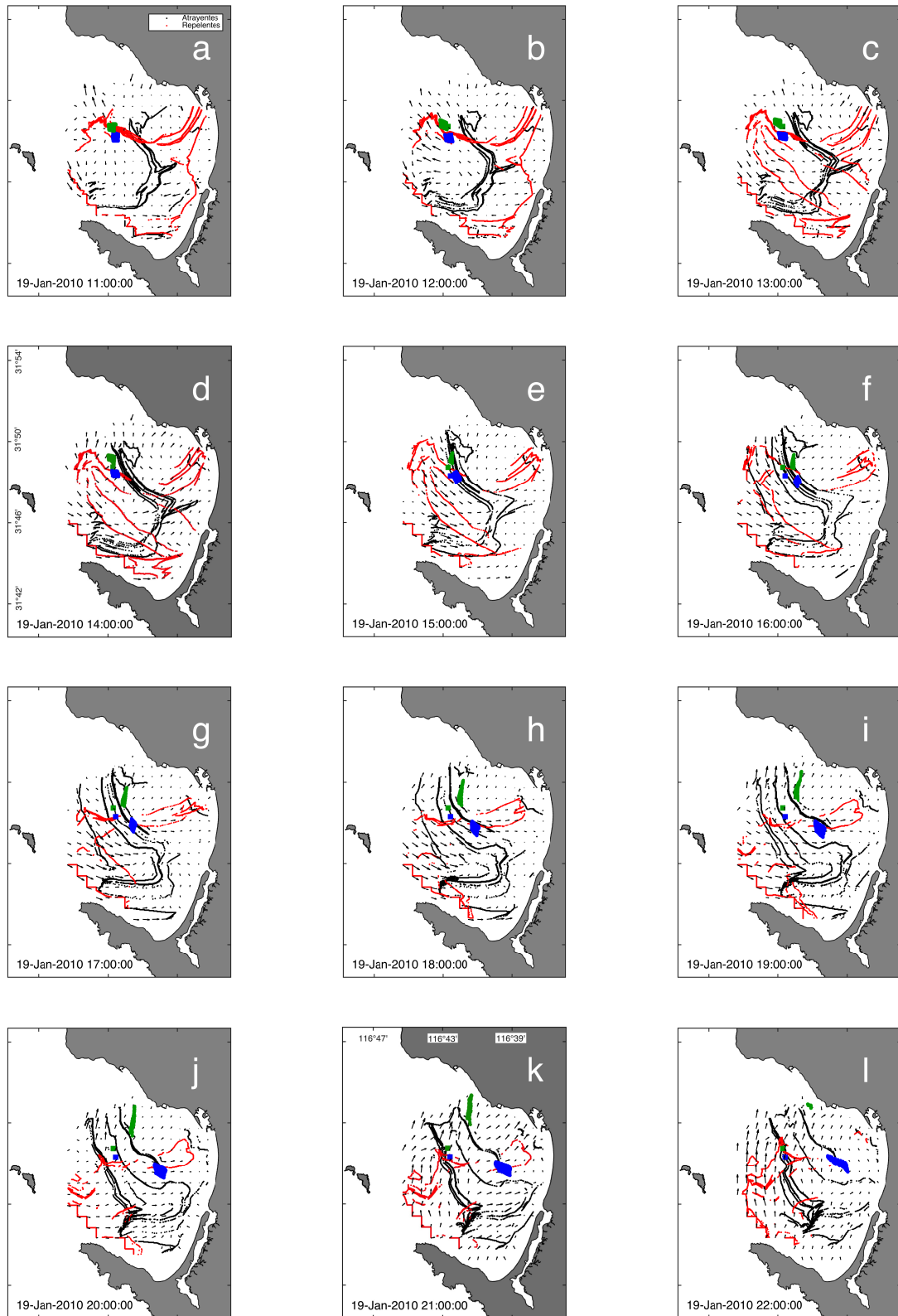


Figura 14: Partículas a la deriva sobre las ECL durante evento extremo de enero de 2010. Los grupos de partículas son advectados a lo largo de 11 horas. En cada figura se muestran las posiciones de los grupos de partículas y su posición inicial (puntos verdes y azules), las ECL calculadas (líneas rojo y negro), y el campo de velocidades superficiales (flechas negras) para el mismo instante.

En el evento extremo (figura 14) se observa la ECL repelente en el norte del dominio con orientación E-W y una estructura atrayente con orientación aproximadamente N-S. En los primeros 8 instantes (figuras 14a-14h) se observa el punto de silla entre la ECL repelente y la ECL atrayente. La trayectoria de las partículas coincide con lo esperado en un punto de silla. Ambos grupos se separan y se alinean con la estructura atrayente. En los instantes siguientes continúa el mismo comportamiento aunque la ECL repelente no es tan marcada. Finalmente en la figura 14l la mayoría de las partículas que comenzaron al norte de la estructura repelente salen del dominio, mientras que las partículas que comenzaron al sur se alinean con la estructura atrayente dentro del dominio. La ECL repelente se comporta como una barrera separando los grupos de partículas con diferente destino.

3.2. Evento Santa Ana

3.2.1. Campos de ELTF en tiempo hacia adelante y hacia atrás

Durante el evento Santa Ana se calcularon los campos de ELTF en cuatro instantes con intervalo de 3 horas, en tiempo hacia adelante (figura 15) y tiempo hacia atrás (figura 16). El primer instante corresponde al 6 de noviembre de 2010 a las 01:00 horas y el último del mismo día pero a las 10:00 horas. Las barras de color de los campos ELTF hacia adelante, muestran valores altos en color rojo y negro, y los valores bajos en color amarillo y blanco. Para los campos de ELTF hacia atrás, los valores altos se muestran en color azul y negro, y los valores bajos en color cian y blanco.

