

Tesis defendida por
Mauro Wilfrido Santiago García
y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Silvio Guido Lorenzo Marinone
Moschetto
Director del Comité

Dr. Miguel Fernando Lavín Peregrina
Miembro del Comité

Dr. Oscar Uriel Velasco Fuentes
Miembro del Comité

Dr. Gilberto Gaxiola Castro
Miembro del Comité

Dr. Jesús Manuel Figueroa Rodríguez
Coordinador
Programa de Posgrado en Oceanografía
Física

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director
Dirección de Estudios de Posgrado

Febrero de 2013

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



Programa de Posgrado en Ciencias
en Oceanografía Física

La conectividad tridimensional en el Golfo de California, a partir de un modelo numérico

Tesis

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Mauro Wilfrido Santiago García

Ensenada, Baja California, México, 2013.

Resumen de la tesis de Mauro Wilfrido Santiago García, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

La conectividad tridimensional en el Golfo de California, a partir de un modelo numérico

Resumen aprobado por:

Dr. Silvio Lorenzo Guido Marinone Moschetto
Director de tesis

La cuantificación de la conectividad o el flujo e intercambio de materiales, permite conocer el grado de atrapamiento y la transferencia de posibles trazadores como larvas de peces, nutrientes y contaminantes entre diferentes regiones del océano. En el Golfo de California el estudio de la conectividad se ha limitado para ciertos períodos y regiones y es particularmente escaso para la región sur. En este trabajo se investigó la conectividad entre 17 provincias o áreas definidas por regiones dominadas por remolinos y flujos intensos o débiles, considerando el carácter tridimensional de las estructuras que tienden a atrapar o dispersar partículas en la columna de agua. Estas fueron identificadas por el parámetro de Okubo-Weiss y la geometría del flujo en los campos de velocidad promediados mensualmente, obtenidos de las salidas de un modelo numérico tridimensional, no lineal y baroclínico. En cada provincia se liberaron partículas pasivas en la columna de agua y fueron advectadas por períodos de 28 días usando el esquema de advección-difusión descrita por Visser (1997) y Proehl *et al.* (2005). La conectividad entre las provincias se exploró con la integración de las partículas liberadas en las diferentes profundidades de cada área, que en general capturaron los patrones de atrapamiento y transporte observados en los diferentes niveles de liberación. En la región norte, el atrapamiento de partículas fue mayor durante el período de circulación ciclónica (verano) comparado con el período anticiclónico (invierno). Esta diferencia se puede explicar por la presencia del remolino en la porción central de la región y al flujo intenso en la costa de Sonora que favoreció el transporte de partículas hacia el norte y limitó la incursión hacia el sur. Para la región de las grandes islas, las retenciones fueron bajas (a excepción del Canal de Ballenas) debido al intenso intercambio entre las regiones del norte y del sur. En las regiones peninsular y central de la región sur las retenciones fueron altas, asociados a flujos débiles y presencia de remolinos, respectivamente. La máxima retención y la baja dispersión de partículas en prácticamente todas las provincias, se registraron en los períodos de transición de la circulación cuando el campo de velocidad fue débil y menos organizado.

Palabras clave: **Conectividad tridimensional, Golfo de California, remolino estacional, Canal de Ballenas.**

Abstract of the thesis presented by Mauro Wilfrido Santiago García as a partial requirement to obtain the Master in Science degree in Physical Oceanography.

The three-dimensional connectivity in the Gulf of California, from a numerical model

Abstract approved by:

Dr. Silvio Lorenzo Guido Marinone Moschetto
Thesis advisor

The quantification of the connectivity or the flow and exchange of materials, allows to determine the degree of retention or transfer of tracers as fish larvae, nutrients and pollutants between different regions of the ocean. In the Gulf of California, the connectivity studies are limited for certain periods and regions, in particular is scarce to the southern region. This study investigated the connectivity between 17 provinces or areas defined by regions dominated by eddies and intense or weak flows, considering the three-dimensional nature of the structures that tend to trap or to disperse particles in the water column. These were identified with the Okubo-Weiss parameter and the flow geometry of the monthly averaged velocity fields obtained from the outputs of a nonlinear, baroclinic and three dimensional numerical model. In each province, passive particles released in the water column were advected for periods of 28 days using the advection-diffusion scheme described by Visser (1997) and Proehl et al. (2005). The connectivity between the provinces was explored with the integration of the particles released at different depths in each area, which in general captured the trapping and transport patterns observed at different release levels. In the northern region, the trapping of particles was higher during the cyclonic circulation (summer) compared to the anticyclonic period (winter). This difference can be explained by the presence of eddy in the central portion of the region and the strong flow in coastal Sonora favoring particle transport northward and limited incursion southward. For the region of the large islands, the retentions were low (except Ballenas Channel) due to intense exchange between the north and south. In the peninsular and central of the southern regions retentions were high and associated to weak flows and to the presence of eddies, respectively. The maximum retention and low dispersion of particles in almost all the provinces were recorded in periods of transition of the circulation when the velocity field was weaker and less organized.

Keywords: Three-dimensional connectivity, Gulf of California, seasonal eddy, Ballenas Channel.

*A Zyania e Isabel que comparten conmigo una
travesía que nunca deja de asombrarnos...*

*A mis padres, María y Zacarías, quienes con amor
nos mostraron los horizontes por dónde caminar...*

*A Gaudencio, Sósimo, Elías, Nieves y Misael,
quienes me han acompañando en toda la vida,
gracias por el apoyo de siempre...*

Agradecimientos

Al Dr. Guido Marinone por guiar este proyecto de tesis y por su gran disposición en atender las dudas y asesorías durante todo el proceso del proyecto.

Al comité de tesis: Dr. Miguel, Dr. Oscar y Dr. Gilberto, quienes mediante ideas, comentarios u observaciones contribuyeron al desarrollo de la tesis, así como el mejoramiento del presente documento.

A mis compañeros: Aldo, Froy, Meño, Abraham, Salvador, Jessi, Brisia, Angélica, Leo, Diego, Felipe, Mariano, Eliza, Alejandro, Jorge y a todos los estudiantes de Oceanografía Física que han hecho amena mi estancia en el CICESE.

A los profesores que aportaron sus conocimientos en el aula de clases. Así mismo, a las personas de intendencia quienes siempre mantuvieron un lugar agradable para trabajar.

A los millones de ciudadanos que aportan recursos que se destinan a otorgamientos de becas a través del CONACYT, gracias por todo el apoyo y a la paciencia.

Al Departamento de Oceanografía Física por todo el apoyo que me brindó durante mi estancia en el CICESE, incluyendo las becas otorgadas que fueron fundamentales para finalizar el proyecto de tesis.

Contenido

	Página
Resumen en español.....	2
Resumen en inglés	3
Dedicatoria.....	4
Agradecimientos	5
Lista de figuras.....	7
1. Introducción	9
2. Metodología	12
2.1. Campos de velocidad Euleriana.....	12
2.2. La definición de provincias.....	13
2.2.1. Parámetro de Okubo-Weiss	14
2.2.2. La geometría del flujo	16
2.3. Modelo de advección-difusión.....	17
2.4. Liberación de partículas y matrices de conectividad	17
3. Resultados	19
3.1. Definición de provincias	19
3.2. La conectividad tridimensional.....	35
3.2.1. Período de circulación anticiclónica	36
3.2.2. Período de circulación ciclónica	37
3.2.3. Períodos de transición	38
3.2.4. Evolución temporal de atrapamiento y transporte de partículas	39
4. Discusión.....	48
4.1. Definición de provincias	48
4.2. La conectividad tridimensional.....	53
5. Conclusiones	60
Referencias bibliográficas.....	62
Anexo A. Análisis de Funciones Empíricas Ortogonales por Descomposición en Valores Singulares de una matriz (SVD)	66
Anexo B: Campo de velocidades Eulerianas mensuales y anual con puntos fijos (elípticos e hiperbólicos) y contornos del valor crítico del parámetro de Okubo-Weiss.....	67

Lista de figuras

Figura	Página
1. Localización geográfica del Golfo de California y contornos batimétricos de la cuenca (m).....	9
2. Contornos del valor crítico del parámetro de Okubo-Weiss $Q = Q_c$ y puntos de estancamiento para el campo de velocidad de enero	21
3. Puntos de estancamiento y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos de los campos de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para enero	24
4. Puntos de estancamiento y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos de los campos de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para julio.....	25
5. Puntos de estancamiento y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos de los campos de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para mayo	26
6. Puntos de estancamiento y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos de los campos de velocidad barotrópico.....	27
7. Puntos de estancamiento y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos de los campos de velocidad obtenidos del modo 1 del análisis de FEO (izquierdo) y su respectiva evolución temporal (derecho)	28
8. Puntos de estancamiento y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos de los campos de velocidades obtenidos del modo 2 del análisis de FEO (izquierdo) y su respectiva evolución temporal (derecho)	30
9. (a) Definición de provincias para las regiones: norte, de las grandes islas y sur; (b) puntos elípticos e hiperbólicos localizados en los meses de invierno y (c) la circulación superficial de julio (verano)	34
10. Matrices de conectividad con partículas integradas en la vertical durante los meses correspondientes al período de circulación anticiclónica	41
11. Matrices de conectividad con partículas integradas en la vertical durante los meses correspondientes al período de circulación ciclónica	42
12. Matrices de conectividad con partículas integradas en la vertical durante los meses correspondientes a períodos de transición de la circulación.....	43

13. Evolución temporal de atrapamiento/transporte de partículas para cada provincia de la región norte del Golfo de California.....	44
14. Evolución temporal de atrapamiento/transporte de partículas para cada provincia de la región de las grandes islas del Golfo de California	45
15. Evolución temporal de atrapamiento/transporte de partículas para cada provincia de la región sur del Golfo de California	46
16. Trayectorias lagrangianas de algunas partículas liberadas en las provincias de la región norte durante un período de 28 días correspondientes a los meses de enero (a y b) y julio (c, d y f)	55
17. Trayectorias lagrangianas de algunas partículas liberadas en las diferentes provincias del GC durante un período de 28 días correspondientes al mes de mayo.....	58

1. Introducción

El Golfo de California (GC) se localiza al noroeste de México, es un mar alargado de alrededor de 150 km de ancho y 1100 km de largo. La región norte del golfo es somera con profundidad media de ~200 m y se conecta con la región de las grandes islas (Ángel de la Guarda y Tiburón) que presenta una serie de umbrales y canales estrechos que se comunican con la región sur, extendiéndose hasta la boca del golfo donde alcanza profundidades máximas de ~3500 m (Fig. 1).

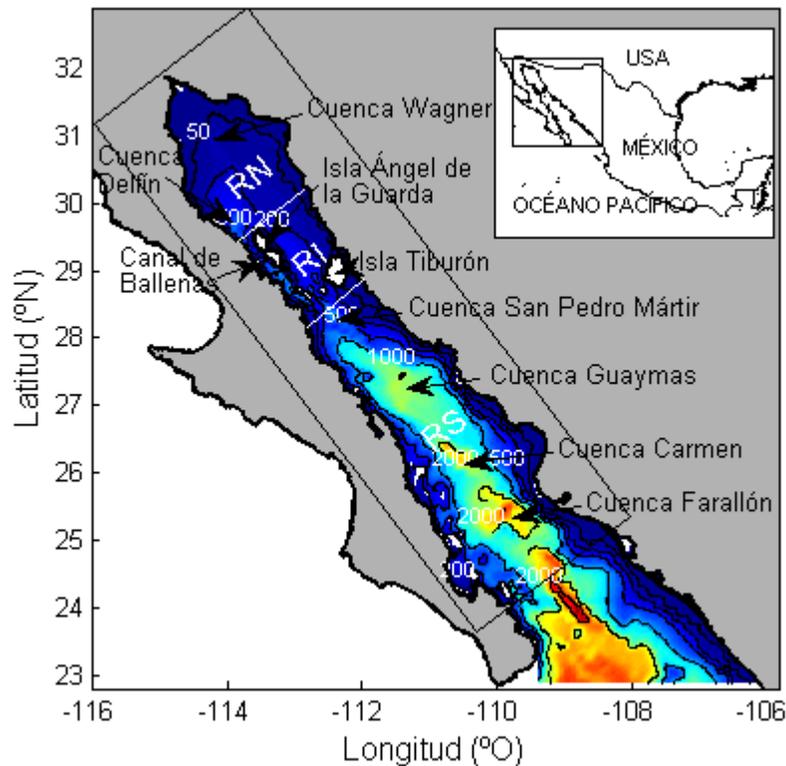


Figura 1. Localización geográfica del Golfo de California y contornos batimétricos de la cuenca (m). El área de estudio (recuadro) y su división en tres regiones: norte (RN), de las grandes islas (RI) y sur (RS).

En este documento, la conectividad se refiere al flujo de partículas entre las diferentes áreas o provincias del océano debido a la hidrodinámica (advección y difusión). Su estudio es fundamental para conocer, por ejemplo, la transferencia de trazadores como contaminantes,

nutrientes y larvas de organismos que están sujetos al transporte por el movimiento del fluido. La adquisición de este conocimiento requiere información preliminar de los campos espaciales y temporales de la circulación. Esta información es difícil y costosa de obtener mediante observaciones para toda una región, como la del Golfo de California. Sin embargo, los modelos numéricos han mostrado ser una herramienta robusta que proporcionan los campos tridimensionales de velocidad y son usados para estudiar la conectividad entre diferentes regiones del océano mediante técnicas de seguimiento de partículas (Proehl *et al.*, 2005; Marinone, 2012).

Una parte esencial en el estudio de la conectividad es la definición o delimitación de las áreas o provincias, sobre las que se quiere estudiar el flujo de partículas. Los estudios de conectividad en el GC han definido las áreas de distintas formas. Marinone *et al.* (2008) definieron áreas entre 0 y 60 m de profundidad a lo largo de la costa de la región norte del golfo, los resultados indicaron que durante la época de verano, la conectividad espacial está dominada por la circulación ciclónica. Marinone (2012) exploró la conectividad superficial de todo el golfo y a escalas mensuales, las áreas fueron delimitadas con base a la dinámica y al campo de velocidad Euleriano. Este autor reportó que durante los períodos de estudio, las altas retenciones de partículas (>30 %) ocurrieron en la región norte del golfo.

Por otro lado, Peguero Icaza *et al.* (2008), Sánchez Velasco *et al.* (2009) y Peguero Icaza *et al.* (2011) definieron las provincias con base en la distribución de los diferentes ensambles de larvas de peces (LFAs, por sus siglas en inglés). Un ensamble es definido por la composición y la dominancia de las especies (larvas) en un grupo de estaciones de muestreo. En general, la ubicación de los ensambles coincidió con regiones hidrodinámicamente diferentes como la corriente costera sobre la plataforma continental, el remolino estacional en la región norte y la región de las grandes islas. El atrapamiento de partículas entre los LFAs fue más alto en verano (>55 %) que en invierno (< 35 %; Peguero Icaza *et al.*, 2011).

Estudios de la circulación lagrangiana proveen una idea del grado de asociación entre diferentes regiones, ya que se puede identificar el destino de una partícula en cualquier tiempo. Algunos trabajos se han enfocado en la descripción cualitativa y cuantitativa de la circulación lagrangiana en el GC y sugieren algunos patrones de conectividad (Velasco Fuentes y Marinone 1999; Gutiérrez *et al.*, 2004; Marinone *et al.*, 2011). Por ejemplo, se ha reportado que la retención de partículas en la región norte del golfo ocurre en períodos mayores a 30 días, mientras que la costa continental transporta partículas a varios cientos de kilómetros hacia la región norte en verano y hacia la región sur en invierno (Velasco Fuentes y Marinone 1999; Gutiérrez *et al.*, 2004; Marinone *et al.*, 2011). En cambio, la costa peninsular de la región sur presenta atrapamiento de partículas con desplazamientos <100 km en períodos de 30 días (Marinone *et al.*, 2011). También se identifica que las trayectorias de las partículas en escalas mensuales son dominadas por corrientes de baja frecuencia y los procesos advectivos son más importante que la difusión (Marinone *et al.*, 2008; Marinone *et al.*, 2011). Sin embargo, en estos estudios lagrangianos no se determinó el destino final de las partículas y los trabajos de conectividad mencionados previamente se han limitado espacial y temporalmente.

El objetivo de este trabajo fue estudiar la conectividad tridimensional en todo el Golfo de California. Las provincias fueron definidas de acuerdo a las estructuras observadas en el parámetro de Okubo-Weiss y la geometría del flujo de los campos de velocidad, es decir, regiones dominadas por la vorticidad o la deformación del fluido y la circulación estacional.

2. Metodología

2.1. Campos de velocidad Euleriana

Para calcular la trayectoria de una partícula y en específico su posición después de cierto período, se necesita el campo de velocidad Euleriano. En este trabajo, la trayectoria de una partícula fue calculada integrando los campos de velocidad obtenidos del modelo baroclínico, no lineal y tridimensional, Hamburg Shelf Ocean Model (HAMSOM) configurado para el Golfo de California por Marinone (2003, 2008).

El modelo fue forzado en la boca del golfo por el campo climatológico de la hidrografía y por las mareas y en la interfase océano-atmósfera por la climatología del viento, los flujos de calor y de agua dulce. Los campos de temperatura y salinidad en la boca del golfo fueron obtenidos de datos históricos (1939-1995) del CICESE. A partir de estos datos, los campos fueron interpolados en cada punto de la malla a lo largo de la frontera abierta (boca del golfo) y ajustados por cuadrados mínimos a la función anual y semianual. El forzamiento del viento en la superficie del mar es estacional y también fue obtenido mediante un ajuste por cuadrados mínimos a la función anual y semianual de los datos obtenidos de Quikscat. Las otras variables meteorológicas se obtuvieron de siete estaciones alrededor del golfo y se calcularon los flujos de calor y agua dulce interpolando en la superficie del mar. La marea fue representada por diez de sus componentes armónicos principales: M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 y P_1 , M_f , M_{sf} y M_m que contribuyen con más del 95 % de la varianza total (Marinone, 2003).

El modelo tiene una resolución espacial de $0.83' \times 0.83'$ ($\sim 1.3 \times 1.5$ km) y 12 capas en la vertical definidas con los siguientes límites inferiores: 10, 20, 30, 60, 100, 150, 200, 250, 350, 600, 1000 y 4000 m. El grosor de la primera capa está definido entre la superficie libre y los 10 m de profundidad, mientras que el grosor de la última capa depende de la profundidad local. El modelo reproduce las características estacionales de la circulación superficial de la región norte del golfo, la evolución estacional de la temperatura superficial

del mar, el balance de calor, altura y corrientes de marea (Marinone 2003; Marinone y Lavín, 2005); así como la circulación profunda del Canal de Ballenas-Salsipuedes y alrededor de la Isla Ángel de la Guarda (Marinone, 2008) reportado por López *et al.* (2008).

2.2. La definición de provincias

Las provincias se definieron con base en las estructuras observadas en el parámetro de Okubo-Weiss, la geometría de flujo y la circulación general del golfo. Los parámetros mencionados son definidos para flujos estacionarios en dos dimensiones, a excepción de la geometría de flujo que se puede extender para tres dimensiones. En este trabajo se calcularon para dos dimensiones, dado que las componentes horizontales fueron al menos dos órdenes de magnitud mayor a las componentes verticales.