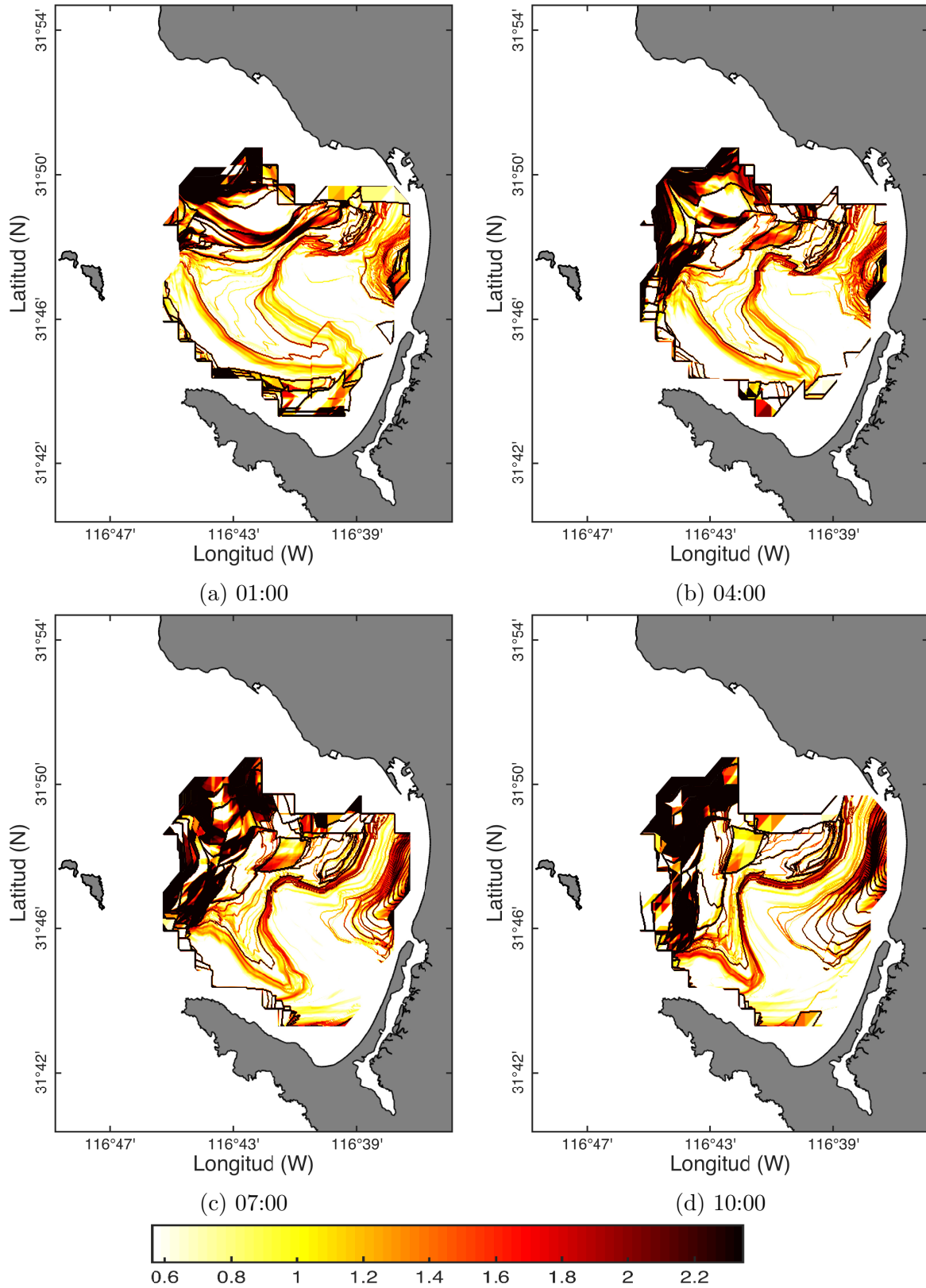


Figura 15: Campos de ELTF en tiempo hacia adelante en evento Santa Ana. Las unidades de la barra de color son d^{-1}

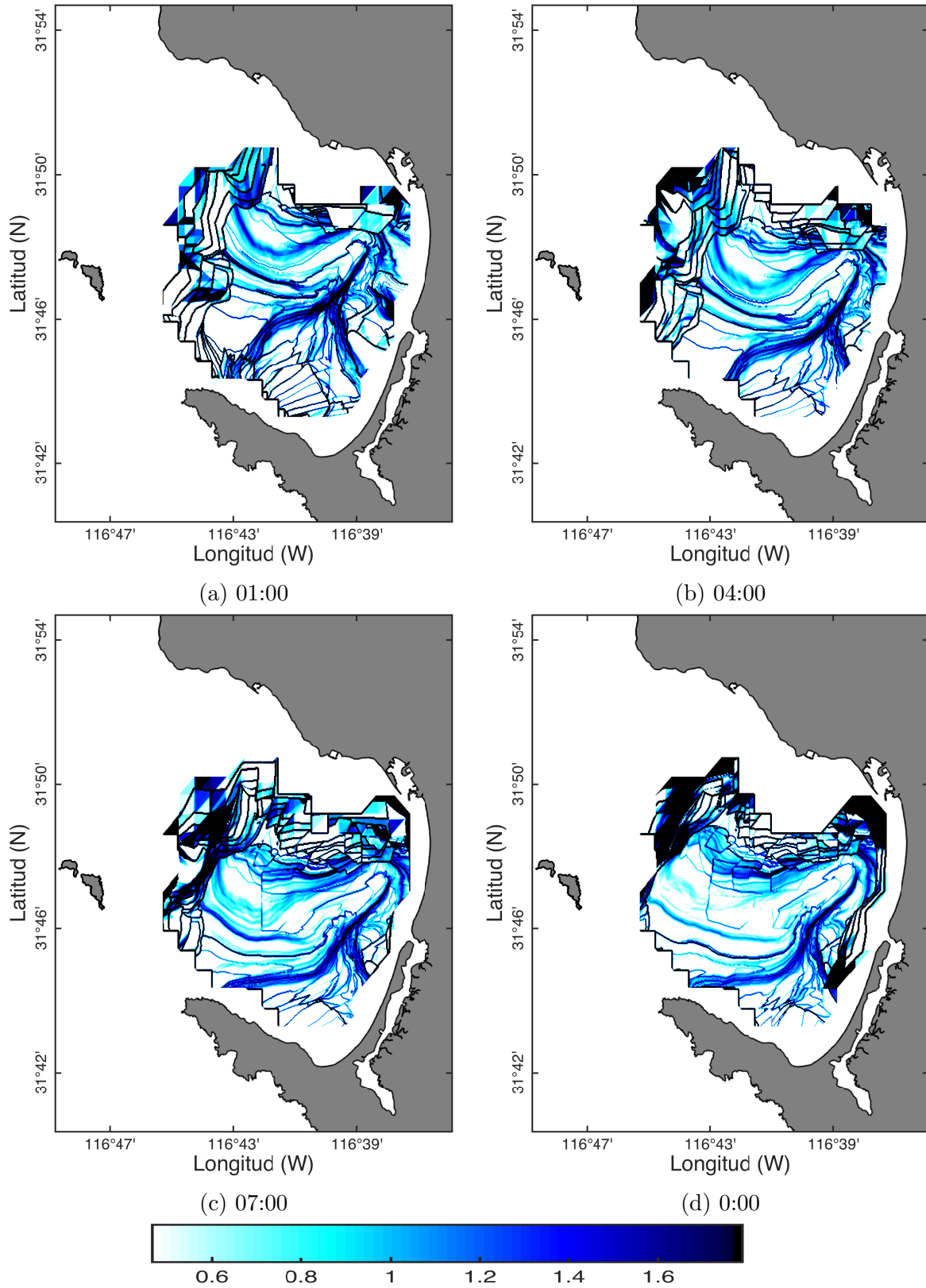


Figura 16: Campos de ELTF en tiempo hacia atrás en evento Santa Ana. Las unidades de la barra de color son d^{-1}

El campo ELTF en tiempo hacia adelante del primer instante (figura 15a) muestra zonas de valores altos en la zona noroeste del dominio y en la zona sur y suroeste. La zona central de la bahía presenta valores bajos de ELTF con excepción de una estructura que comienza en la zona cercana al puerto y continúa hacia el centro de la bahía donde cambia drásticamente su dirección hacia el EPB y posteriormente se alinea con la Península de Punta Banda (PPB). En los instantes siguientes (figuras 15b - 15d), las manchas de valores altos del noroeste se extienden hacia el oeste posicionándose en la franja externa del dominio de los radares a la altura de Punta San Miguel y la punta de la península. Los valores altos en la zona sur y suroeste van desapareciendo hasta quedar prácticamente inexistentes en la figura 15d. La estructura central se mantiene aunque se desdobra hasta quedar posicionada del PE a la punta de PPB con algunas curvaturas intermedias. Al comparar los campos ELTF con los tiempos de residencia, se observa que los valores altos de ELTF en la zona oeste y noroeste del dominio (figuras 15) corresponden a los bajos tiempos de residencia de la figura 17.

Para el primer instante del campo ELTF en tiempo hacia atrás, se observan franjas de valores altos de ELTF en todo el dominio. En la zona oeste existen estructuras paralelas con orientación N-S. En el centro de la bahía hay algunas curvadas con orientación E-W. Una estructura con valores altos muy evidente va del puerto hacia la punta de PPB (figura 16a). En los 2 instantes siguientes (figuras 16b y 16c) las zonas con valores altos de ELTF se mantienen poco cambiadas, sin embargo, en la figura 16d los valores altos se concentran en la zona norte y en la región cercana al EPB. La estructura que va del puerto hacia la punta PPB se mantiene.

3.2.2. Tiempos de residencia dentro del dominio

Los tiempos de residencia de los mismos 4 instantes durante el evento Santa Ana se muestran en la figura 17. Las unidades del tiempo de residencia están dadas en días. La barra de colores de las figuras de tiempos de residencia, muestra valores altos en color negro y rojo, y valores bajos en color amarillo y blanco.

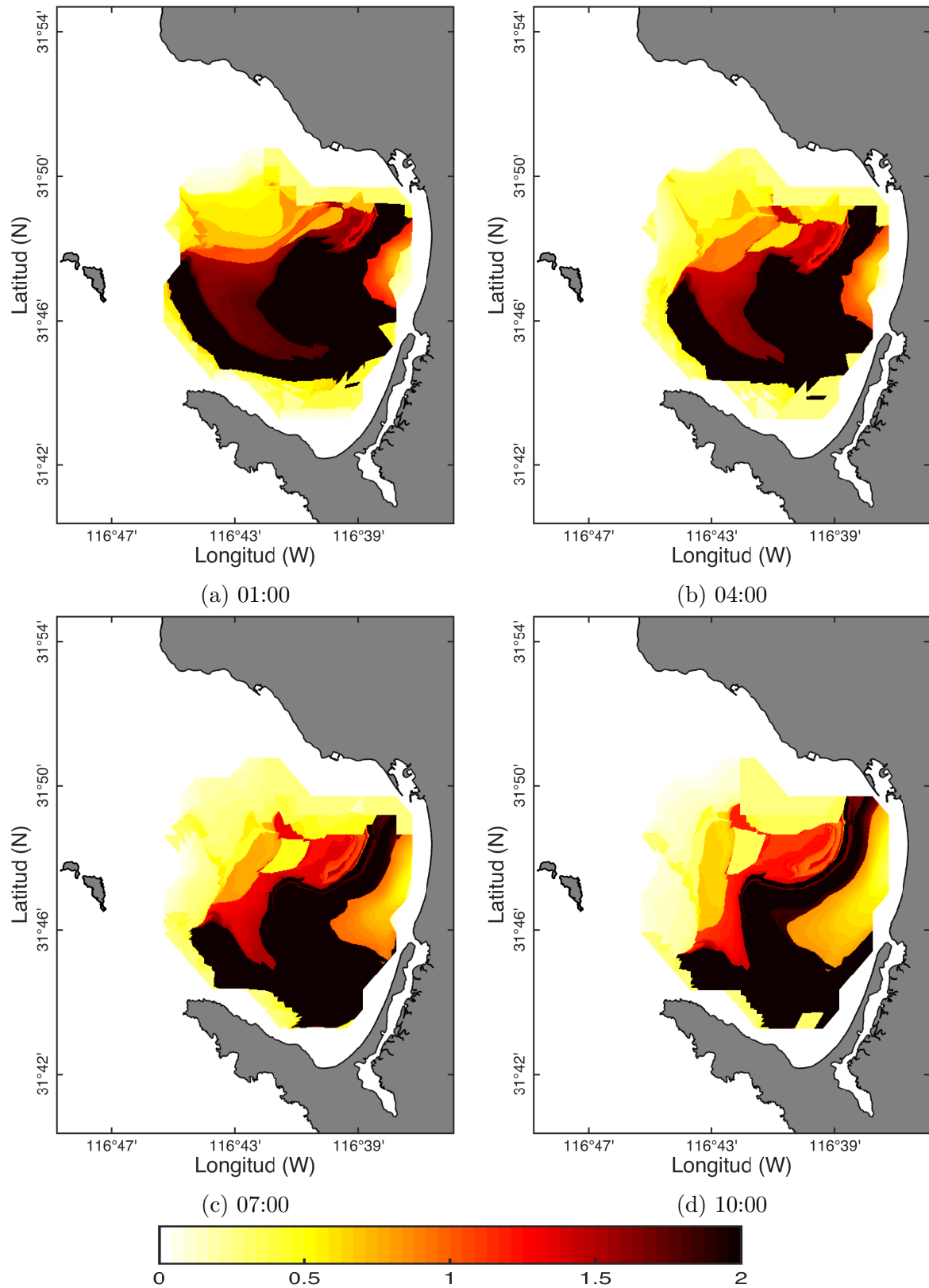


Figura 17: Tiempo de residencia dentro del dominio en evento Santa Ana. Las unidades de la barra de color están dadas en días.