La variabilidad temporal de la circulación es alta en escalas desde las mareas hasta la estacional. Dado que el flujo es dependiente del tiempo, se puede esperar que las regiones dominadas por la vorticidad cambien sus propiedades a regiones de deformación e incluso la contribución de estos factores sea comparable. Sin embargo, si se considera un patrón de circulación promediado sobre escalas mensual y anual a partir de los datos del modelo, se puede considerar que el parámetro de Okubo-Weiss (geometría de flujo) identifique regiones donde las propiedades de vorticidad o de deformación del fluido son dominantes y por consiguiente, puede ser un buen indicador de estas propiedades. Además, si se considera el carácter estacional de la circulación, los promedios mensuales mostrarán regiones bien definidas por la vorticidad o deformación del fluido para invierno y verano.

Los cálculos del parámetro de Okubo-Weiss y la geometría del flujo se realizaron sobre los campos de velocidad para cada capa del modelo obtenidos del promedio mensual y anual. A partir de estos campos se obtuvieron las componentes barotrópicas de cada escala temporal mencionada. Además, se calcularon sobre las estructuras espaciales obtenidas del análisis de Funciones Empíricas Ortogonales (FEO) de los campos mensuales para cada

capa del modelo. Para ello se usó el método de descomposición de valores singulares (Anexo A). En este documento se presentan los dos primeros modos de los análisis FEO que representan más del 49 y 11 % de la varianza, respectivamente. A continuación, se describen los métodos usados para el cálculo del parámetro de Okubo-Weiss y la geometría de flujo.

2.2.1. Parámetro de Okubo-Weiss

El parámetro de Okubo-Weiss (Okubo 1970; Weiss, 1991) se define como,

$$Q = s_n^2 + s_s^2 - \omega^2, \quad (1)$$

$$\text{con } s_n = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}, \quad s_s = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{y} \quad \omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (2)$$

donde, s_n y s_s son las componentes normal y tangencial de la deformación del flujo y ω es la vorticidad relativa. El parámetro Q define regiones dominadas por la deformación ($Q > 0$) o por la vorticidad relativa ($Q < 0$) en un campo de velocidades bidimensional y estacionario.

Los valores negativos del parámetro de Okubo-Weiss definen regiones dominadas por la vorticidad relativa y los remolinos en el océano son generalmente distinguidos por este rasgo. Por ello es posible identificar estas estructuras por contornos cerrados de $Q = Q_c$, donde $Q_c = -0.2\sigma_w$ con σ_w como la desviación estándar de Q en todo el dominio (Isern Fontanet *et al.*, 2004; Nencioli *et al.*, 2010). Bajo estas consideraciones se han detectado remolinos a partir de datos de altimetría del nivel del mar y modelos numéricos. Sin embargo, se han reportado algunas limitaciones de este criterio como lo puntualizaron Nencioli *et al.* (2010). Estos autores mostraron que los contornos Q_c también identifican regiones donde la circulación presenta meandros o corte entre dos flujos opuestos y por lo tanto no corresponden a estructuras de remolinos, aún cuando se identifica la velocidad mínima del campo de velocidades. En este trabajo se identificó la presencia de remolinos con el contorno Q_c y verificada con la presencia de un punto elíptico y la estructura del

campo Euleriano. Los remolinos pueden definir regiones dominados por la retención de partículas como se ha observado en el Canal de Santa Bárbara (Nishimoto y Washburn, 2002) y en la costa noroeste de África (Rodríguez *et al.*, 1999; Rodríguez *et al.*, 2004).

Las regiones dominadas por la vorticidad relativa generalmente son asociadas a zonas de retención de partículas, mientras que las regiones dominadas por la deformación corresponden a zonas de tránsito de partículas. La ausencia de puntos fijos también indica una zona de tránsito, esta región pueden distinguirse por flujos intensos y con una dirección preferencial, como lo puede ser la costa continental del golfo donde el flujo es hacia el norte en verano y hacia el sur en invierno.

2.2.2. La geometría del flujo

Las trayectorias de partículas en un campo de velocidades Eulerianas (e.g. promedio anual o mensual) pueden ser definidas por la geometría del flujo, ésta puede considerarse en términos de puntos de estancamiento o puntos fijos ($u=0, v=0$) y líneas de corrientes que pueden conectar algunos de éstos y determinar las propiedades de advección del flujo (Velasco Fuentes y Marinone, 1999). Un punto de estancamiento se denomina elíptico, si las partículas rotan alrededor de éste y es hiperbólico cuando las partículas se acercan hacia el punto fijo en la dirección de compresión del fluido y se alejan del punto fijo en dirección de estiramiento del fluido.

Los puntos de estancamiento en los diferentes campos de velocidad Euleriano, se localizaron en las celdas de la malla donde ocurrió un cambio de signo de las componentes de velocidad (u, v) y la posición del punto se calculó usando el algoritmo bilineal de cuatro puntos que fue usado por Velasco Fuentes y Marinone (1999), es decir,

$$\begin{bmatrix} U(x, y, t) \\ V(x, y, t) \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta X \Delta Y} \begin{bmatrix} u_{i,j} & u_{i,j+1} & u_{i+1,j} & u_{i+1,j+1} \\ v_{i,j} & v_{i,j+1} & v_{i+1,j} & v_{i+1,j+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\Delta X - \delta x)(\Delta Y - \delta y) \\ \delta x(\Delta Y - \delta y) \\ \delta y(\Delta X - \delta x) \\ \delta x \delta y \end{bmatrix}, \quad (3)$$

donde $U(x, y)$ ($V(x, y)$) es el valor interpolado dentro de una malla de tamaño ΔX y ΔY dado δx y δy ; $u_{i,j}$ ($v_{i,j}$) corresponde al valor situado en la esquina inferior izquierda de la malla. Consecuentemente, los puntos de estancamiento se encontraron sustituyendo $U(x, y, t) = V(x, y, t) = 0$ en la ecuación 3 y se resolvió para δx y δy .

La estructura del flujo alrededor del punto de estancamiento está dada por los autovalores

de la matriz Jacobiana $J = \begin{bmatrix} u_x & u_y \\ v_x & v_y \end{bmatrix}$, la cual se evaluó con la aproximación de diferencias

finitas centradas. El polinomio característico de los autovalores de la matriz se expresa como

$$\lambda^2 - (u_x + v_x)\lambda + u_x v_y - u_y v_x = 0 \quad (4)$$

Las raíces del polinomio pueden ser reales o complejas. El tipo de punto de estancamiento depende de cada parte de la raíz. En este documento se describen dos tipos de puntos: elípticos e hiperbólicos. Los puntos hiperbólicos tienen raíces reales y de signo contrario; mientras que las raíces imaginarias puras describen puntos elípticos.

2.3. Modelo de advección-difusión

La trayectoria de cada partícula se calculó bajo un esquema de advección difusión utilizando salidas horarias del campo de velocidad del modelo Euleriano y un algoritmo de caminata aleatoria relacionada con procesos de difusión turbulenta (Visser, 1997; Proehl *et al.*, 2005),

$$\begin{aligned} X(t + \delta t) &= X(t) + X_a(t) + R_x \sqrt{6A_h \delta t}, \\ Y(t + \delta t) &= Y(t) + Y_a(t) + R_y \sqrt{6A_h \delta t}, \\ Z(t + \delta t) &= Z(t) + Z_a(t) + R_z \sqrt{6A_v \delta t} + \delta t \partial A_v / \partial Z, \end{aligned} \quad (5)$$

donde X , Y y Z son las posiciones en dirección zonal, meridional y vertical, respectivamente, t es el tiempo, X_a , Y_a y Z_a son desplazamientos obtenidos integrando el campo de velocidad $V_a = (u, v, w)$ usando el método de interpolación Runge Kutta de orden dos en la horizontal y Euler en la vertical. La velocidad de la partícula en cada posición es interpolada por el método bilineal. R_x , R_y y R_z son variables aleatorias con media cero y varían entre 1 y -1. A_h y A_v son coeficientes de difusión turbulenta horizontal y vertical, con valores de 100 y entre 0 y $0.013 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

2.4. Liberación de partículas y matrices de conectividad

El número de partículas liberadas en cada provincia varió entre 500 y 22000 debido a las diferentes dimensiones de las provincias. Además se buscó obtener la misma densidad de partículas por unidad de área. Para determinar la densidad apropiada de partículas, se realizaron algunos experimentos que consistieron en la liberación de partículas con

densidades entre 0.7 y 9 partículas/km² en las diferentes provincias. Esto se realizó para tres capas del modelo (1, 6 y 11) correspondientes a enero y julio. Las matrices de conectividad obtenidas con densidades de 0.7 y de 9 partículas/km² fueron comparadas celda por celda. Los resultados indicaron diferencias <1 % en el 96 % de las celdas de la matriz y entre el 1 y 4% en las celdas restantes. Por esta razón, la liberación de partículas con densidad de 0.7 partículas/km² resultó ser razonable.

Las partículas fueron liberadas dentro de cada provincia y advectadas en períodos de 28 días, el primer día corresponde al inicio de cada mes del año. Este período se puede considerar como una aproximación de la duración de las etapas larvales (~4 semanas) de algunas especies dominantes en los LFAs reportados por Peguero Icaza *et al.* (2011). El tiempo inicial fue elegido para obtener la conectividad mensual, sin embargo los resultados son similares si se considera un tiempo inicial a mediados de cada mes, en particular para la región norte del golfo donde el patrón es bien definido a escala estacional. Al finalizar el período de advección, las partículas fueron cuantificadas en cada una de las provincias donde arribaron con la inclusión de la provincia fuente. Esta información se ordena en una matriz de conectividad.

La matriz de conectividad se define como $C_{ij}(t)$, donde el eje vertical (j) representa las áreas de liberación de partículas y el eje horizontal (i) muestra las áreas donde las partículas fueron localizadas al final del período definido por t , que en este documento se denominarán destino final. Por consiguiente, $C_{ij}(t)$ representa la concentración de partículas localizadas en el área i que provienen del área j para cada período de tiempo t . En este documento $t = 1,2,3,\dots,12$ meses y las concentraciones se presentan en porcentajes. El número total de partículas liberadas en cada provincia se obtiene al integrar los porcentajes en dirección de las columnas. Si el destino final de las partículas se ubicó dentro del polígono de origen, se denomina región o área de atrapamiento de partículas, el caso contrario se define como área de transporte de partículas hacia otras provincias. El

atrapamiento de partículas en cada una de las provincias se muestra en la diagonal de la matriz y el transporte de partículas fuera de la diagonal.

3. Resultados

3.1. Definición de provincias

Las provincias se delimitaron de acuerdo a las estructuras observadas en (1) el parámetro de Okubo-Weiss (Q) y (2) la geometría de flujo en los campos Eulerianos de velocidad. Los cálculos se realizaron para cada una de las 12 capas del modelo obtenidas de los promedios mensuales y el anual, para las componentes barotrópicas y para la estructura espacial de los dos primeros modos de los análisis FEO de cada capa. El resultado fue una cantidad enorme de mapas que mostraron variabilidad en las estructuras (remolinos, flujos intensos y débiles). Sin embargo, se observaron algunos patrones definidos a lo largo de las costas continental y peninsular, así como sobre el eje central longitudinal.

El criterio para definir las provincias fue identificar zonas de atrapamiento y tránsito de partículas. Para el primer caso se usó el valor crítico de Okubo-Weiss ($Q_c = -0.2\sigma_w$ con σ_w como la desviación estándar de Q en todo el dominio), la presencia de puntos elípticos y vectores de velocidad Eulerianos, que en conjunto identificaron la presencia de remolinos, estructuras que tienden a atrapar partículas.

Las áreas de tránsito se identificaron con la presencia de puntos hiperbólicos, los cuales fueron observados con frecuencia entre dos o más remolinos, por ejemplo, en el Alto Golfo, la costa peninsular (Fig. 2a) y sobre las cuencas de la región sur. Sin embargo, su distribución complicó la definición de áreas basándose en las posiciones de puntos hiperbólicos. Por esta razón, fue más conveniente considerar la distribución de puntos elípticos y contornos de Q_c para definir algunas provincias que posiblemente tiendan a retener partículas. La ausencia de puntos fijos también identifica zonas de tránsito de partículas, por ejemplo, regiones dominadas por corrientes con una dirección preferencial.

Los criterios para identificar remolinos tienen limitaciones. En general, los contornos de Q_c capturan estructuras de remolinos, como se puede observar en la región norte (Fig. 2b). También se puede apreciar que se definen regiones donde existe corte horizontal en el campo de velocidades (Fig. 2d). Para excluir los contornos que no definieron remolinos, se eligieron sólo contornos cerrados de Q_c que incluyen a un punto elíptico y con los vectores de velocidad se puede verificar la estructura del remolino (Fig. 2b). En algunos casos, la presencia de un remolino es evidente pero el contorno (Q_c) no es cerrado (Fig. 2c), en esta situación solamente se graficó el punto elíptico para indicar la presencia de dicha estructura, de igual forma se procedió para señalar remolinos que no fueron identificadas por los contornos Q_c (Fig. 2a).

La identificación de zonas de atrapamiento y tránsito de partículas se realizó para todos los meses. En general, las estructuras observadas en los campos de velocidad, tales como remolinos, flujos intensos o débiles, presentaron patrones similares en los meses que corresponden a los períodos anticiclónico y ciclónico. En cambio, para los períodos de transición de la circulación, las estructuras de campo de velocidades fueron menos estructuradas en comparación con los períodos anticiclónico y ciclónico. A continuación se describen solamente los resultados obtenidos en las doce capas de enero, julio y mayo como representativos de las condiciones de circulación anticiclónica (invierno), ciclónica (verano) y de un período de transición, respectivamente. También se presentan los campos barotrópicos de los períodos mencionados y los primeros dos modos del análisis de FEO.

En esta sección se excluyen los resultados obtenidos del promedio anual, sin embargo, las estructuras observadas en los campos de velocidad también son capturadas en los promedios mensuales que se muestran a continuación. La información completa de los resultados se presenta en el Anexo B de este documento.

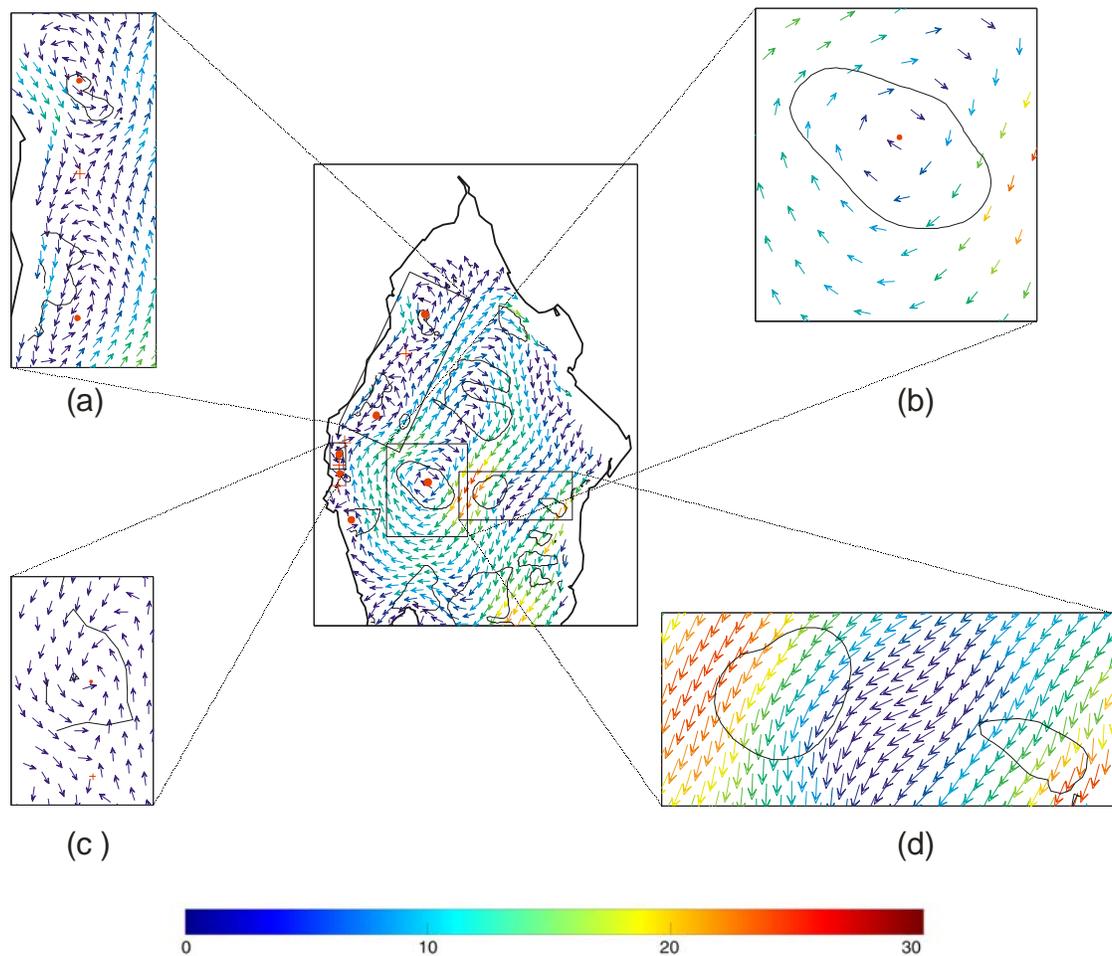


Figura 2. Contornos del valor crítico del parámetro de Okubo-Weiss $Q = Q_c$ y puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos) e hiperbólicos (cruces rojas) para el campo de velocidades de enero. (a) Presencia de un punto hiperbólico entre dos remolinos; (b) contornos cerrados de Q_c que contienen un punto elíptico; (c) estructuras de remolinos con contornos no cerrados y (d) contornos cerrados de Q_c en regiones con fuerte corte horizontal. La barra de colores indica la magnitud del vector en cm s^{-1} .

En enero, las estructuras del campo de velocidades definen la presencia de pequeños remolinos en el Alto Golfo y en la región peninsular en los primeros 30 m de profundidad (Fig. 3). El rasgo distintivo es el remolino anticiclónico que domina la mayor parte de la región norte. En la región de las grandes islas, se observaron algunos puntos elípticos (remolinos) entre las islas Ángel de la Guarda y Tiburón así como en el Canal de Ballenas

y en el Canal Salsipuedes. En esta zona los flujos medios son predominantes hacia el sur en los niveles superiores (0-150 m) y hacia el norte en los niveles inferiores (150-600 m). Para la región sur, se observaron algunos puntos elípticos e hiperbólicos en la costa peninsular, así como sobre el eje central a lo largo del golfo (sobre las cuencas), mientras que sobre la costa continental no se observaron puntos fijos. Estos rasgos se presentaron para el resto de los meses de invierno. En general, los flujos medios fueron más débiles en la costa peninsular comparada con la costa continental del golfo.