En el primer instante del evento Santa Ana se observan valores bajos (< 12 horas) de tiempo de residencia en el NW y S del dominio. En la zona central de la bahía se observan valores mayores a 1 día y cercanos a 2 días (figura 17a). En los instantes siguientes, el área al norte del dominio de valores bajos se expande cubriendo casi la mitad del dominio NW en el último instante. Además, en la misma figura 16d se observan los valores cercanos a 2 días en una franja que va del PE a la punta de PPB y en la zona sur del dominio. El área cercana a Playa Hermosa (PH) presenta valores menores a 20 horas. El bajo tiempo de residencia en el norte vuelve a ser evidente probablemente debido a las pocas barreras terrestres. Sin embargo, al observar el flujo promedio durante el evento (figura 8) no se observa una corriente tan fuerte hacia el norte en la zona noroeste del dominio. El flujo hacia afuera del dominio se observa en la zona cercana a PM. Las magnitudes de las velocidades son menores a 5 cm s^{-1} en la mayor parte del dominio, por lo que las partículas permanecen dentro del dominio más tiempo. El remolino anticiclónico que se observa frente a la boca del estero (figura 8) coincide con valores altos de tiempo de residencia, sobre todo en los primeros dos instantes (figuras 17a y 17b). Esto sugiere que las partículas atrapadas en el remolino se mantienen circulando en la zona cercana al estero sin salir del dominio.

3.2.3. ECL

Las ECL atrayentes y repelentes del evento Santa Ana se extrajeron de los campos ELTF en tiempo hacia adelante y hacia atrás respectivamente. Los mapas con las estructuras se muestran en la figura 18. Las ECL atrayentes se muestran en color negro, y las repelentes en color rojo. Las flechas negras representan el campo de velocidades instantáneo medido por los radares.

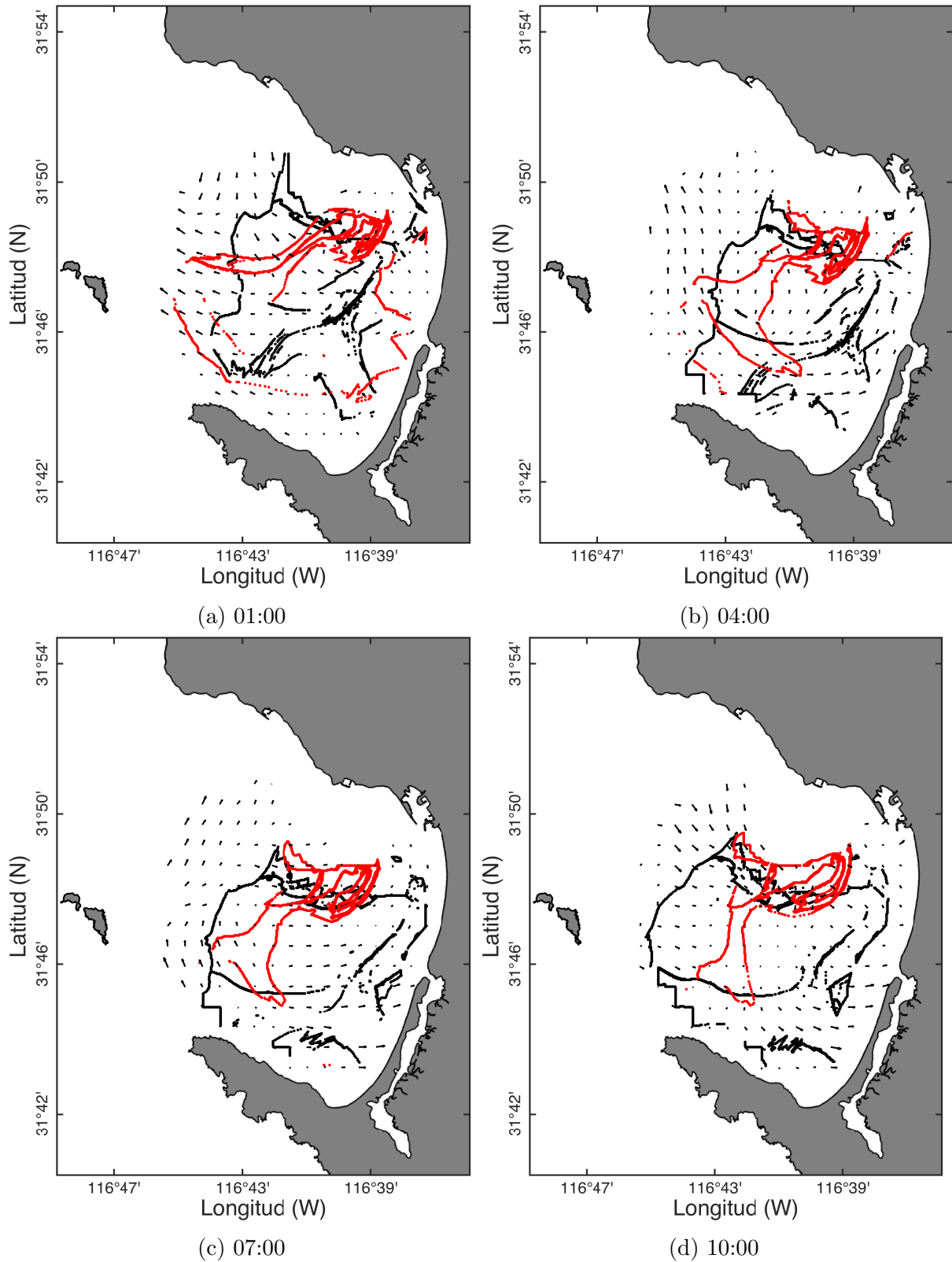


Figura 18: ECL en evento Santa Ana de noviembre de 2010. Las ECL atrayentes se representan en color negro, y las repelentes en color rojo. Las flechas negras representan el campo de velocidades instantáneo.

Las ECL que se extrajeron de los campos ELTF, y despreciando las regiones con bajo tiempo de residencia, coinciden con las cordilleras de valores altos del exponente y se aprecian las estructuras más importantes del interior de la bahía (figura 18). Las estructuras atrayentes en general bordean al dominio partiendo del norte central. Las ECL repelentes parten del Puerto de Ensenada hacia la región cercana a las islas. Al comparar las estructuras repelentes y los tiempos de residencia de la figura 17, se observa que las estructuras coinciden exactamente con el borde de la región de alto tiempo de residencia (2 días). Esto se observa en todos los instantes aunque la delimitación al sur y sureste solo es evidente en el primer instante (figura 18a). De nuevo, observando las velocidades instantáneas no se aprecia una relación directa con las estructuras.

3.2.4. Partículas a la deriva

Para observar la relación entre las trayectorias de partículas y las ECL durante el evento Santa Ana, se posicionaron dos grupos de partículas a cada lado de una ECL repelente. Las partículas se advectaron a lo largo de 11 horas. La figura 20 muestra las posiciones de los grupos de partículas, sus posiciones iniciales, las ECL calculadas y el campo de velocidades superficiales en cada instante. La primer figura (20a) corresponde a las 13:00 del 6 de noviembre y la última figura (20l) al 7 de noviembre a las 00:00. El intervalo temporal para cada figura es de 1 hora. Las posiciones iniciales de los grupos de partículas se muestran en la figura 19 y en 20a. Un conjunto de partículas se localiza al SE de la ECL repelente (verdes) y el otro al NW (azules). Cada grupo cuenta con 100 partículas acomodadas en una malla cuadrada. La distancia inicial entre los centros de cada grupo es de 760 m.

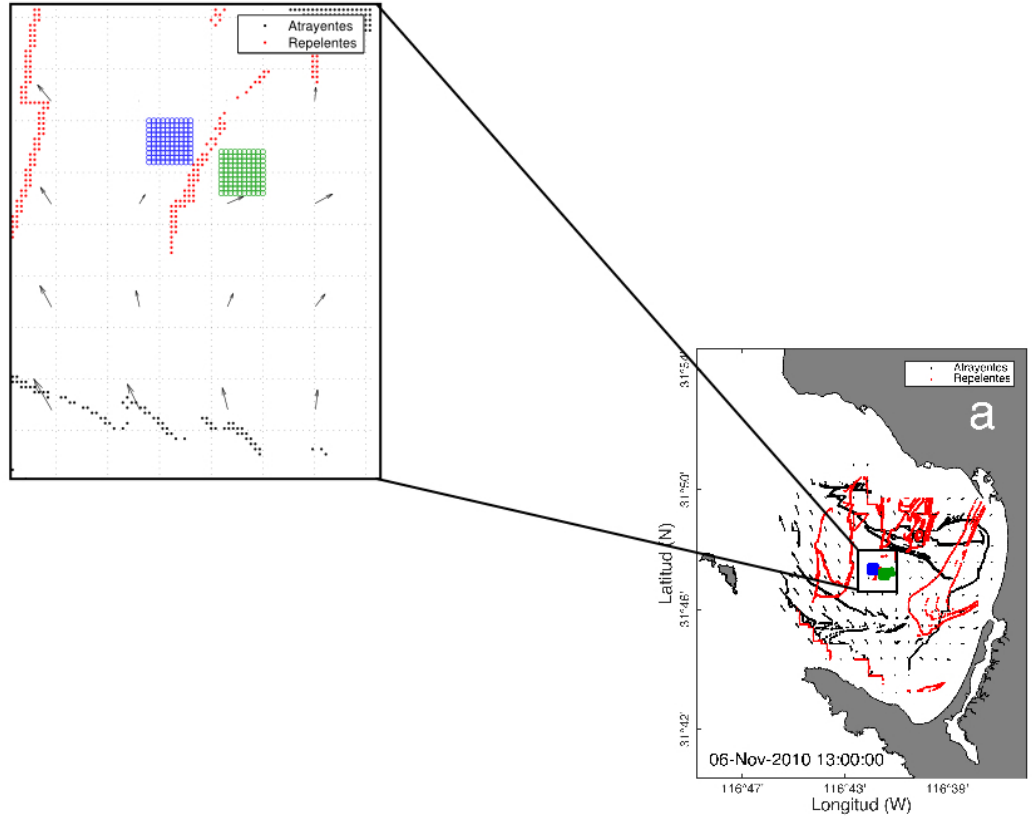


Figura 19: Posiciones iniciales de dos grupos de partículas (azul y verde) durante evento Santa Ana. La franja roja entre los grupos corresponde a una ECL repelente. La distancia inicial entre los centros de los grupos de partículas es de 760 m. Distancia entre partícula y partícula del mismo grupo es $\Delta x = \Delta y = 45\text{m}$.