En julio, el campo de velocidades fue más organizado para todas las capas a diferencia de los demás meses. En algunas capas se observaron puntos hiperbólicos y elípticos que se ubicaron sobre la costa peninsular de la región norte y en el Canal de Ballenas (Fig. 4). Sin embargo, la característica más notoria fue la presencia del remolino ciclónico que dominó la mayor parte de la región norte, similar a lo observado en enero (remolino anticiclónico). Para la región de las grandes islas y la región sur, se mostró una serie de remolinos a lo largo del eje longitudinal del golfo (0-1000 m), estructuras que fueron persistentes en tres de los cuatro meses del período de circulación ciclónica. En la región de las grandes islas, los flujos medios indicaron una dirección preferencial hacia el norte en los niveles superiores de la columna de agua (0-150 m), en contraste en los niveles inferiores el flujo fue hacia el sur (150-600 m) y de menor magnitud. Es importante notar que las direcciones del flujo fueron opuestas a lo observado en enero y por lo tanto, es posible esperar que la conectividad esté bien diferenciada entre el período anticiclónico (enero) y el período ciclónico (julio) dado que es la región donde ocurre la mayor comunicación entre las regiones norte y sur del golfo. Los flujos medios en la costa continental de la región sur fueron débiles, mientras que a lo largo de la costa continental el flujo fue intenso con ausencia de puntos fijos, similar al observado en enero y puede asociarse a una región de tránsito de partículas.

En condiciones de transición (mayo), la estructura del campo de velocidades es compleja. La distribución de remolinos fue prácticamente en toda la región norte y en las grandes islas, mientras que en la región sur se confinaron sobre las cuencas. Estructuras similares se

observaron en abril y octubre que también corresponden a períodos de transición de la circulación. En estos meses los puntos elípticos e hiperbólicos se situaron sobre la costa continental, rasgo que no se presentó en los meses de invierno y de verano. En general, los flujos más débiles se ubicaron en la costa peninsular de la región sur, similar al observado en los períodos de circulación anticiclónica y ciclónica, características que sugieren una zona de atrapamiento de partículas.

Las componentes barotrópicas de la velocidad de enero y julio mostraron estructuras similares en los diferentes estratos de la columna de agua (Fig. 6), como la presencia de remolinos pequeños en el Alto Golfo y en la región peninsular, así como el remolino estacional en la porción central de la región norte. También se presentaron remolinos a lo largo del eje longitudinal del golfo, situados sobre las cuencas en la región sur. Estas estructuras son relativamente dominantes en todos los campos barotrópicos. Una particularidad de estos campos es la poca presencia de puntos fijos sobre la costa continental, con excepción en los meses de transición (abril y mayo) y en septiembre.

Los campos de velocidad obtenidos del análisis de FEO, en general capturan las estructuras descritas anteriormente. Los resultados del primer modo en las diferentes capas mostraron la presencia del remolino estacional en la porción norte y remolinos centrados en las cuencas Guaymas, Carmen y Farallón, mientras que en la costa peninsular de las regiones norte y de las grandes islas se observaron remolinos pequeños (Fig. 7). Este modo representó >49 % de la varianza en las distintas capas. En el segundo modo, la estructura del campo de velocidades fue más compleja. Los remolinos se distribuyeron sobre toda la región norte del golfo en las primeras capas (10-30 m), mientras que a mayores profundidades, la presencia de un remolino en la porción central de la región fue persistente (Fig. 8). En la región de las grandes islas, se observaron remolinos entre las islas Ángel de la Guarda y Tiburón, así como en el Canal de Ballenas y en el Canal Salsipuedes. Para la región sur, los remolinos se situaron sobre las cuencas y también sobre las costas peninsular y continental. Este modo representó >11 % de la varianza en las diferentes capas. En conjunto, ambos modos describen más del 74 % de la varianza.

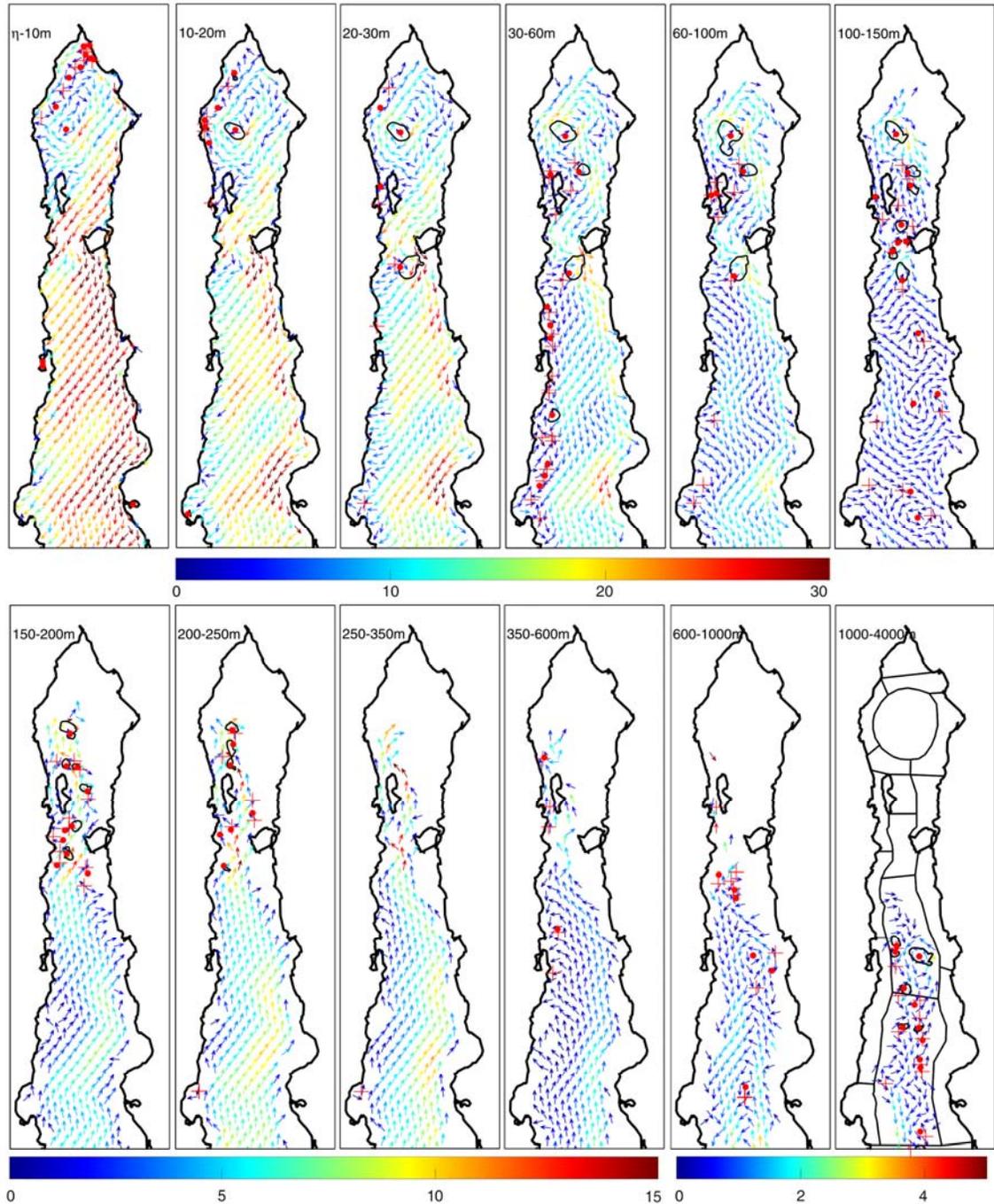


Figura 3. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para enero. Se grafica uno de cada 12 vectores y la magnitud (cm s^{-1}) se indica en la barra de colores para las diferentes capas.

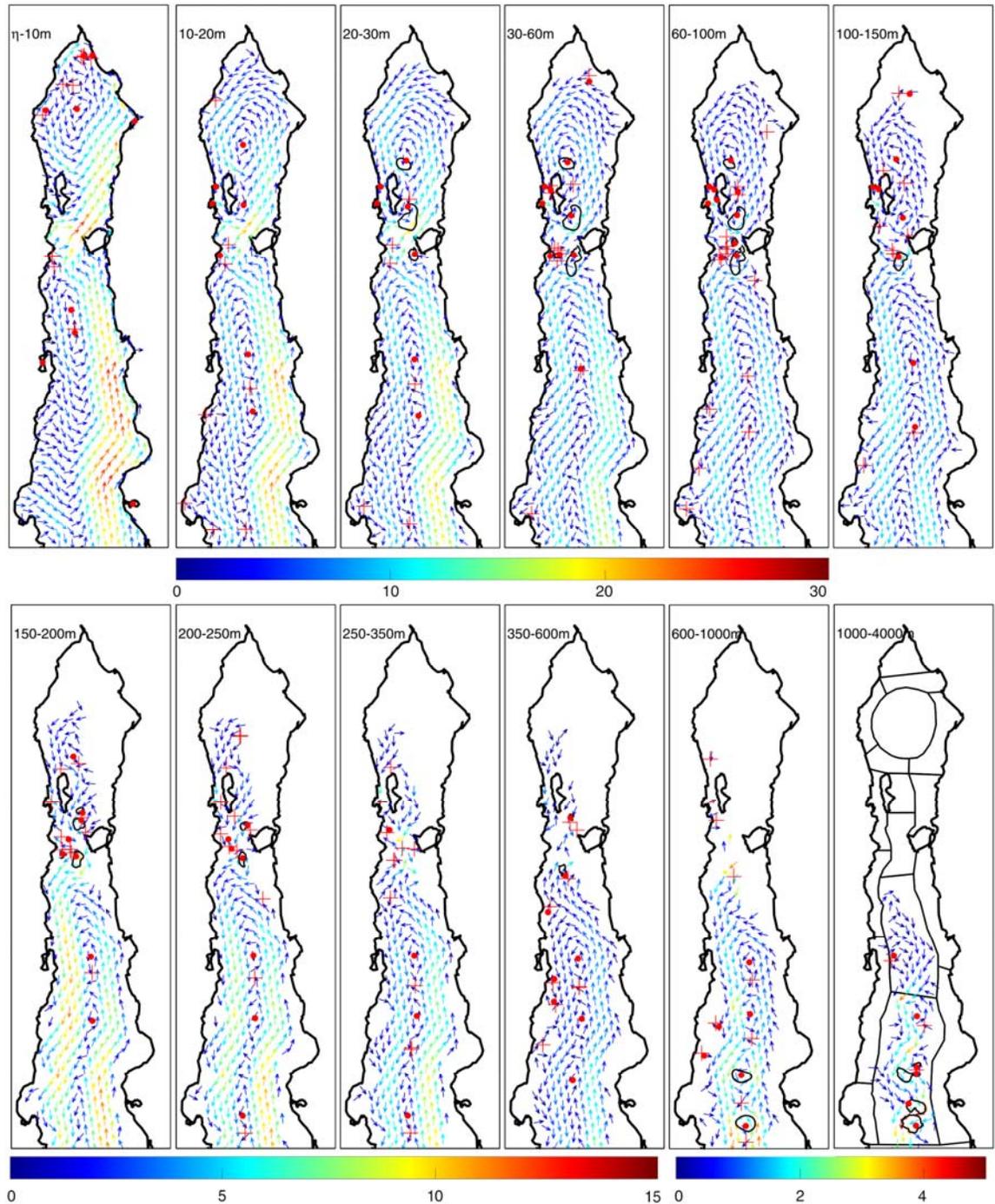


Figura 4. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para julio. Se grafica uno de cada 12 vectores y la magnitud (cm s^{-1}) se indica en la barra de colores para las diferentes capas.

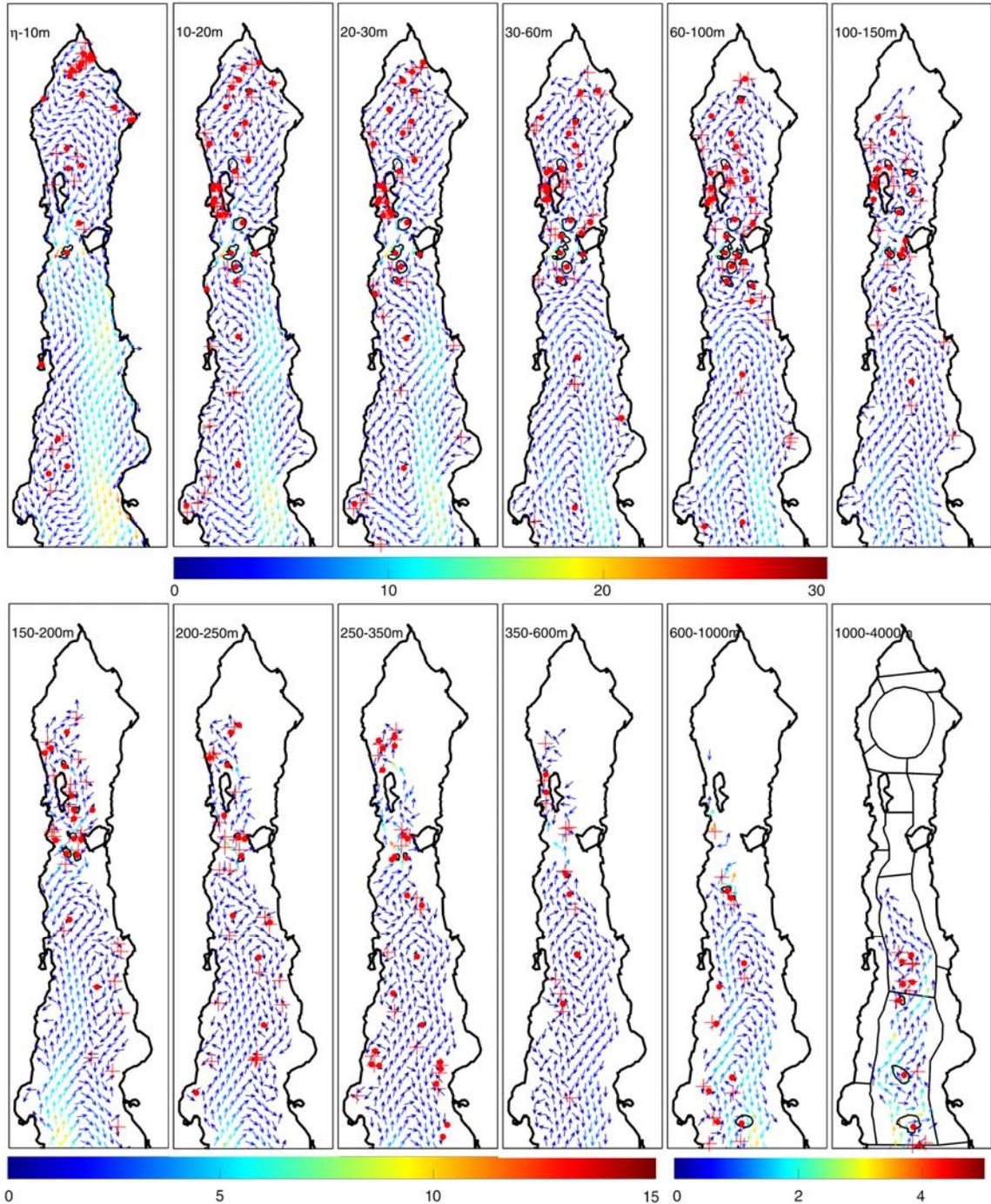


Figura 5. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidades, que corresponden a las 12 capas del modelo para mayo. Se grafica uno de cada 12 vectores y la magnitud (cm s^{-1}) se indica en la barra de colores para las diferentes capas.

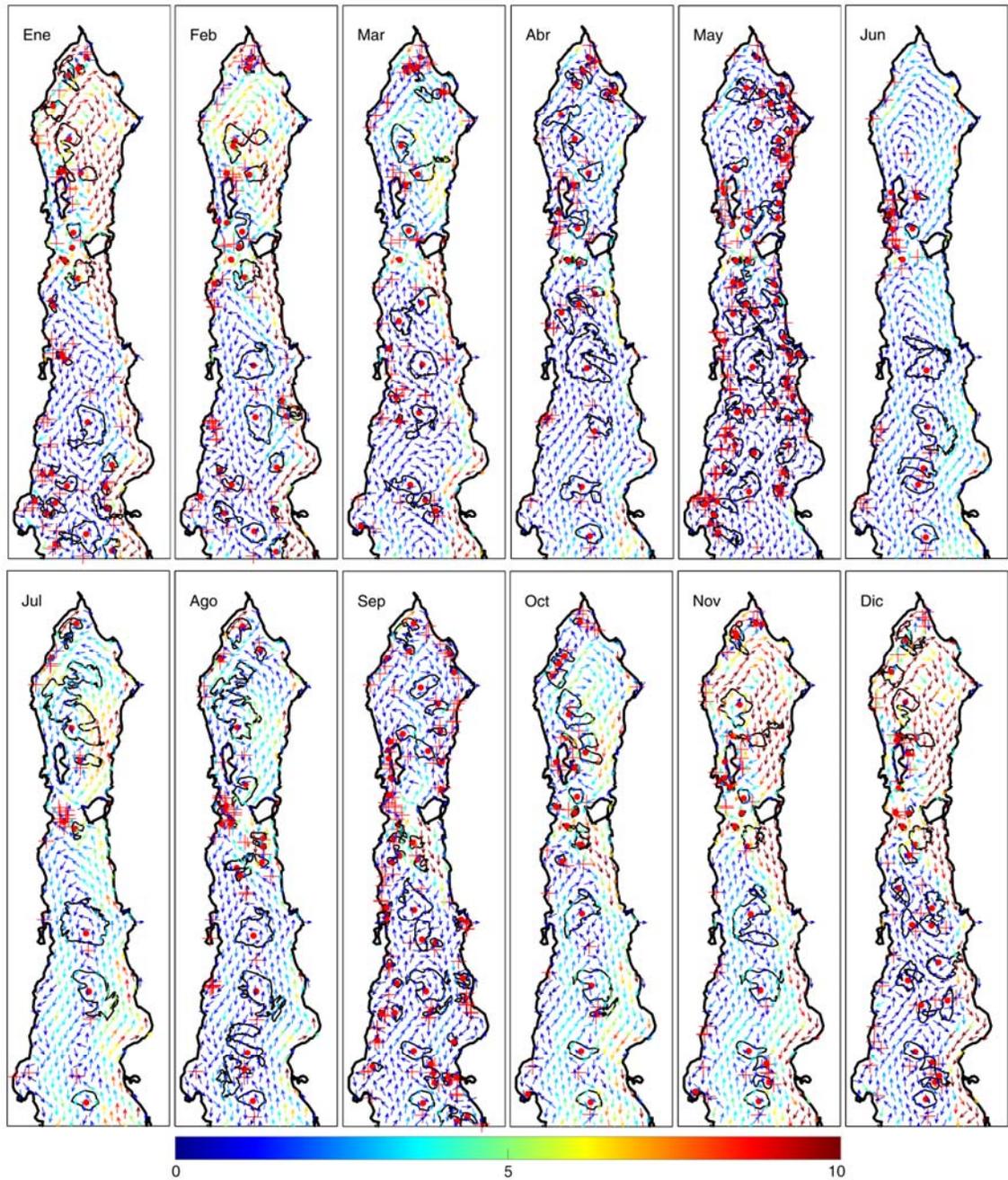


Figura 6. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidad barotrópico. Se grafica uno de cada 12 vectores y la barra de colores indica la magnitud dada en cm s^{-1} .

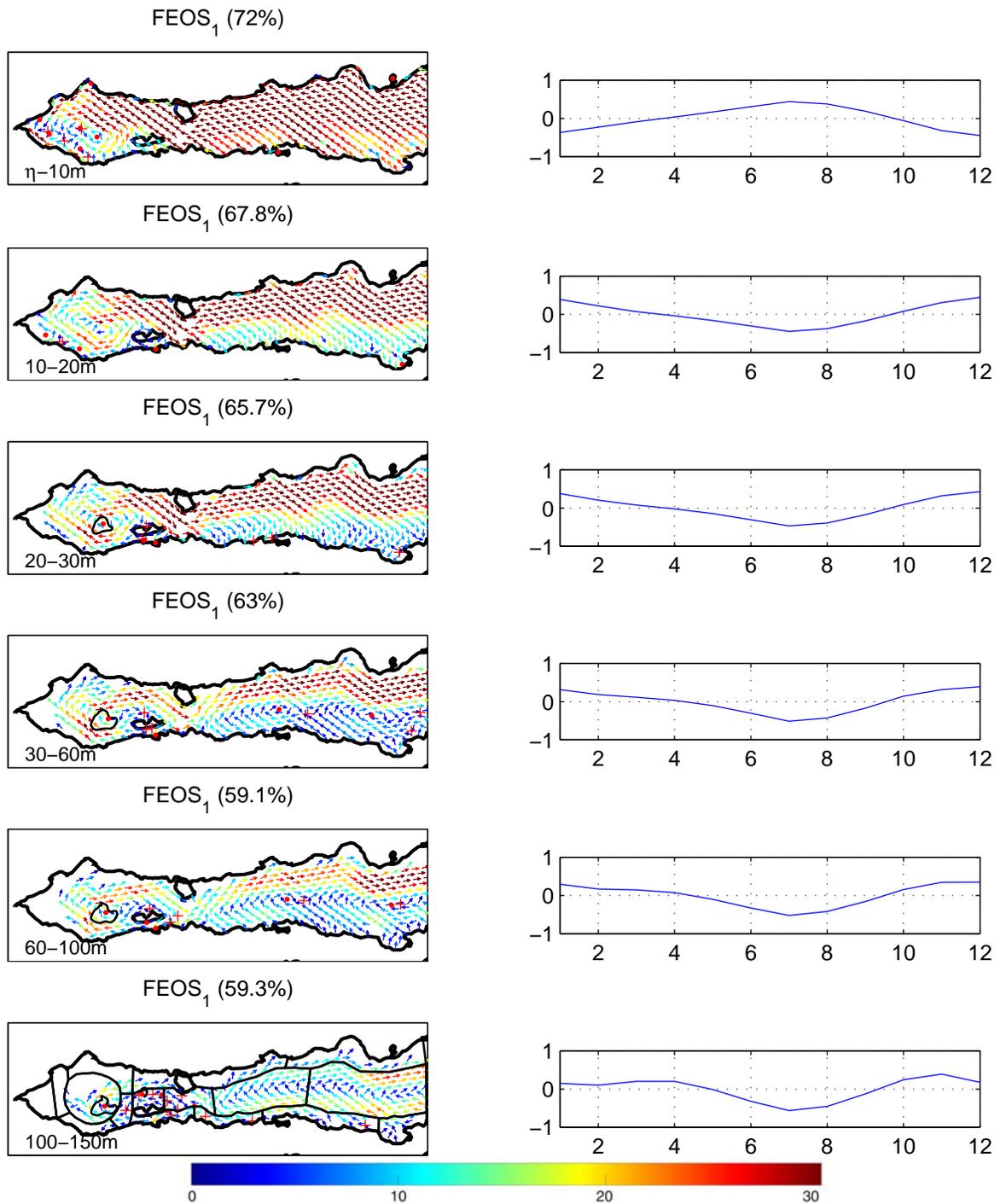


Figura 7. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidades obtenidos del modo 1 del análisis de FEO (izquierdo) y su respectiva evolución temporal (derecho). Se grafica uno de cada 12 vectores y la barra de colores indica la magnitud dada en cm s^{-1} .

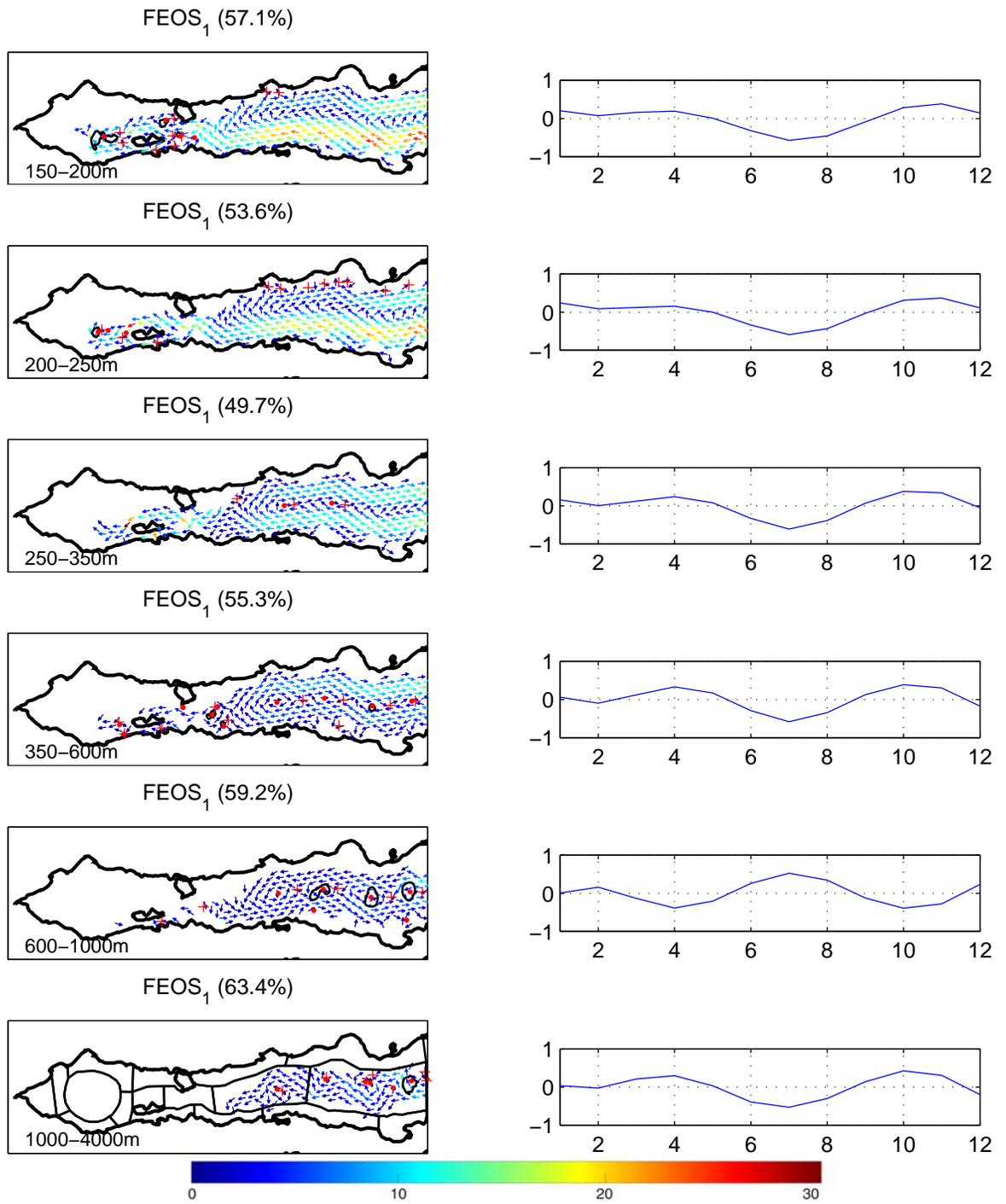


Figura 7. Continuación.

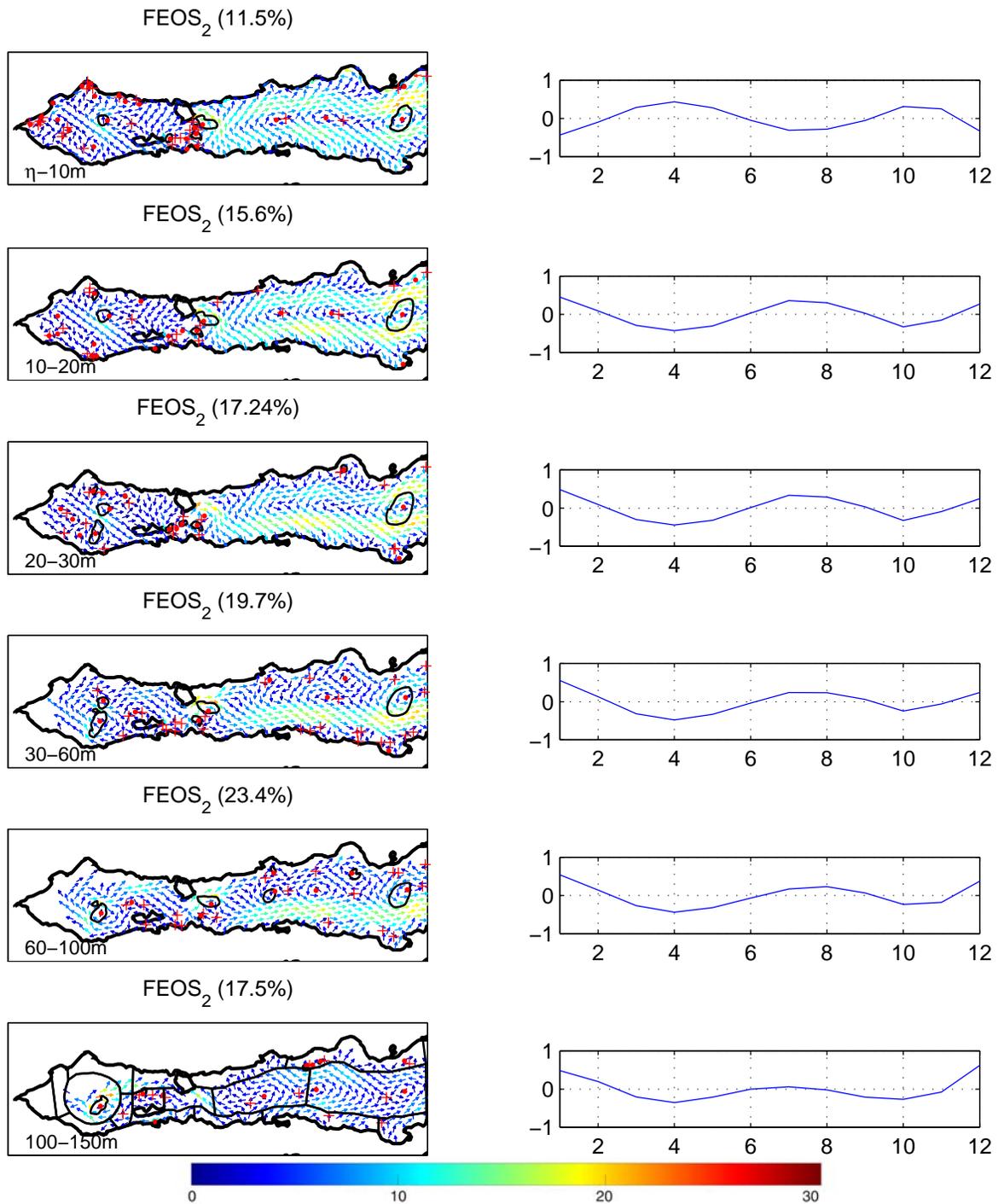


Figura 8. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidades obtenidos del modo 2 del análisis de FEO (izquierdo) y su respectiva evolución temporal (derecho). Se grafica uno de cada 12 vectores y la barra de colores indica la magnitud dada en cm s^{-1} .

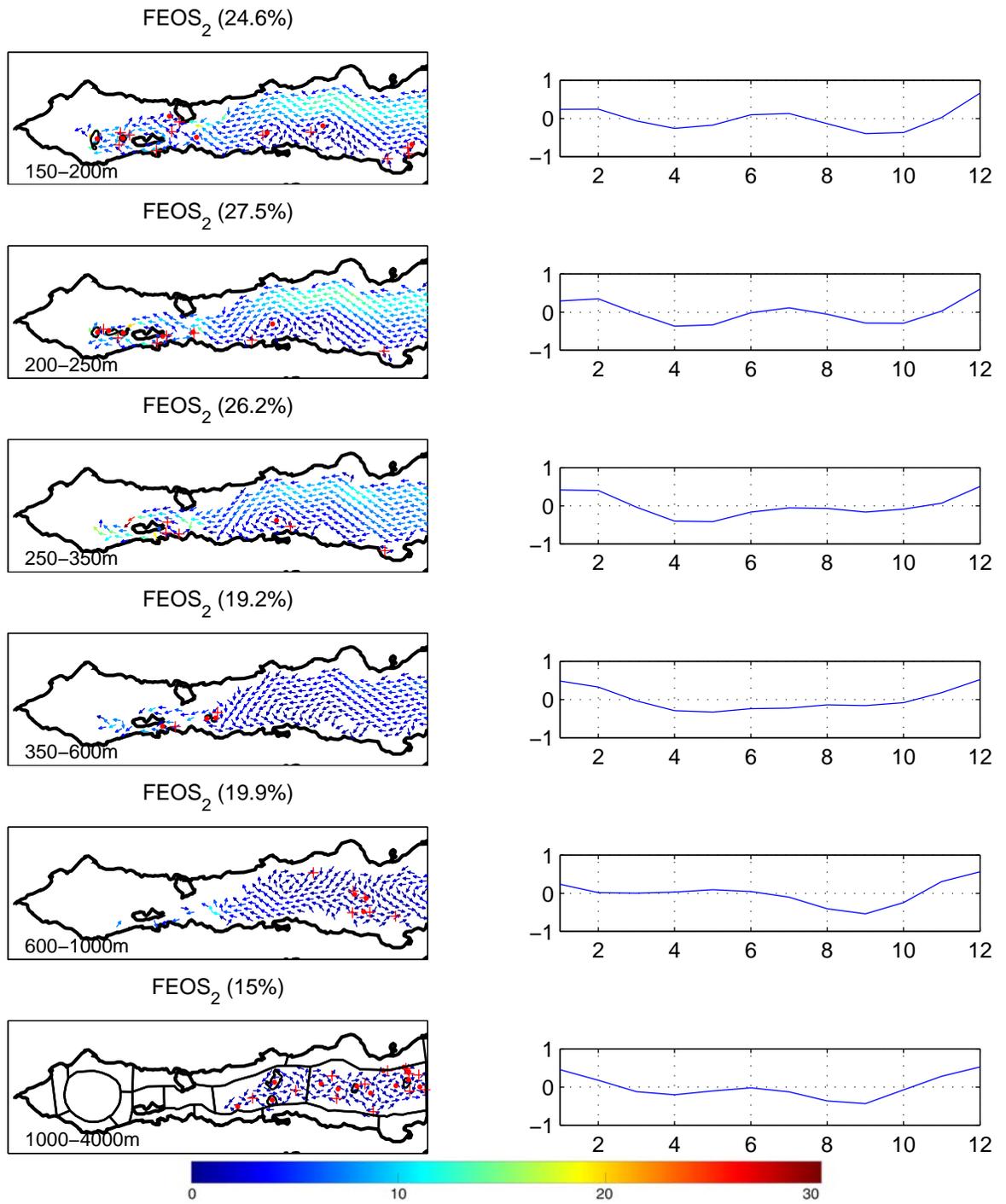


Figura 8. Continuación.

En síntesis, los puntos elípticos, los vectores de velocidad y los contornos de Q_c correspondientes a los meses de invierno y de verano definieron la presencia de remolinos a lo largo del eje longitudinal del golfo, así como el remolino estacional en la región norte y remolinos pequeños en el Alto Golfo y en la costa peninsular. Mientras que en la región de las grandes islas se observó una serie de remolinos, similar a lo observado sobre las cuencas San Pedro Mártir, Guaymas, Carmen y Farallón de la región sur. La escasa presencia de puntos de estancamiento a lo largo de la costa continental del golfo indica regiones de tránsito de partículas, como lo muestran los vectores de velocidad, hacia el norte en verano y hacia el sur en invierno. Estas características también se pueden observar en las componentes barotrópicas de la velocidad y en el análisis de FEO. En los meses de transición de la circulación, la estructura tiende a ser diferente, se detecta la presencia de remolinos sobre la costa continental.

La definición de las provincias se realizó considerando solamente las estructuras (remolinos y flujos intensos o débiles) observadas en los períodos de circulación anticiclónica y ciclónica dado que fueron más organizadas. A pesar de esta característica, la delimitación de áreas presentó cierto grado de arbitrariedad debido a la variabilidad temporal y espacial de las estructuras.

En la costa continental del golfo, los flujos fueron intensos y la presencia de puntos fijos fue escasa y por consiguiente, corresponde a una región de tránsito rápido de partículas. En esta zona fueron delimitadas cuatro provincias: Sonora (SON), Norte de la isla Tiburón (NIT), Región Continental Central (RCC) y Región Continental Sur (RCS). Las áreas se eligieron de forma arbitraria para tener una mejor resolución espacial del destino de las partículas.

A lo largo del eje longitudinal del golfo se observaron remolinos, estas estructuras pueden indicar zonas de atrapamiento de partículas. En la región norte, se delimitó una provincia denominada Remolino Estacional (RE) que trató de capturar la presencia del remolino en la porción central de la cuenca y otra provincia más para el Alto Golfo (AG) que presentó una

serie de remolinos pequeños. En la región de las grandes islas se delimitaron dos provincias: Este de la isla Ángel de la Guarda (EAG) y la zona de los Umbrales (UM), de igual forma se definieron dos áreas para la región sur: Cuenca Guaymas (CG) y Cuenca Farallón (CF).

En la costa peninsular se observaron remolinos pequeños y los flujos medios fueron débiles en general. Esta zona se dividió en siete áreas, tres de estas en la región norte y se denominaron como Conexión del Alto Golfo con el remolino estacional (CAR), Remolinos Peninsulares (RP) y la Cuenca Delfín (CD), donde domina la circulación anticiclónica (cyclónica) en invierno (verano). La provincia Canal de Ballenas (CB) se definió para la región de las grandes islas, zona que comunica las regiones norte y sur. Para la región sur se definieron tres provincias: Región Peninsular Central (RPC), Región Peninsular Sur (RPS) y Bahía La Paz (BP), áreas que pueden retener partículas y transportar a los remolinos presentes sobre las cuencas de la región. En resumen, se definieron seis áreas para la región norte, cuatro para la región de las grandes islas y siete para la región sur del golfo (Fig. 9). A manera de ilustración se presentan los puntos elípticos e hiperbólicos localizados en los meses de invierno, así como la circulación superficial de julio (verano).

Finalmente, como se explicó anteriormente, las matrices de conectividad presentan en el eje vertical las provincias de liberación de partículas y en el eje horizontal las provincias de arribo. En particular, el ordenamiento de las provincias ocurre de la región norte a la región sur (de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba). Esto facilitó la observación del transporte de partículas entre las tres grandes regiones (norte, grandes islas y sur) y las diecisiete provincias (Fig. 9). Los valores (barra de colores) muestran los porcentajes de atrapamiento o transporte de partículas para cada provincia y se excluyeron porcentajes $<5\%$.