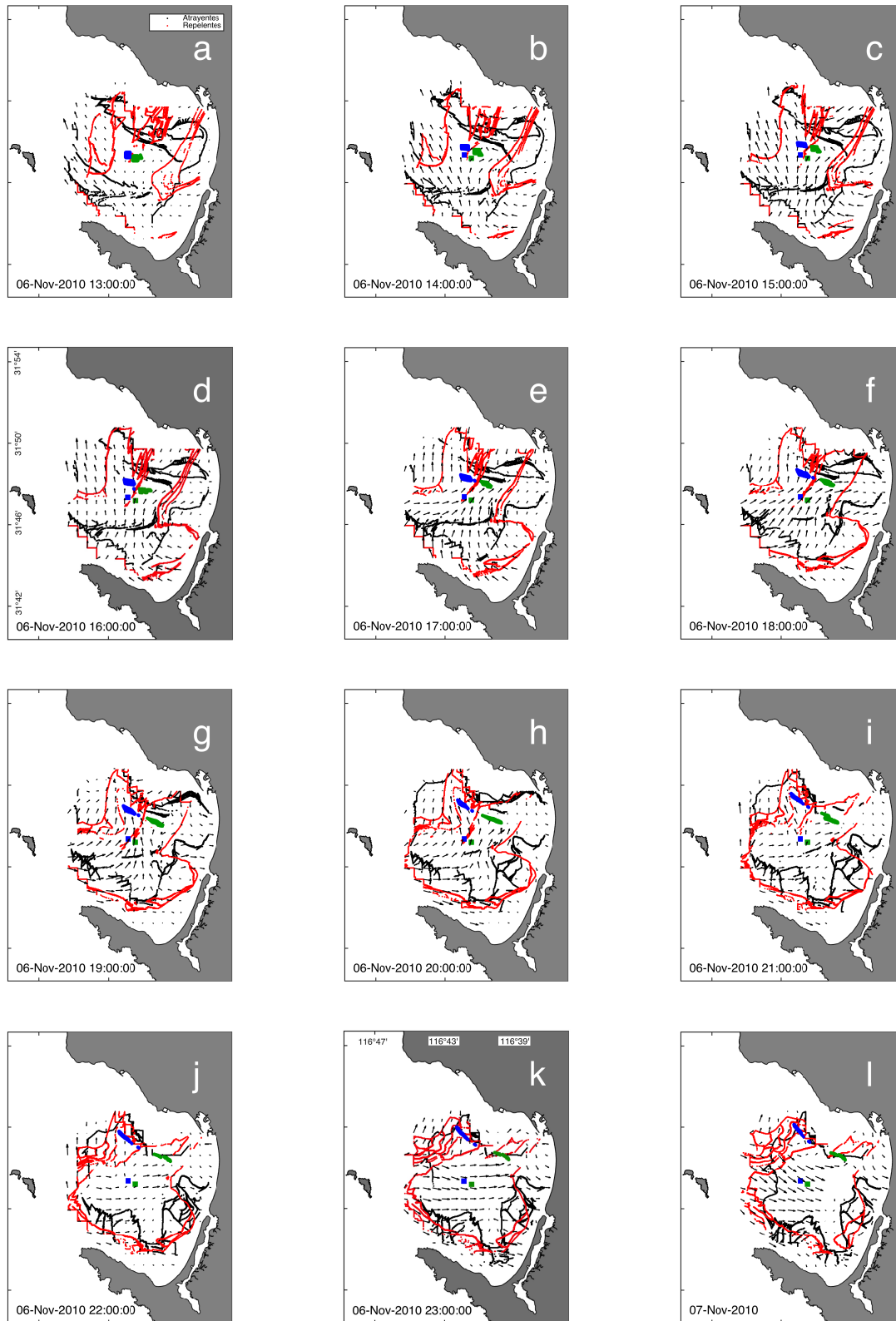


Figura 20: Partículas a la deriva sobre las ECL durante evento Santa Ana de noviembre de 2010. Los grupos de partículas son advectados a lo largo de 11 horas. En cada figura se muestran las posiciones de los grupos de partículas y su posición inicial (puntos verdes y azules), las ECL calculadas (líneas rojo y negro), y el campo de velocidades superficiales (flechas negras) para el mismo instante.

En el evento Santa Ana (figura 20) se observa un punto de silla en la zona N del dominio cercano a PM. Los grupos de partículas a cada lado de la ECL repelente, se separan entre sí y se acercan a la ECL atrayente con orientación NW-SE. La ECL repelente que separa las partículas inicialmente es advectada por el mismo flujo pero a una razón menor que las partículas. En todo momento se posiciona entre los dos grupos de partículas. En el instante final se observa que las partículas azules se trasladaron hacia el noroeste en el borde del dominio mientras que las verdes se trasladaron en dirección al Puerto de Ensenada. La distancia entre los dos grupos de partículas es considerablemente mayor a la distancia inicial y el eje de mayor estiramiento coincide con la orientación de la estructura repelente.

4. Discusión

En los campos de ELTF se observan valores altos en los bordes del dominio. En el evento extremo existe una región de valores altos en el norte de todos los mapas de ELTF hacia adelante (figura 9) y coinciden con los valores bajos de tiempo de residencia (figura 11). La estrecha relación entre valores altos de ELTF y tiempos de residencia bajos vuelve a ser evidente en las figuras 15 y 17 del evento Santa Ana. Los altos valores de ELTF que se observan en la zona noroeste del dominio coinciden con bajos tiempos de residencia en la misma zona. Estos bajos tiempos de residencia probablemente se deban a la falta de barreras terrestres en la zona noroeste del dominio. Al ser T inversamente proporcional a σ en la ecuación 10, las partículas que salen rápidamente del dominio presentan valores altos de ELTF. Si bien la ecuación 10 considera las trayectorias de partículas individuales (y T específico), es difícil definir la veracidad de las ECL en las zonas con bajos tiempos de residencia. Es probable que sean consecuencia de errores numéricos en lugar de barreras de transporte reales. Para comprobar la situación se tendría que disponer de un dominio con mediciones que abarcaran mayor área o aumentar la resolución temporal. Por esta razón se optó por despreciar las ECL posicionadas en regiones con tiempos de residencia menores a $\frac{T}{2}$.

Las figuras que corresponden al evento extremo muestran una geometría interesante. Los campos ELTF (figura 9) presentan los valores más altos en una mancha grande al norte de la bahía. En las figuras de los tiempos de residencia (figura 11) se muestra una clara franja de valores muy altos cercanos a los 2 días que delimita la mancha de valores altos de ELTF de la figura 9. Tanto los mapas de ELTF como los de tiempo de residencia evidencian las dos direcciones predominantes de las corrientes al norte y sur de las islas descritas por Cervantes-Audelo (2013). Las partículas al norte tienden a salir rápidamente del dominio (valores altos de ELTF y bajos tiempos de residencia). Las partículas al S tienden a permanecer más tiempo en el dominio (cercano a 1 día). En la zona justo donde cambian las direcciones los tiempos de residencia son cercanos a los dos días. La línea divisora entre las regiones con diferente tiempo de residencia y valores de ELTF se representa como una estructura repelente bien marcada (figuras 12a-12c). La ECL actúa como barrera y delimita la zona al norte y sur de las ITS donde el comportamiento y transporte de las partículas es diferente. En el estudio de las trayectorias de partículas de Cervantes-Audelo (2013), se menciona que existe una zona de convergencia en el centro de la bahía. En las figuras 12a-12c se muestra una serie de estructuras atrayentes que cruzan la zona central de la bahía y coinciden con la zona de convergencia. Además Cervantes-Audelo (2013) menciona una acumulación de partículas en la franja costera desde Punta Morro a Playa Hermosa frente al Puerto de Ensenada. En las figuras 12a-

12b las estructuras atrayentes están orientadas NW-SE desde Punta Morro hacia la boca del estero. Las ECL atrayentes pueden reafirmar la acumulación de partículas en la zona.