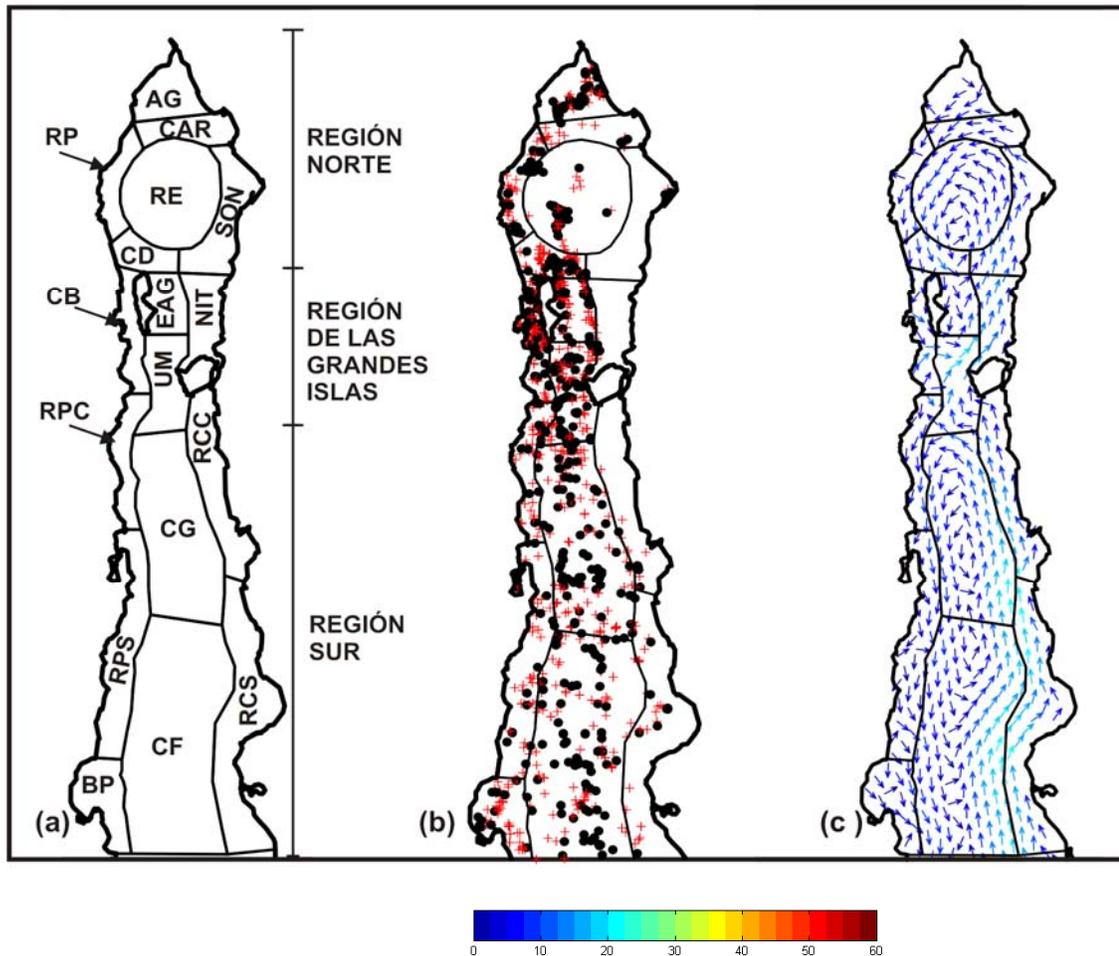


Figura 9. (a) Definición de provincias para la región norte: Alto Golfo (AG), Conexión Alto Golfo y Remolino Estacional (CAR), Remolinos peninsulares (RP), Remolino Estacional (RE), Sonora (SON) y Cuenca Delfín (CD). En la región de las grandes islas: Norte de la isla Tiburón (NIT), Este de la isla Ángel de la Guarda (EAG), Canal de Ballenas (CB) y la zona del Umbral (UM). En la región sur: Regiones Peninsulares Central (RPC) y Sur (RPS), Bahía La Paz (BP), Cuencas Guaymas (CG) y Farallón (CF), Regiones Continentales Central (RCC) y Sur (RCS); (b) puntos elípticos e hiperbólicos localizados en los meses de invierno y (c) la circulación superficial de julio (verano). Se grafica uno de cada 12 vectores y la barra de colores indica la magnitud dada en cm s^{-1} .

3.2. La conectividad tridimensional

Las matrices de conectividad se calcularon para cada capa del modelo y para cada mes. Por lo tanto, se obtuvieron 144 matrices de conectividad durante el período anual. Para compactar esta información, las partículas liberadas en cada provincia fueron integradas en la vertical y se calcularon las matrices de conectividad. Estas matrices mostraron que capturan los patrones observados en las matrices de las distintas capas, por supuesto que existen diferencias pero el patrón es similar.

Las diferencias entre las matrices obtenidas para cada capa del modelo y la matriz calculada con la integración vertical de las partículas fueron cuantificadas celda por celda para todos los períodos mensuales. Los resultados indicaron que entre el 74 y 98 % de las celdas de la matriz mostraron diferencias menores al 20 % y menores al 30 % más del 80 % de las celdas. En este análisis se excluyeron las celdas con valor de cero tanto en la matriz de conectividad de una capa en particular y a la correspondiente integrada verticalmente. Estas celdas corresponden a provincias no conectadas por la distancia que los separa. Sin embargo, pueden corresponder a una zona de tránsito de partículas. Estos valores indican que es razonable estudiar la conectividad entre las diferentes provincias mediante la integración vertical de las partículas, como una primera aproximación.

Las diferencias relativamente bajas (<20 %) fueron debidas a patrones similares de atrapamiento o transporte de partículas. Por ejemplo, en la región norte, la dispersión fue similar en las diferentes capas, dado que la circulación es bien definida en los meses de invierno y verano, por supuesto que existe corte de la velocidad en la vertical. Sin embargo, de acuerdo a las dimensiones de las provincias, la contribución del corte en la velocidad no siempre puede ser importante, esto es si después de cierto período se localizan dentro de la misma área de liberación. Los sitios donde las diferencias pueden ser altas (<26 %) son regiones con flujos completamente opuestos, como ocurre en la región de las grandes islas.

Las matrices de conectividad mostraron patrones bien diferenciados en los meses de circulación anticiclónica, de circulación ciclónica y durante los períodos de transición. A continuación se presentan algunas características de las matrices en cada uno de los períodos mencionados. Posteriormente, se muestra la evolución temporal de atrapamiento y transporte de partículas para cada una de las provincias de las regiones norte, de las grandes islas y sur del golfo.

3.2.1. Período de circulación anticiclónica

En este período las provincias de la región norte mostraron bajas retenciones (<30 %; Fig. 10). A excepción de algunas provincias que presentaron porcentajes relativamente altos (>30 %) en algunos meses como el AG (noviembre y marzo), RE (enero, febrero y marzo) y RP (marzo). Las provincias más dispersivas fueron la Cuenca Delfín (CD) y Sonora (SON) con transportes >80 %. En general, el transporte de partículas es predominante hacia el sur, hasta las provincias de la Región Peninsular Central (RPC) y la Cuenca Guaymas (CG).

En la región de las grandes islas, el Canal de Ballenas fue la única provincia que retuvo porcentajes >30 % en los meses de enero a marzo (Fig. 10). El transporte de partículas para las provincias costeras (Canal de Ballenas y Norte de la isla Tiburón) ocurre tanto a la región norte como a la región sur, mientras que para el área Este de Ángel de la Guarda (EAG) el transporte fue preferentemente hacia la región norte y para la zona de los Umbrales (UM) fue hacia el sur.

En la región sur, las retenciones fueron relativamente altas (>30 %) para las áreas de la costa peninsular (Región Peninsular Sur y Bahía La Paz) y sobre las cuencas (Guaymas y Farallón), esto se observó en los cinco meses correspondientes al período anticiclónico (noviembre-marzo). El transporte de partículas ocurrió principalmente entre las provincias de la región sur. Se puede apreciar en las matrices de conectividad el transporte de partículas hacia afuera del dominio de estudio. Si se integran los porcentajes en dirección

de las columnas, el resultado debe ser ~100 % dado que se contabiliza la totalidad de las partículas liberadas en cada provincia. En este caso, los máximos porcentajes de transporte fuera del dominio de estudio se observaron en las provincias localizadas al sur: BP (2-30 %), CF (20-50 %) y en las provincias de la costa continental: RCC (<40 %) y RCS (70-80 %).

3.2.2. Período de circulación ciclónica

En presencia de la circulación ciclónica, las provincias de las regiones norte y sur presentaron mayores porcentajes de retención y por períodos más largos (Fig. 11). En la región norte, a excepción de la Cuenca Delfín, las provincias mostraron retenciones >30 % en junio y septiembre. Esto se observó para todo el período en las provincias Alto Golfo y Remolino Estacional. El transporte de partículas ocurre principalmente entre las provincias de la región norte. Si se integran los porcentajes de atrapamiento y transporte de partículas en las provincias de esta región, se obtiene un porcentaje elevado de atrapamiento (>70 %) lo que indica que la retención es más efectiva con la presencia del remolino ciclónico.

Para la región de las grandes islas, las altas retenciones de partículas (>30 %) se observaron en el Canal de Ballenas (CB) durante este período, mientras que para el área del Umbral (UM), la retención fue alta (>30 %) solamente en junio (Fig. 11). El transporte de partículas en esta zona fue principalmente hacia el norte como lo indican los valores de la matriz de conectividad.

En la región sur, todas las provincias mostraron retenciones >30 % durante el período ciclónico, excepto RCC que fue de 26 % en septiembre (Fig. 11). El transporte de partículas hacia el norte se observó en las áreas de la costa continental. El resto de las áreas exportaron partículas entre las provincias de la región. El mayor transporte de partículas fuera del dominio de estudio ocurrió en las provincias Bahía La Paz (10-40 %) y Cuenca Farallón (10-20 %).

3.2.3. Períodos de transición

En el período de transición entre la circulación anticiclónica a ciclónica (abril-mayo), la mayor parte de las provincias de la región norte (excepto CD) mostraron atrapamiento de partículas $>30\%$ (Fig. 12). En la región de las grandes islas, las retenciones fueron relativamente altas ($>30\%$) para las provincias Canal de Ballenas (abril) y el Umbral (abril-mayo), mientras que para la región sur, todas las provincias presentaron retenciones $>30\%$. En el período de transición entre la circulación ciclónica a anticiclónica (octubre), las provincias con retenciones mayores a 30% fueron menores comparados con el período de abril y mayo. En la región norte, las retenciones $>30\%$ se presentaron en las provincias AG, RP y RE, mientras que en la región de las grandes islas, ninguna de las áreas presentaron estos niveles de retención. En contraste, en la región sur todas las áreas presentaron retenciones $>30\%$, con excepción de la RCC.

En mayo se presentaron las máximas retenciones de todo el período anual. En la región norte, las áreas AG, RE y SON presentaron retenciones $>62\%$, $<40\%$ en las provincias de la región de las grandes islas y $>70\%$ en la mayor parte de las provincias de la región sur (excepto RPC; Fig. 12). Además se puede observar que la dispersión de partículas es menor comparado con los meses de circulación anticiclónica (ciclónica). Esto se distingue por la confinación de las celdas coloreadas alrededor de la diagonal de la matriz de conectividad. Esta característica se puede observar en junio que corresponde al período de circulación ciclónica (Fig. 11), mientras que en julio y agosto se observó mayor dispersión en la diagonal. Sin embargo, al finalizar este período de circulación (septiembre) se observó mayor retención de partículas en la diagonal y menor dispersión durante este período (similar al observado en mayo). En cambio en octubre la retención fue menor en la diagonal y mayor dispersión comparada con septiembre.

Las matrices de conectividad también proporcionan información sobre el origen de las partículas que arriban en las diferentes provincias. El porcentaje de partículas que arriban a cada una de las provincias del eje horizontal de la matriz corresponden a cada uno de los

valores de la columna de la matriz, cuyo origen se indica en el eje vertical. En general, se puede apreciar que las provincias que reciben mayores aportes de partículas son las que se ubicaron sobre el eje longitudinal del golfo (RE, EAG, UM, CG y CF). Esto puede ser asociado a la presencia de remolinos y al tamaño de las provincias, que son relativamente mayores a las áreas costeras.

3.2.4. Evolución temporal de atrapamiento y transporte de partículas

Para describir la evolución temporal de atrapamiento o transporte de partículas se presentan matrices para cada una de las provincias, donde el eje vertical indica cada mes del año y el eje horizontal el destino de las partículas. En las provincias de la región norte (Fig. 13) se observó que las provincias que retienen la mayor parte de las partículas son: AG (10-70 %) y RE (10-80 %). Las máximas retenciones de partículas en cada provincia ocurrieron de abril a mayo y de septiembre a octubre, que corresponden a los períodos de transición del remolino anticiclónico a ciclónico y viceversa, respectivamente. El transporte de partículas durante el período ciclónico se limitó a la región norte, excepto CD. En particular, para las áreas AG y RP presentaron este patrón durante todo el año. Mientras que para el período anticiclónico, el transporte tiende a ser hacia la región de las grandes islas y hacia la región sur.

En la región de las grandes islas (Fig. 14), las provincias que retuvieron una mayor cantidad de partículas a lo largo del período anual fueron el CB (10-50 %) y el UM (10-40 %) con máximos valores entre abril y agosto. En contraste, las provincias NIT y EAG transportaron partículas (~80 %) hacia otras regiones. El transporte de partículas del EAG ocurrió principalmente hacia la región norte durante el período anual, mientras que para el NIT y el CB mostraron incursiones de partículas hacia las regiones norte y de las grandes islas en el período ciclónico, extendiéndose hacia la región sur (CG) en el período anticiclónico. En los 12 períodos mensuales se observó que las partículas liberadas en la región de las grandes islas fueron poco transportadas (<10 %) hacia las provincias más al norte del golfo (AG, CAR y RP).

En la región sur (Fig. 15), las provincias CG, RPS, CF, RCS y BP mostraron una mayor retención de partículas comparado con el transporte de éstas. Los máximos se ubicaron entre mayo y junio (50-80 %) y entre agosto y octubre (40-80 %) que se sitúan alrededor de los períodos de transición de la circulación en la región norte. El transporte de partículas ocurre fundamentalmente entre las provincias de la región sur, en particular para las áreas: RPS, CG, CF, RCS, mientras que la incursión de partículas hacia la región norte se observó para las provincias RPC y RCC.

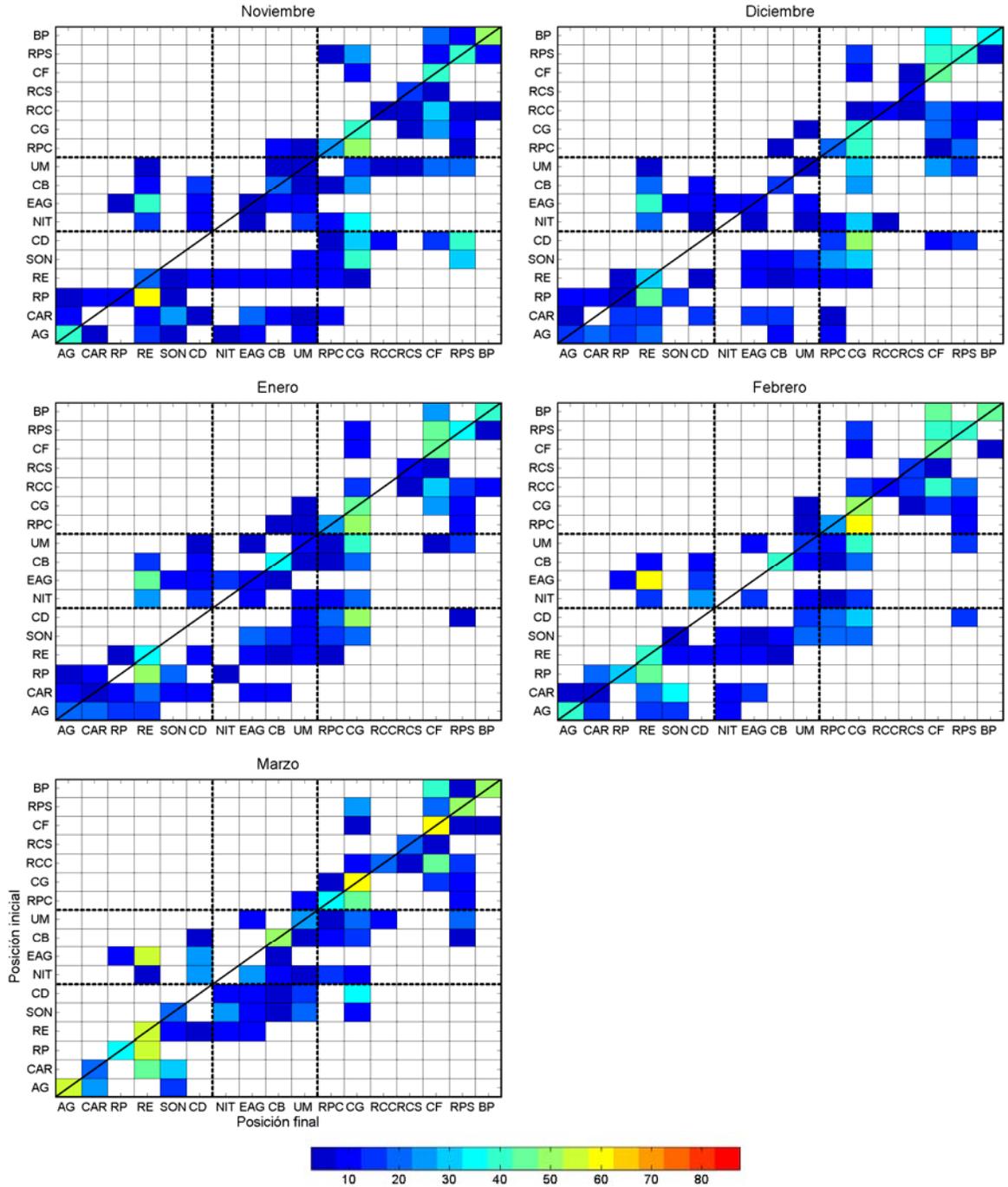


Figura 10. Matrices de conectividad con partículas integradas en la vertical durante los meses correspondientes al período de circulación anticiclónica. Las líneas punteadas delimitan las provincias de las tres regiones del golfo: norte, de las grandes islas y sur. La escala de colores indica el porcentaje de retención o transporte de partículas.

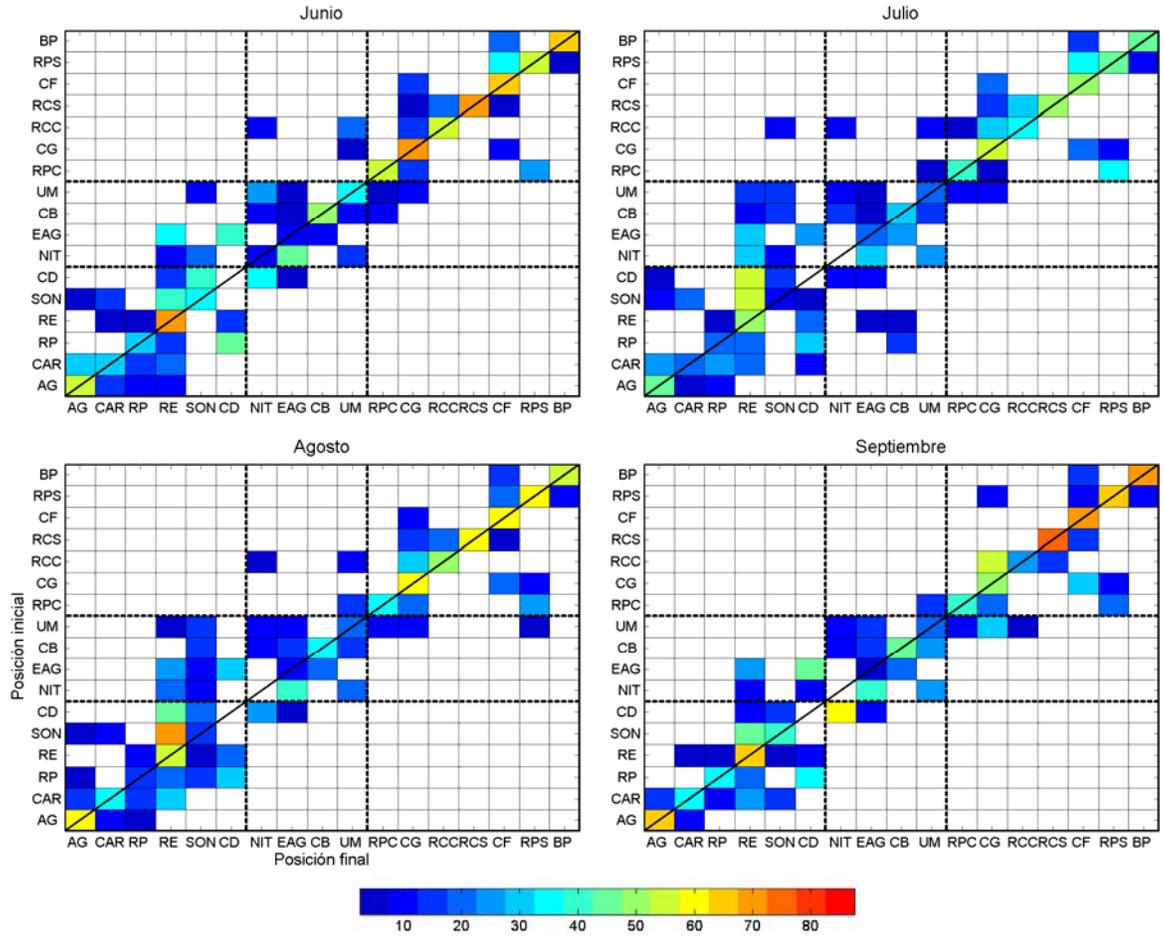


Figura 11. Matrices de conectividad con partículas integradas en la vertical durante los meses correspondientes al período de circulación ciclónica. Las líneas punteadas delimitan las provincias de las tres regiones del golfo: norte, de las grandes islas y sur. La barra de colores indica el porcentaje de retención o transporte de partículas.

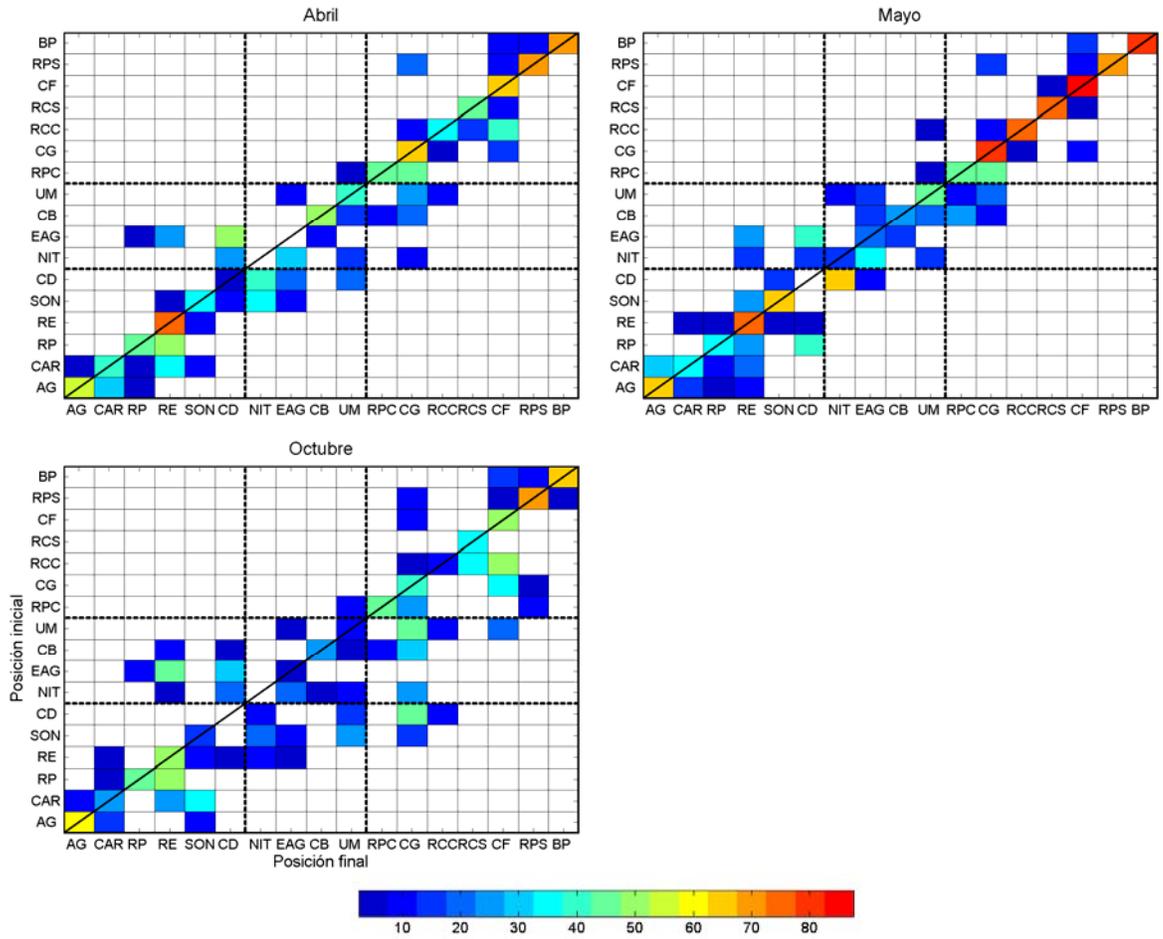


Figura 12. Matrices de conectividad con partículas integradas en la vertical durante los meses correspondientes a períodos de transición de la circulación. Las líneas punteadas delimitan las provincias de las tres regiones del golfo: norte, de las grandes islas y sur. La barra de colores indica el porcentaje de retención o transporte de partículas.

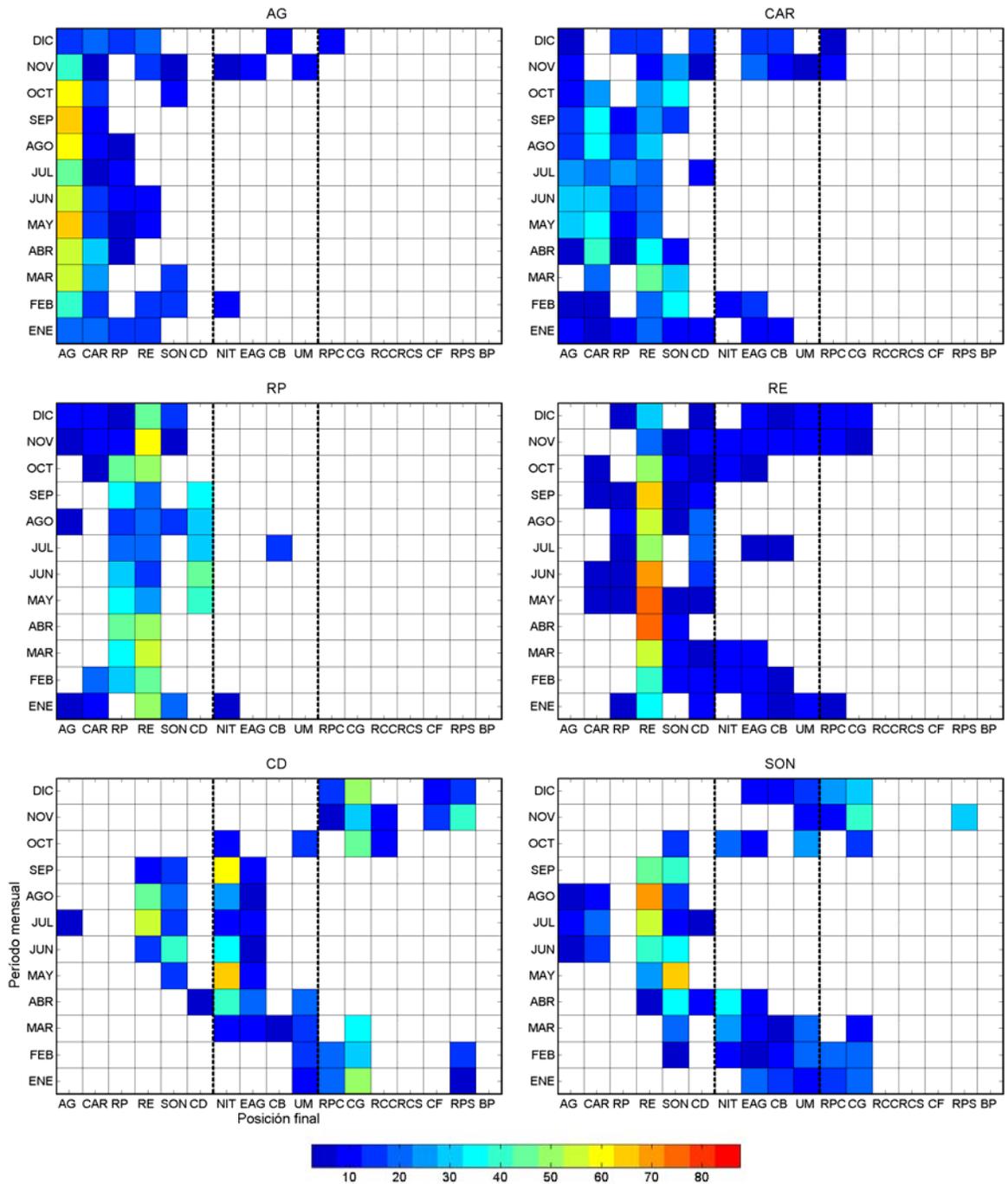


Figura 13. Evolución temporal de atrapamiento/transporte de partículas para cada provincia de la región norte del Golfo de California. En el eje vertical se muestra el tiempo en meses a lo largo del año y en el eje horizontal se presentan las áreas de arriba o destino. Las líneas punteadas delimitan las provincias de las tres regiones del golfo: norte, de las grandes islas y sur. La barra de colores indica el porcentaje de partículas retenidas/transportadas para cada provincia.

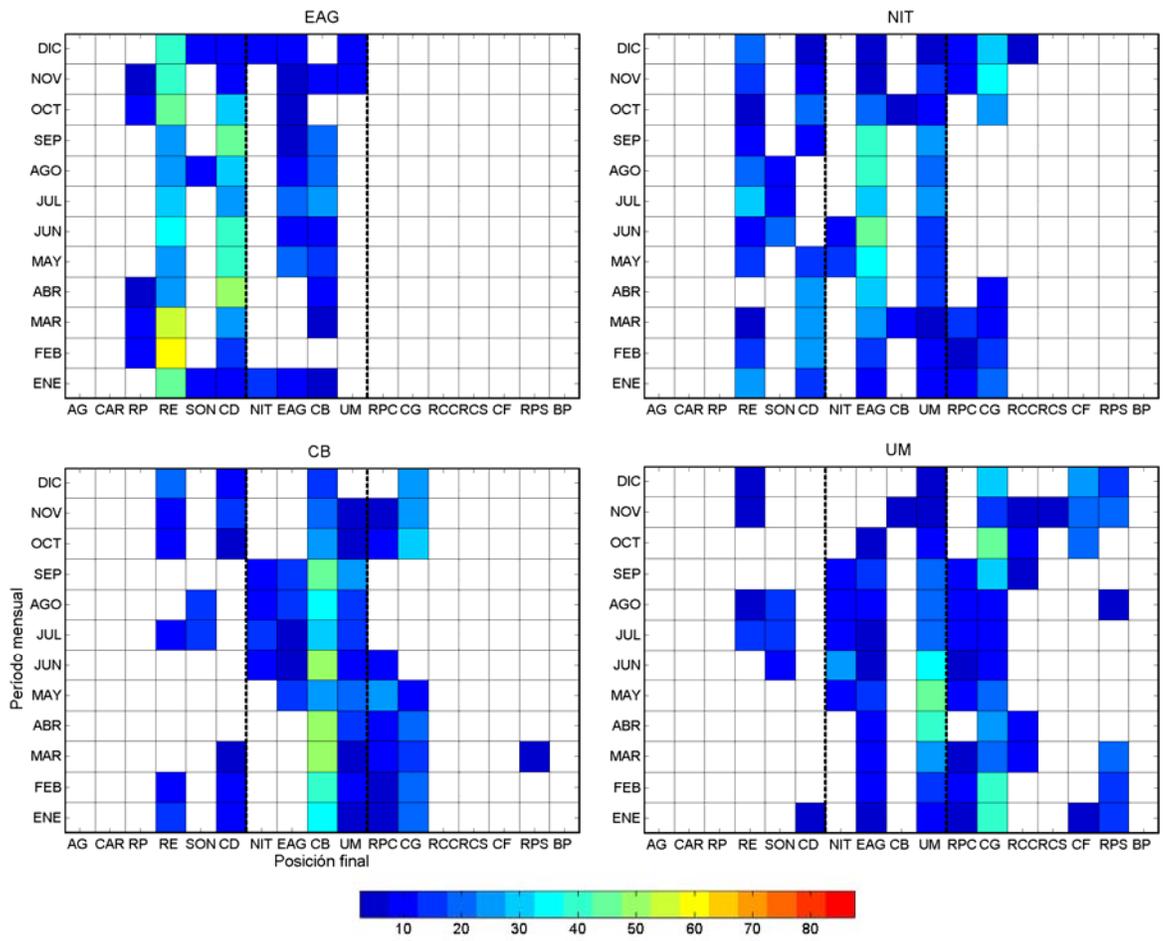


Figura 14. Evolución temporal de atrapamiento/transporte de partículas para cada provincia de la región de las grandes islas del Golfo de California. En el eje vertical se muestra el tiempo en meses a lo largo del año y en el eje horizontal se presentan las áreas de arribo o destino. Las líneas punteadas delimitan las provincias de las tres regiones del golfo: norte, de las grandes islas y sur. La barra de colores indica el porcentaje de partículas retenidas/transportadas para cada provincia.

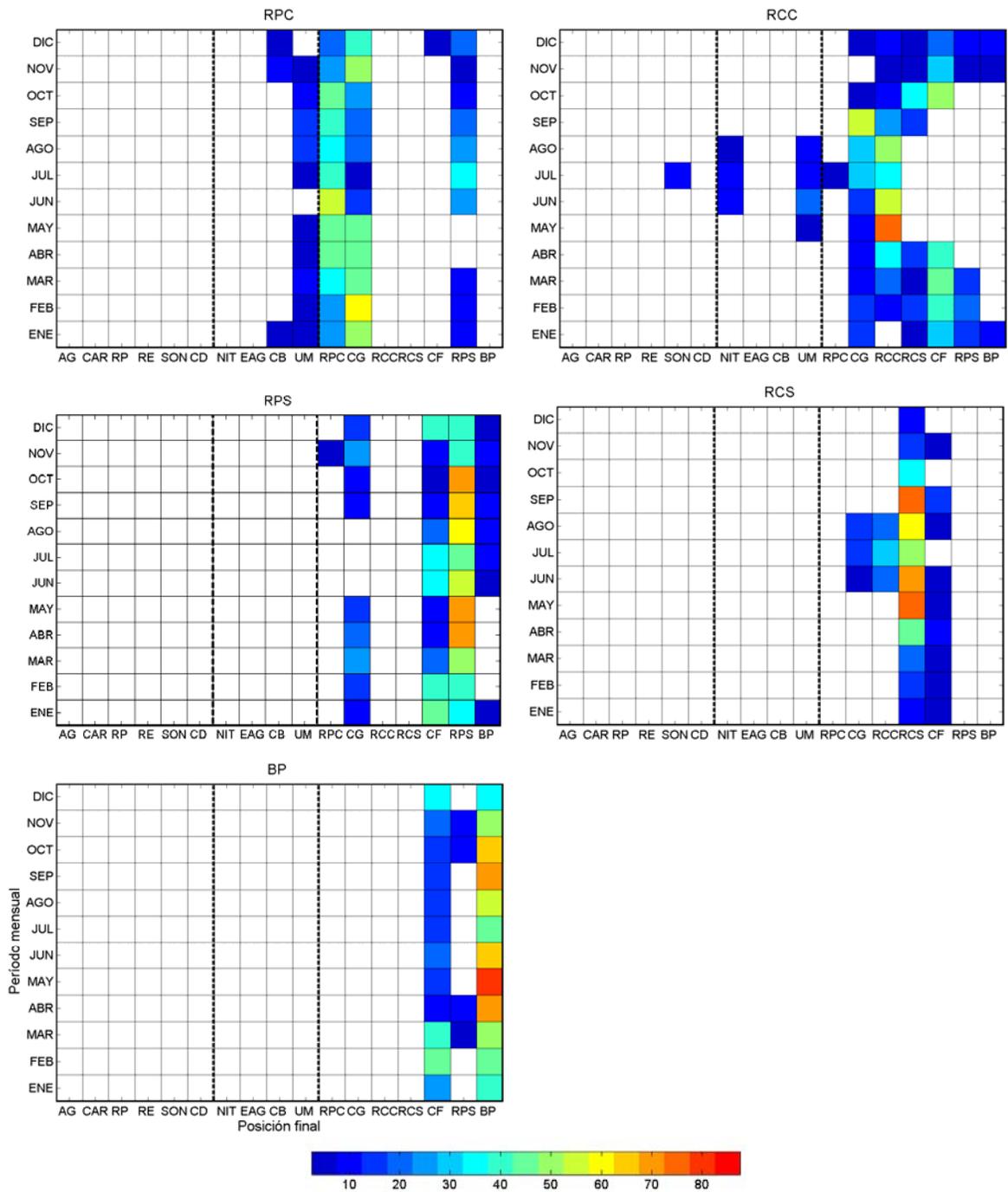


Figura 15. Evolución temporal de atrapamiento/transporte de partículas para cada provincia de la región sur del Golfo de California. En el eje vertical se muestra el tiempo en meses a lo largo del año y en el eje horizontal se presentan las áreas de arriba o destino. Las líneas punteadas delimitan las provincias de las tres regiones del golfo: norte, de las grandes islas y sur. La barra de colores indica el porcentaje de partículas retenidas/transportadas para cada provincia.