Durante el evento Santa Ana se observa una cordillera de valores altos que va del Puerto de Ensenada hacia las islas curvándose hacia el estero en el centro (figura 15), la cual coincide exactamente con el borde de la zona de alto tiempo de residencia de la figura 15. Las ECL repelentes de la figura 18 muestran la misma geometría aunque no del todo marcada. Durante todo el evento Santa Ana se observan ECL repelentes que comienzan en el puerto y van hacia la zona suroeste. Las partículas al N-NW de la estructura tienden a salir más rápido del dominio, mientras que las partículas al S-SE tienden a permanecer más tiempo dentro de la bahía. Esta barrera divisora coincide con el límite entre el remolino ciclónico y anticiclónico reportado por Cervantes-Audelo (2013). La acumulación de partículas se observó cerca de Playa Hermosa y al norte de la bahía (Cervantes-Audelo, 2013). Las ECL atrayentes de la figura 18, bordean el centro de la bahía, aunque existe una bien marcada en la zona este paralela a la línea de costa que puede ser la evidencia de la acumulación de partículas entre la boca del estero y Playa Hermosa.

Para observar el comportamiento Lagrangeano de las partículas se seleccionaron posiciones iniciales para los grupos de partículas en regiones con ECL de geometría interesante y alto tiempo de residencia. La intersección de una estructura atrayente y una repelente actúa como un punto de silla. Las trayectorias de partículas en las proximidades de los puntos de silla tienden a alejarse de la ECL repelente y acercarse a la atrayente asintóticamente. En ambos eventos (extremo y Santa Ana) se posicionaron grupos de partículas en cada lado de una ECL repelente y cercanos a una intersección de estructura atrayente y repelente. La separación inicial de los grupos de partículas en ambos eventos fue de alrededor de 800 metros, y después de 12 horas de advección su separación aumentó considerablemente (varios kilómetros), confirmando la presencia de la barrera repelente. Además, en ambos eventos las partículas tendieron a alinearse con la ECL atrayente.

En los mapas que muestran tanto las ECL repelentes como las atrayentes, se graficó el campo vectorial de las corrientes superficiales medidas por los radares. En ninguna figura se observa una relación directa entre las velocidades instantáneas y las estructuras. El cálculo del campo ELTF involucra varios campos de velocidad para la advección de las partículas. Durante el tiempo de integración las velocidades cambian en gran medida debido a varios factores, como pueden ser la marea y el viento. Las ECL son producto de un conjunto de campos vectoriales, por lo que no tendría que haber una relación muy evidente con los vectores de las corrientes en el momento de liberación de las partículas.

En este trabajo se utilizaron datos crudos de velocidades superficiales en la BTS. Los datos medidos siempre tienen desviación del sistema físico, y errores pequeños en el campo

de velocidades. Los pequeños errores en las velocidades pueden llevar a errores grandes de trayectorias de partículas integradas, por estar sujetas al *efecto mariposa* (Shadden *et al.*, 2009). Sin embargo, las ECL son una forma burda de entender la dinámica de fluidos complejos, y por su misma naturaleza, tienden a opacar errores de medición de los radares. Shadden *et al.* (2009) encontraron que existe un error espacial de 2 km en la posición de las ECL. Sin embargo, menciona que este error es significativamente menor al error típico entre trayectoria integrada y medida de las boyas, que puede alcanzar desviaciones comparables con la longitud del dominio en el mismo marco de tiempo que el usado para el cómputo de campos de ELTF.

Las ECL pueden ser utilizadas para estudios de transporte en tiempo real. Aunque las ECL son separatrices que se mueven, solo es necesario conocer la posición de la ECL en el momento de liberación. El movimiento de las ECL es normalmente más lento que el promedio de la dinámica de las partículas del fluido. Por lo tanto, es razonable suponer que el desfase temporal de la posición de las ECL calculadas de datos observacionales puede usarse en algunas circunstancias para aplicaciones en tiempo real (Shadden *et al.*, 2009). También se pueden utilizar datos de modelación numérica para obtener los campos de velocidad necesarios para el calculo de las ECL en el tiempo de liberación.

La BTS es utilizada como zona de descarga para desechos industriales y domésticos (Argote-Espinoza *et al.*, 1991) y material del dragado del canal de navegación del Puerto de Ensenada (Mateos *et al.*, 2009). El conocer la circulación de la bahía es de gran importancia para el manejo de las descargas. En Argote-Espinoza *et al.* (1991) se menciona que las descargas industriales máximas en BTS ocurren en los meses de verano en la parte norte de la bahía. Por los patrones de circulación en verano estas descargas se transportarían hacia el interior de la bahía. En condiciones de viento de invierno y Santa Ana el transporte sería hacia fuera de la bahía. Observando los campos de ELTF, los mapas de tiempo de residencia y las ECL durante el evento extremo, se esperaría que descargas al norte del dominio tendieran a salir rápidamente de la bahía, similar a lo que se observa con las partículas a la deriva de la figura 14. Para el evento Santa Ana también se esperaría que las descargas en el norte tendieran a salir de la bahía. Ambos eventos analizados en este trabajo coinciden con lo descrito en Argote-Espinoza *et al.* (1991), donde el transporte de desechos sería hacia fuera de la BTS. El conocer la geometría de las ECL en la Bahía Todos Santos es una gran ventaja para el estudio de partículas a la deriva como el plancton, los florecimientos algales, los derrames petroleros o las descargas de materiales, así como una excelente herramienta en las operaciones de búsqueda y rescate.