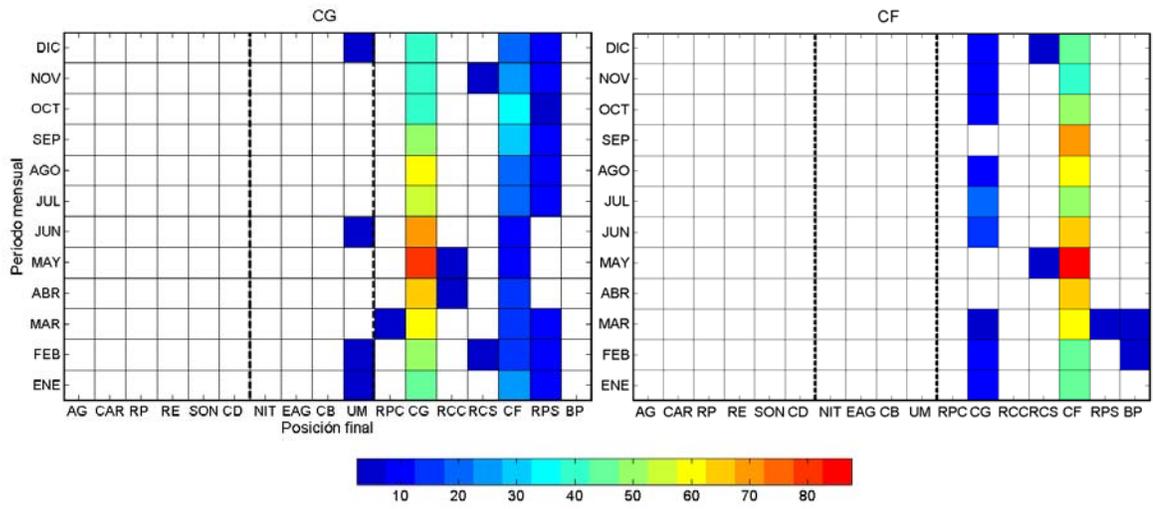


Figura 15. Continuación.

4. Discusión

4.1. Definición de provincias

Las provincias o áreas de conectividad se definieron con la identificación de zonas de atrapamiento/tránsito de partículas en el campo de velocidades mensuales, con la suposición que éstas capturan las propiedades dominantes en la dinámica del Golfo de California. Esta premisa es particularmente cierta para la región norte del golfo, donde domina la circulación anticiclónica en invierno y ciclónica en verano (Lavín *et al.* 1997; Carrillo *et al.*, 2002; Palacios Hernández *et al.* 2002), así como la presencia de remolinos sobre las cuencas de la región sur y flujos intensos sobre la costa continental (Figueroa *et al.*, 2003; Zamudio *et al.*, 2008). El modelo HAMSON reproduce adecuadamente estas características (Marinone, 2003; Gutiérrez *et al.*, 2004; Marinone *et al.*, 2011). Los resultados del valor crítico del parámetro de Okubo-Weiss y la geometría del flujo en los campos Eulerianos mensuales también capturan las estructuras mencionadas, como el remolino estacional de la región norte y los remolinos situados sobre las cuencas de la región sur, flujos intensos en la costa continental y flujos débiles en la costa peninsular de la región sur, rasgos que pueden definir las zonas de atrapamiento o de tránsito de partículas en el golfo.

En todo el Golfo de California se definieron 17 áreas de conectividad, las cuales abarcaron desde la superficie hasta el fondo. Algunas estructuras fueron persistentes en la vertical como el remolino estacional en la región norte, los flujos intensos en la costa continental y flujos débiles en la costa peninsular de la región sur. Por esta razón es adecuado estudiar la conectividad tridimensional de estas estructuras con las zonas circunvecinas. Sin embargo, esta forma de delimitación tiene algunas consecuencias en la conectividad de algunas regiones con circulación compleja. Por ejemplo, en la zona de las grandes islas donde los flujos en las capas superficiales y de fondo fueron opuestos o sobre las cuencas de la región sur con presencia de remolinos en las capas superficiales en los meses de verano y bien definidos en prácticamente toda la columna de agua en julio, en cambio en los meses de

invierno, los flujos superficiales fueron principalmente hacia el sur y la presencia de remolinos se observó en las capas profundas.

La variabilidad espacial y temporal de las regiones dominadas por remolinos, flujos intensos o débiles observadas en los campos Eulerianos sugiere diversos grados de conectividad. Por ejemplo, en enero las capas superficiales de la zona de los umbrales indicaran conectividad con la región sur, mientras que las capas profundas mostrarán conexión con la región norte (Fig. 3) y viceversa en julio (Fig. 4). Estos patrones son incluidos en la matriz de conectividad obtenida con la integración vertical de partículas en cada provincia. Además se puede definir la dirección dominante de la dispersión como es el caso de la provincia Este de Ángel de la Guarda, cuyo transporte de partículas es principalmente hacia la región norte en todo el año (Fig. 14). A pesar de la variabilidad en las estructuras (como remolinos, flujos intensos o débiles) observadas principalmente sobre el eje central a lo largo del GC, se puede obtener algunos patrones de conectividad en esta región como se presenta en la siguiente sección.

En general, los flujos mensuales mostraron patrones de circulación cualitativamente diferentes en la dirección transversal, es decir, a lo largo de la costa continental, sobre el eje central a lo largo del golfo y sobre la costa peninsular.

En la costa continental del golfo, los flujos fueron intensos en las diferentes capas del modelo con dirección preferencial hacia el norte en verano y hacia el sur en invierno (Anexo B), patrones que indicaron una zona de tránsito rápido de partículas como lo reportó Marinone *et al.* (2011) para la capa superficial (0-10 m) y consistente con la escasa presencia de puntos fijos (Fig. 9b). En esta zona se definieron cuatro áreas de forma arbitraria: dos en la región norte y dos en la región sur para tener una mayor resolución en la conectividad de estas provincias. Previamente, Marinone (2012) delimitó 12 provincias en el GC por inspección visual del campo de velocidades Eulerianos y con base en el conocimiento de la dinámica del golfo. Por ejemplo, las corrientes intensas de la costa de Sonora (Lavín *et al.* 1997), corrientes intensas de marea, mezcla y surgencia del Canal de

Ballenas y Salsipuedes (López *et al.* 2006, 2008). Este autor definió tres áreas para la costa continental basándose en los flujos intensos reportados para la zona, características que se observaron en las diferentes capas de los campos mensuales de velocidad (Fig. 3 y Fig. 4) y campos barotrópicos (Fig. 6) de invierno y verano, así como del análisis de FEO (Fig. 7 y Fig. 8). Las provincias de la costa de Sonora también coincidieron con una provincia definida por Peguero Icaza *et al.* (2008) y Sánchez Velasco *et al.* (2009) cuya delimitación se basó en la distribución de LFAs que fue asociada con el flujo costero.

En el eje central a lo largo del golfo, los flujos medios en la vertical fueron complejos particularmente en la zona de los umbrales y sobre las cuencas de la región sur. En la porción central de la región norte, la presencia del remolino estacional fue bien definida en los promedios temporales (Anexo B), campos barotrópicos (Fig. 6) y en el análisis de FEO (Fig. 7), excepto en los meses de transición. Para esta estructura se delimitó una provincia (RE) que trató de capturar el núcleo del remolino definido por el contorno de Q_c (Isern Fontanet *et al.*, 2004; Nencioli *et al.*, 2010). Sin embargo, como se puede apreciar en los diferentes meses y capas del modelo, la posición y la dimensión son variables y por consiguiente, la delimitación del área fue arbitraria. En términos de conectividad, la provincia puede diferenciarse de la costa de Sonora que presenta flujos intensos que se conectan con la región de las grandes islas y de la costa peninsular que presenta remolinos pequeños en los meses de invierno (Fig. 9b).

En la región de las grandes islas, los flujos medios fueron complejos debido a que es una región de intercambio de agua entre las regiones norte y sur (Mateos *et al.*, 2006). Los campos de velocidad mensuales mostraron flujos intensos en la superficie con dirección hacia el norte en verano (Fig. 4) y hacia el sur en invierno (Fig. 3), mientras que a profundidades >150 m se observaron flujos en sentido opuesto y presencia de remolinos. En términos de conectividad, estas características pueden indicar la dominancia de transporte de partículas en la superficie y sería consistente con lo reportado por Marinone *et al.* (2011) y Marinone (2012), mientras que en la parte profunda se presenten posibles zonas de retención o transporte de partículas en dirección opuesta a la superficial. Dada la

complejidad observada en esta región se delimitaron de forma arbitraria dos provincias: Este de la Isla Ángel de La Guarda (EAG) y la zona de los Umbrales (UM; Fig. 9). Marinone (2012) definió dos provincias en esta región para la conectividad superficial, mientras que la distribución de LFAs definieron una provincia (Peguero Icaza et al., 2008; Sánchez Velasco et al., 2009). A diferencia de estos trabajos, la definición más detallada de la región de las grandes islas muestra patrones de dispersión cualitativamente diferentes en la columna de agua. Por ejemplo, el EAG aporta partículas principalmente hacia el norte en todos los meses, contrario a lo que se esperaría durante el período anticiclónico de la circulación.

En las cuencas de la región sur se observaron remolinos cuya presencia fue variable espacial y temporalmente. Sin embargo, las estructuras fueron bien definidas desde la superficie hasta las capas profundas en julio (Fig. 4) y fueron capturadas en los flujos barotrópicos (Fig. 6), así como en algunas estructuras derivadas de las FEO (Fig. 7). De acuerdo con estas características se definieron dos provincias para las cuencas de la región sur. Esta zona fue definida por Marinone (2012) con base en la presencia de remolinos reportados por Figueroa *et al.* (2003) y Zamudio *et al.* (2008), consistente con la geometría observada en los diferentes campos Eulerianos de este trabajo.

A lo largo de la costa peninsular se observaron remolinos pequeños y flujos débiles en la mayor parte de los promedios mensuales (Anexo B). En la región norte se definieron dos provincias: Remolinos Peninsulares (RP) y Cuenca Delfín (CD). En RP se observaron remolinos pequeños en las capas superficiales (Fig. 3) y en los campos barotrópicos de los meses de invierno (Anexo B). Estas estructuras también se observaron en la geometría del flujo de invierno reportado por Velasco Fuentes y Marinone (1997), características que indican una zona de atrapamiento de partículas como se observa en las trayectorias lagrangeanas de la figura 16b. Mientras que en la Cuenca Delfín, los puntos fijos fueron escasos en los 12 períodos mensuales lo que sugiere una zona de tránsito de partículas.

En la región de las grandes islas, la provincia Canal de Ballenas (CB) cubre los denominados: Canal de Ballenas y Canal Salsipuedes. En estas zonas se observaron remolinos pequeños en la mayor parte de los períodos mensuales y los flujos medios fueron débiles comparados con el flujo entre las islas Ángel de la Guarda y Tiburón (Anexo B), lo que sugirió una zona de atrapamiento de partículas. Esta provincia fue previamente definida por Marinone (2012) quien argumentó su delimitación con la particular dinámica de la zona: mezcla intensa, surgencia y corrientes residuales débiles, dinámica que reproduce el modelo HAMSOM (Marinone, 2003; Gutiérrez *et al.*, 2004; Marinone, 2008; Marinone *et al.*, 2011). Para la costa peninsular de la región sur, los flujos en las diferentes capas fueron débiles en la mayor parte de los períodos mensuales y consecuentemente, puede definirse como una zona de retención de partículas, lo que es consistente con lo reportado por Marinone *et al.* (2011) para la capa superficial.

La delimitación de las provincias se fundamentó en las estructuras (remolinos, flujos intensos o débiles) definidas por el parámetro de Okubo-Weiss y la geometría de flujo de los campos Eulerianos mensuales, así como los campos barotrópicos y análisis de FEO. En general, las estructuras identificadas fueron congruentes con lo reportado para el GC, por esta razón las delimitaciones fueron similares a lo reportado por Marinone (2012). Sin embargo, en este trabajo se exploró el carácter tridimensional de las estructuras que fueron variables en las escalas temporal y espacial, por ello las delimitaciones tienen cierto grado de arbitrariedad, particularmente en la región de las grandes islas. Así mismo se observaron estructuras bien organizadas y persistentes en la vertical como la presencia de remolinos en la región norte y sobre las cuencas de la región sur, así como los flujos intensos en la costa continental. También se consideraron algunas estructuras con mayor detalle, como los remolinos peninsulares de la región norte y la Cuenca Delfín que aparentemente corresponde a una zona de tránsito de partículas. La delimitación de estas estructuras permite conocer la razón de transferencia de materiales con las zonas adyacentes y su variabilidad.

4.2. La conectividad tridimensional

En esta sección, se discuten los resultados de este trabajo con respecto a estudios previos de conectividad para cada una de las regiones del golfo y para cada período de la circulación (anticiclónica, ciclónica y transición). La comparación de resultados fue complicada, debido a que las definiciones de las áreas son diferentes y la conectividad en los diversos trabajos se enfocó en los primeros 200 m de profundidad y en algunos casos para algunas regiones del golfo. En cambio, en este trabajo la conectividad entre las provincias se exploró con la liberación de partículas en las diferentes profundidades de toda la columna de agua. Sin embargo, se pueden comparar algunos patrones de atrapamiento o dispersión de partículas por regiones.

Las provincias de la región norte durante el período de circulación anticiclónica fueron dispersivas con retenciones $<30\%$ en todas las áreas en noviembre y el transporte de partículas fue principalmente hacia el sur (Fig. 10). El resto del período estos patrones fueron similares con excepción de las áreas ubicadas más al norte para ciertos meses: RE (enero a marzo), AG (noviembre y marzo) y RP (marzo), provincias con presencia de remolinos, estructuras que favorecen el atrapamiento de partículas como se observa en las trayectorias de las partículas de la figura 16. En esta se aprecia el atrapamiento y la retención de partículas en el AG (Fig. 16a), incursión hacia el suroeste de la provincia por la presencia de remolinos pequeños (Fig. 3) y transporte hacia el sur siguiendo la costa continental por la influencia del remolino anticiclónico (Fig. 3a). El transporte de partículas hacia el sur se asocia a los flujos intensos observados en la costa de Sonora y entre las islas Ángel de la Guarda y Tiburón como se muestra con las trayectorias de las partículas (Fig. 16b).

En el período de circulación ciclónica, las provincias de la región norte mostraron mayor atrapamiento de partículas. Al inicio y final del período, las provincias retuvieron porcentajes $>30\%$ con excepción de la Cuenca Delfín que fue $<2\%$ (Fig. 11). Las altas

retenciones son debidas a la presencia del remolino ciclónico y a la corriente intensa sobre la costa continental con dirección hacia la cabeza del golfo. Esta última además de transportar partículas restringe el transporte hacia el sur (Fig. 16e). Este puede ser el mecanismo que explique las diferencias entre el atrapamiento de partículas en los períodos anticiclónico y ciclónico. La idea resulta consistente con los máximos porcentajes de atrapamiento (>47 %) observados en las provincias Alto Golfo y Remolino Estacional, así como el hecho de que la mayor parte de las partículas liberadas en cada provincia (>70 %) se localizaran dentro de la región norte durante los meses correspondientes a este período.

Las bajas retenciones de partículas en toda la columna de agua durante el período anticiclónico coinciden con lo reportado para la capa superficial en las distintas áreas de conectividad definidas para esta región (Peguero Icaza *et al.*, 2011; Marinone, 2012), así como en los estudios lagrangianos (Gutiérrez *et al.*, 2004; Marinone *et al.*, 2011). Las altas retenciones de partículas durante el período ciclónico coincidieron con lo reportado por Gutiérrez *et al.* (2004) mediante la liberación de partículas en la capa superficial del golfo, así como Peguero Icaza *et al.* (2011) quienes obtuvieron altas retenciones (>54 %) entre los diferentes LFAs y también congruente con los índices lagrangianos reportados por Marinone *et al.* (2011). Estos últimos reportaron que una partícula puede desplazarse ~400 km en un período de 28 días y la distancia entre la posición inicial y final de la misma puede ser <100 km, lo que indica que la partícula es atrapada en la región. Marinone (2012) mostró resultados similares para las provincias de la región con retenciones >30 % entre 9 y 12 períodos mensuales.

Se ha documentado que el remolino estacional (anticiclónico en invierno y ciclónico en verano) domina toda la parte norte del golfo (Lavín *et al.*, 1997; Carrillo *et al.*, 2002). En el período anticiclónico, sobre la costa continental se observa un flujo intenso hacia el sur (Fig. 3) que domina el transporte de partículas, como lo indican las matrices de conectividad (Fig. 10) y la evolución temporal de atrapamiento/transporte de partículas (Fig. 13). Este comportamiento se ilustra con trayectorias lagrangianas de algunas partículas liberadas en la provincia SON (Fig. 16b). Las trayectorias indican que el flujo se

ramifica en dos partes sobre la provincia EAG, debido a la presencia de la Isla Ángel de la Guarda: hacia el noroeste y hacia el suroeste en las capas superficiales (<100 m, trayectorias negras), mientras que en las capas inferiores el flujo es hacia el sur (>100 m, trayectorias grises). La ramificación del flujo favoreció el transporte de las partículas liberadas en SON y NIT en las dos direcciones (norte-sur), mientras que en el EAG fue principalmente hacia el norte (Fig. 14). Un caso similar se observó en la Cuenca Delfín, provincia altamente dispersiva (transporte >94 % en los 12 períodos mensuales) que durante el período ciclónico aportó principalmente hacia las provincias de la región norte incluyendo dos provincias de la región de las grandes islas (CB y NIT), en cambio durante el período de circulación anticiclónica el transporte fue hacia el sur.

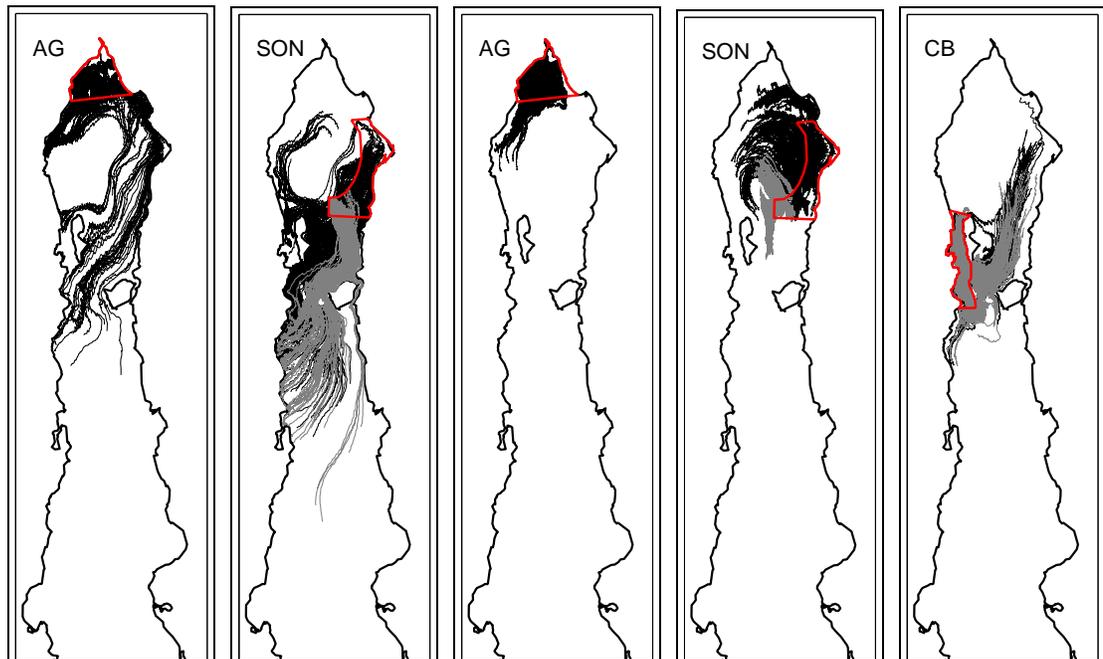


Figura 16. Trayectorias lagrangianas de algunas partículas liberadas en las provincias de la región norte durante un período de 28 días correspondientes a los meses de enero (a y b) y julio (c, d y f). Las trayectorias en negro corresponden a las capas superiores de la columna de agua (<100 m) y las grises a las capas inferiores (>100 m).