5. Conclusiones

- El método de ELTF resultó adecuado para la identificación de ECL en la BTS con mediciones de radares de alta frecuencia. La gran cobertura espacial y la alta resolución temporal de los datos de los RAF permiten advectar las partículas suficiente tiempo para evidenciar las ECL dentro de la bahía.
- Las ECL repelentes delimitan las zonas con diferentes tiempos de residencia dentro del dominio. En el evento extremo, las zonas con menor tiempo de residencia fueron al norte y al suroeste de la BTS. En el evento Santa Ana las zonas con menor tiempo de residencia fueron al norte y noroeste. En ambos eventos las ECL repelentes se observaron justo en el límite de las zonas con menor tiempo de residencia. Durante el evento Santa Ana se observó un área mayor con tiempos de residencia máximos que durante el evento extremo.
- La geometría de las ECL proporcionan información del comportamiento de las trayectorias de partículas en su proximidad. En los experimentos de partículas a la deriva los grupos de partículas a cada lado de la ECL repelente se separaron considerablemente después de 12 horas de advección alineándose con la estructura atrayente.
- Las ECL identificadas en el evento extremo y el evento Santa Ana muestran geometrías muy diferentes. En el evento extremo, la ECL repelente más notoria se observó al norte de la bahía con orientación E-W. En el evento Santa Ana las ECL repelentes más notorias separaron la zona noroeste y la zona noreste del resto del dominio. Las ECL atrayentes mostraron mayor variabilidad; sin embargo, en ambos eventos predominó una ECL atrayente desde el norte del dominio con orientación NW-SE.
- El método de ELTF para la extracción de las ECL es una buena herramienta para el estudio de partículas a la deriva en la BTS, cuando el estudio directo de las trayectorias de partículas es confuso o engañoso. Conociendo la posición y geometría de las ECL es posible inferir zonas de acumulamiento o dispersión de partículas planctónicas.

Referencias

- Argote-Espinoza, M. L., Gavidia-Medina, F. J., y Amador-Buenrostro, A. (1991). Wind-induced circulation in Todos Santos bay, B. C., Mexico. *Atmósfera*, 4(2):101–115.
- Castro, R., Parés-Sierra, A., y Marinone, S. (2003). Evolución y extensión de los vientos Santa Ana de febrero de 2002 en el océano, frente a California y la Península de Baja California. *Ciencias Marinas*, 29(3):275–281.
- Cervantes-Audelo, I. G. (2013). *Análisis de circulación y dispersión en la Bahía de Todos Santos, Baja California*. Tesis de maestría, Universidad del Mar (UMAR), Puerto Ángel, Oaxaca. p. 61.
- Chapman, R. D. y Graber, H. C. (1997). Validation of HF radar measurment. *Oceanography*, 10(2):76–79.
- Gutiérrez-Gutiérrez, O. Q. (1999). *Análisis numérico y descripción de la circulación barotrópica en la Bahía de Todos Santos, B.C.* Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, B.C. p. 64.
- Huhn, F. (2012). *Lagrangian Coherent Structures: Application to Unsteady Oceanic and Laboratory Flows*. Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela. p. 139.
- Karrasch, D. y Haller, G. (2013). Do finite-size Lyapunov exponents detect coherent structures? *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 23:043126.
- Larrañaga Fu, M. J. (2013). *Variabilidad de la circulación superficial en la Bahía Todos Santos, Baja California, México*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, B.C. p. 64.
- Lynn, R. J. y Simpson, J. J. (1987). The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 92(C12):947–966.
- Mateos, E., Marinone, S., y Parés-Sierra, A. (2009). Towards the numerical simulation of the summer circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, B.C. Mexico. *Ocean Modelling*, 27:107–112.
- Paduan, J. D. y Graber, H. C. (1997). Introduction to high frequency radar: Reality and myth. *Oceanography*, 10(2):36–39.
- Paduan, J. D. y Rosenfeld, L. K. (1996). Remotely sensed surface currents in Monterey Bay from shore-based HF radar (Costal Ocean Dynamics Application Radar). *Journal of Geophysical Research*, 101(C9):20,669–20,686.

- Peacock, T. y Haller, G. (2013). Lagrangian coherent structures: The hidden skeleton of fluid flows. *Physics Today*, 66(2):41–47.
- Shadden, S. C., Lekien, F., y Marsden, J. E. (2005). Definition and properties of Lagrangian coherent structures from finite-time Lyapunov exponents in two-dimensional aperiodic flows. *Physica D*, 212:271–304.
- Shadden, S. C., Lekien, F., Paduan, J. D., Chavez, F. P., y Marsden, J. E. (2009). The correlation between surface drifters and coherent structures based on high-frequency radar data in Monterey Bay. *Deep-Sea Research II*, 56:161–172.
- Zeekant, E. (2011). Lagrangian coherent structures of accumulating inertial particles in vortex flow on a disk. Reporte interno, San Diego State University, Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics. p. 56.
- Zertuche-Chanes, R. (2013). *Aplicación de un modelo numérico tridimensional para estudiar la hidrodinámica de la Bahía de Todos Santos*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, B.C. p. 59.

A. Lista de variables y abreviaciones

A.1. Variables

$\vec{x}$	Vector de posición con componentes (x, y) , corresponde a coordenadas geográficas.
$\vec{v}$	Campo de velocidades superficiales con componentes (u, v)
t	Tiempo
T	Tiempo de integración (advección)
t_0	Instante de tiempo inicial
$\sigma_{t_0}^T$	Magnitud escalar de ELTF en el intervalo de tiempo $(t_0, t_0 + T)$
D	Dominio
$\phi_{t_0}^{t_0+T}$	<i>Mapa de flujo</i> , El mapa que lleva un punto en el dominio en t_0 a su posición en tiempo $t_0 + T$.

$$\begin{aligned} \phi_{t_0}^{t_0+T}: D &\rightarrow D \\ \vec{x}_0 &\mapsto \vec{x}(t; t_0, \vec{x}_0) \end{aligned}$$

$\vec{y}$	Punto cercano a $\vec{x}$, referencia para medir separación
$\delta\vec{x}$	Distancia entre $\vec{x}$ y $\vec{y}$ (perturbación)
$\mathcal{O}$	Orden del error de la aproximación
$\langle \cdot, \cdot \rangle$	Producto interior o producto escalar
Δ	Versión de tiempo finito del tensor de deformación de Cauchy-Green
$\lambda_{\text{máx}}$	Máximo eigenvalor de Δ
$\ A\ _2$	Norma espectral de A o, norma l_2 de matrices (<i>Euclideana</i>)
M^*	Matriz transpuesta conjugada de M

A.2. Abreviaciones

BTS: Bahía Todos Santos

PH: Playa Hermosa

ECL: Estructuras Coherentes Lagrangianas

PPB: Península de Punta Banda

ELTF: Exponente de Lyapunov de Tiempo Finito

PSM: Punta San Miguel

EPB: Estero de Punta Banda

ITS: Islas Todos Santos

PE: Puerto de Ensenada

PS: Puerto del Sauzal

PM: Punta Morro

CC: Corriente de California