En el período anticiclónico, las provincias de la región de las grandes islas mostraron bajos porcentajes de atrapamiento de partículas (<25 %), con excepción de la provincia Canal de Ballenas que presentó relativamente altos porcentajes (36-49 %) en la mayor parte del

período (enero-marzo; Fig.14). Este patrón se observó durante todo el período ciclónico con porcentajes $>30\%$, mientras que la zona de los Umbrales solamente presentó un porcentaje alto ($>30\%$) en junio (Fig. 11 y Fig. 14). El atrapamiento de partículas en el Canal de Ballenas puede explicarse por la presencia de remolinos pequeños y flujos débiles observados en la columna de agua (Fig. 4). Esto es consistente con lo reportado por Marinone *et al.* (2011) quienes muestran que las partículas en la capa superficial de la zona se desplazan a distancias relativamente cortas (~ 40 km) en un período de 28 días. También esta zona es distinguida por intensa mezcla por marea, flujos residuales débiles y surgencia (López *et al.*, 2006; Marinone y Lavín 2003; Marinone, 2008; Marinone *et al.*, 2011), factores que favorecen la retención de partículas.

El bajo atrapamiento de partículas en la región de las grandes islas concuerda con los bajos porcentajes de atrapamiento de partículas ($<34\%$) reportado en los LFAs definidos para esta región (Peguero Icaza *et al.*, 2011), así como los estudios lagrangianos que indican desplazamientos de cientos de kilómetros en períodos mensuales (Velasco Fuentes y Marinone, 1997; Marinone *et al.*, 2011).

En el período anticiclónico, el atrapamiento de partículas en la región sur fue relativamente alto en las provincias ubicadas sobre las cuencas y en la costa peninsular: CG (37-58 %), CF (39-58 %), RPS (34-51 %) y BP (37-51 %) y dispersivas para las otras provincias ($>75\%$) como la costa continental del golfo (Fig. 15). Esto es consistente con las estructuras observadas en los promedios temporales del campo de velocidades, presencia de remolinos (CG y CF), flujos débiles en la costa peninsular. Mientras que en la costa continental los flujos fueron intensos con dirección hacia el sur (Fig. 3), por lo tanto son más dispersivos. El atrapamiento de partículas sobre la costa peninsular y la dispersión sobre la costa continental coinciden con el patrón reportado para la capa superficial del océano por Gutiérrez *et al.* (2004) y Marinone *et al.* (2011). Por ejemplo, de acuerdo a índices lagrangianos, la distancia neta recorrida por una partícula en la costa peninsular es <100 km en 28 días, asociado a corrientes débiles; en cambio, para la costa continental una

partícula puede desplazarse a distancias de 400 km en el mismo período (Marinone *et al.*, 2011).

Para el período ciclónico, las retenciones fueron altas (>30 %) con excepción de la Región Continental Central (~26 %) en septiembre (Fig. 11). Las altas retenciones se pueden asociar a la presencia de remolinos en las cuencas y flujos débiles en la costa peninsular, mientras que sobre la costa continental los flujos son intensos y por lo tanto son más dispersivos. Esto es consistente con lo reportado por Marinone *et al.* (2011); zona de atrapamiento de partículas en la costa peninsular y alta conectividad espacial en la costa continental. Es importante señalar que el atrapamiento de partículas en la región sur es alta (~70 %), es decir, las posiciones finales de las partículas liberadas en cada provincia de esta región se situaron en ésta misma, a excepción de la provincia Bahía La Paz que fue relativamente menor (>60 %).

En general, durante el período de circulación anticiclónica el transporte de partículas hacia el norte fue escaso y más importante hacia la boca del golfo (fuera del dominio de estudio), particularmente para las provincias situadas más al sur del golfo. Para las provincias peninsulares los porcentajes de escape fueron <30 % (Fig. 15): RPC (< 1 %), RPS (<3 %) y BP (2-29 %) donde los flujos medios fueron débiles. Mientras que para las áreas sobre la cuencas con presencia de remolinos fueron relativamente mayores: CG (<10%) y (CF < 47 %) y los máximos se presentaron en la costa continental, dominados por flujos intensos hacia el sur: RCC (<43 %) y RCS (70-82 %). Cabe destacar que el porcentaje de partículas transportadas fuera del dominio cuya liberación ocurrió en las regiones norte y de las grandes islas fue de ~2 %. Para el período de circulación ciclónica, el transporte fuera del dominio de estudio fue mayor para las áreas RCS (1-8 %), CF (10-20) y BP (10-40 %), mientras que en las provincias restantes fue <3 %. Estos resultados fueron acordes con los flujos medios observados en este período. Se puede esperar transporte hacia el norte en la costa continental, retención de partículas asociados a presencia de remolinos en la Cuenca Farallón y sobre la costa peninsular el transporte puede favorecerse hacia el sur como lo indican los flujos medios (Fig. 4).

Las máximas retenciones de partículas en la mayor parte de las provincias ocurre en el período de transición de la circulación anticiclónica a ciclónica (abril-mayo; Fig. 12) con excepción de AG (septiembre) y RCS (septiembre) que se situaron alrededor del otro período de transición (octubre).

En períodos de transición, los campos Eulerianos mensuales mostraron patrones poco organizados y flujos medios débiles ($\sim 5 \text{ cm s}^{-1}$). Por ejemplo, en la región norte para abril y mayo se observaron estructuras de remolinos en prácticamente toda la región, esto fue similar para septiembre (Anexo B). La presencia de estas estructuras pueden explicar los altos porcentajes de retención de partículas, además que los flujos débiles sugieren desplazamientos cortos de las partículas como lo indican las trayectorias lagrangianas de algunas partículas para mayo (Fig. 17). Esta idea sería consistente con la poca dispersión de partículas comparada con los meses donde la circulación es bien definida. La compleja organización del campo de velocidad es producto de la transición del flujo, los cuales son completamente opuestos, remolino ciclónico (anticiclónico) y flujos hacia el norte en verano y hacia el sur en invierno.

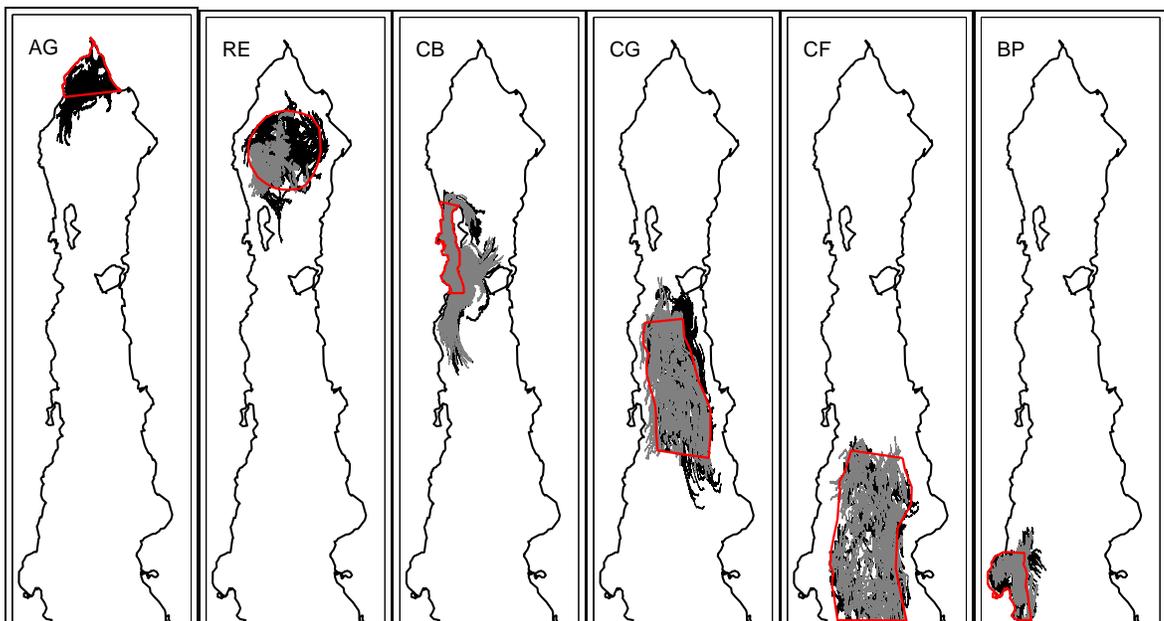


Figura 17. Trayectorias lagrangianas de algunas partículas liberadas en las diferentes provincias del GC durante un período de 28 días correspondientes al mes de mayo. Las trayectorias en negro corresponden a las capas superiores de la columna de agua (<100 m) y las grises a las capas inferiores (>100 m).

Los resultados indicaron que los remolinos son estructuras que atrapan o retienen partículas y consistente con lo reportado en varias regiones del mundo. En el sistema de la Corriente de California se encontró una asociación entre la abundancia de sardinas fuera de la costa y la presencia de un remolino de mesoescala (Logerwell y Smith, 2001). En el Canal de Santa Bárbara (USA), se reportaron altas concentraciones de larvas y peces juveniles en un remolino ciclónico (Nishimoto y Washburn, 2002). En la región situada entre las Islas Canarias y la costa de África, se observó que la distribución horizontal de huevos y larvas de peces fue dominada por remolinos y frentes (Rodríguez *et al.* 1999; Rodríguez *et al.*, 2004), interacciones similares entre remolinos y la distribución de zooplancton se presentaron en la costa norte de Noruega (Fossheim *et al.*, 2005). Por otra parte, las zonas de baja retención son asociadas a flujos intensos como la Corriente de Kuroshio que mostró alta dispersión de larvas de sardina sobre la costa de Japón (Heath *et al.*, 1998); un mecanismo similar se observó en la Corriente de Perú (Lett *et al.*, 2007). También los procesos de transporte de Ekman asociados a surgencia costera y filamentos son mecanismos de dispersión (Rodríguez *et al.*, 1999).

5. Conclusiones

Las estructuras (remolinos, flujos intensos o débiles) capturadas por el valor crítico del parámetro de Okubo-Weiss y la geometría del flujo fueron consistentes con lo reportado para el Golfo de California. Las estructuras tridimensionales definidas en cada provincia mostraron conectividad estacional, consistente con las características de la circulación del Golfo de California.

En general, las matrices de conectividad integradas en la vertical capturaron los patrones de atrapamiento y de transporte observados en las diferentes capas de cada provincia. El resultado sugiere la importancia de la componente barotrópica del flujo en la advección de partículas.

En la región norte la retención de partículas en la columna de agua fue baja en el período de circulación anticiclónica y alta en el período ciclónico, cuando el flujo superficial entre las islas Tiburón y Ángel de la Guarda es hacia el norte, lo que favorece el transporte de partículas y a su vez limita la incursión hacia el sur. En la región de las grandes islas, las retenciones fueron bajas (a excepción del Canal de Ballenas) debido al intenso intercambio entre las regiones norte y sur. En las regiones peninsular y central de la región sur las retenciones fueron altas, asociados a flujos débiles y presencia de remolinos, respectivamente. Sin embargo, la máxima retención y la baja dispersión de partículas en prácticamente todas las provincias se registraron en los meses de transición, cuando el campo de velocidad fue débil y menos organizado.

En términos generales, las provincias de alta retención sugieren áreas potenciales de concentración de materiales como huevos o larvas de peces e incluso son identificadas como regiones de desove o de reclutamiento de organismos como es el caso del Alto Golfo. Además la distribución de algunas larvas sugiere que los períodos de desove están acoplados con la circulación y con las características ambientales del golfo. Por ejemplo, se

ha reportado tres especies de larvas (*V. lucetia*, *D. laternatus* y *B. macrurus*) que se localizan exclusivamente en la región sur en invierno, cuando el transporte de partículas es limitada hacia la región norte, mientras que la presencia de otras especies (*G. crescentalis*, *E. crossotus*, *L. dalli*) son dominantes en la región norte durante el período ciclónico, cuando la retención es alta (>70 %) en toda la columna de agua.

Referencias bibliográficas

- Carrillo, L., Lavín, M. F. y Palacios Hernández, E. (2002). Seasonal evolution of the geostrophic circulation in the northern Gulf of California. *Estuarine, coastal and shelf Science*, 54:157-173.
- Figueroa, J. M., Marinone, S. G. y Lavín, M. F. (2003). A description of geostrophic gyres in the Southern Gulf of California. 237-255 pp. En: Velasco, O. U., Sheinbaum, J. y Ochoa, J. (eds). *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics*. Dordrecht. Kluwer.
- Fossheim, M., Zhou, M., Tande, K., Pedersen, O., Zhu, Y. y Edvardsen, A. (2005). Interactions between biological and environmental structures along the coast of northern Norway. *Marine Ecology Progress Series*, 300, 147-158.
- Gutiérrez, O. Q., Marinone, S. G. y Parés Sierra, A., (2004). Lagrangian surface circulation in the Gulf of California from a 3D numerical model. *Deep-Sea Research Part II*, 51 (6-9), 659-672.
- Heath, M., Zenitani, H., Watanabe, Y., Kimura, R. e Ishida, M. (1998). Modelling the dispersal of larval Japanese sardine, *Sardinops melanostictis*, by the Kuroshio Current in 1993 and 1994. *Fisheries Oceanography*, 7, 335-346.
- Isern Fontanet, J., Garcia Ladona, E. y Font, J. (2003). Identification of marine eddies from altimetric maps. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20, 772-778.
- Lett, C., Peven, P., Ayón, P. y Fréon P. (2007). Enrichment, concentration and retention processes in relation to anchovy (*Engraulis ringens*) eggs and larvae distribution in the northern Humboldt upwelling ecosystem. *Journal of Marine System*, 64, 189-200.
- Lavín, M. F., Durazo, R., Palacios, E., Argote, M. L. y Carrillo, L. (1997). Lagrangian observations of the circulation in the northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27, 2298-2305.
- Lavín, M.F. y Marinone, S. G. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. 173-204 pp. En: Velasco Fuentes, O. U., Sheinbaum, J. y Ochoa, J. (eds). *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics*. Dordrecht. Kluwer.
- Logerwell, E. A. y Smith, P.E. (2001). Mesoscale eddies and survival of late stage Pacific Sardine (*Sardinops sagax*) larvae. *Fisheries Oceanography*, 10(1), 13-25.

- López, M., Candela, J. y Argote, M. L. (2006). Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in the Gulf of California? *Geophysical Research Letters*, 33, L11603. doi:10.1029/2006GL025908.
- López, M., Candela, J. y García, J. (2008). Two overflows in the Northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 113. doi:10.1029/2007JC004575.
- Marinone, S. G. (2003). A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 108, 3325. doi:10.1029/2002JC001720.
- Marinone, S. G. y Lavín, M. F. (2005). Tidal current ellipses in a three-dimensional baroclinic numerical model of the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64, 519–530. doi:10.1016/j.ecss.2005.03.009.
- Marinone, S. G. (2006). A numerical simulation of the two-and three-dimensional Lagrangian circulation in the northern Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68, 93–100.
- Marinone, S. G. (2008). On the three-dimensional numerical modeling of the deep circulation around Ángel de la Guarda Island in the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 80, 430–434.
- Marinone, S. G., Ulloa, M. J., Parés Sierra, A., Lavín, M. F. y Cudney Bueno, R. (2008). Connectivity in the northern Gulf of California from particle tracking in a three-dimensional numerical model. *Journal of Marine Systems*, 71 (1-2), 149–158.
- Marinone, S. G., Lavín, M. F. y Parés Sierra, A. (2011). A quantitative characterization of the seasonal Lagrangian circulation of the Gulf of California from a three dimensional numerical model. *Continental Shelf Research*, 31, 1420-1426.
- Marinone, S. G. (2012). Seasonal surface connectivity in the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 100, 133-141.
- Mateos, E., Marinone, S. G. y Lavín, M. F. (2006). Role of tides and mixing in the formation o fan anticyclonic gyre in San Pedro Mártir Basin, Gulf of California. *Deep-Sea Research II* 53, 60-76.
- Nencioli, F., Dong, C., Dickey, T., Washburn, L. y McWilliamns, J. C. (2010). A Vector Geometry–Based Eddy Detection Algorithm and Its Application to a High-Resolution Numerical Model Product and High-Frequency Radar Surface Velocities in the Southern California Bight. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27, 564-579.

- Nishimoto, M. M. y Washburn, L. (2002). Patterns of coastal eddy circulation and abundance of pelagic juvenile fish in the Santa Barbara Channel, California, USA. *Marine Ecology Progress Series*, 241, 183-199.
- Okubo, A. (1970). Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences, *Deep-Sea Research*, 17, 445-454.
- Palacios Hernández, E., Beier, E., Lavín, M. F. y Ripa, P. (2002). The effect of the Seasonal Variation of Stratification on the Circulation of the Northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 32, 705-728.
- Peguero Icaza, M., Sánchez Velasco, L., Lavín, M. F. y Marinone, S. G. (2008). Larval fish assemblages, environment and circulation in a semienclosed sea (Gulf of California, México). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 79, 277-288.
- Peguero Icaza, M., Sánchez Velasco, L., Lavín, M. F., Marinone, S. G. y Beier, E. (2011). Seasonal changes in connectivity routes among larval fish assemblages in a semi-enclosed sea (Gulf of California). *Journal of Plankton Research*, 33(3), 517-533. doi:10.1093/plankt/fbq107.
- Proehl, J. A., Lynch, D. R., McGillicuddy, D. J. y Ledwell, J. R. (2005). Modeling turbulent dispersion on the North Flank of Georges Bank using Lagrangian particle methods. *Continental Shelf Research*, 25, 875-900.
- Rodríguez, J. M., Hernández León, S. y Barton, E. D. (1999). Mesoscale distribution of fish larvae in relation to an upwelling filament off Northwest Africa. *Deep Sea Research I*, 46, 1969-1984.
- Rodríguez, J. M., Barton, E. D., Hernández León, S. y Arístegui, J. 2004. The influence of mesoscale physical processes on the larval fish community in the Canaries CTZ, in summer. *Progress in Oceanography*, 62, 171-188.
- Sánchez Velasco, L., Lavín, M. F., Peguero Icaza, M., León Chávez, C. A., Contreras Catala, F., Marinone, S. G., Gutiérrez Palacios, I. V. y Godínez, V. M. (2009). Seasonal changes in larval fish assemblages in a semi-enclosed sea (Gulf of California). *Continental Shelf Research*, 29, 1697-1710.
- Velasco Fuentes, O. U. y Marinone, S. G. (1999). A numerical study of the Lagrangian circulation in the Gulf of California. *Journal of Marine Systems*, 22, 1-12.
- Visser, A. W. (1997). Using random walk models to simulate the vertical distribution of particles in a turbulent water column. *Marine Ecology Progress Series*, 158, 275-281.

- Weiss, J. (1991). The dynamics of enstrophy transfer in two dimensional hydrodynamics, *Physica D*, 48, 273–294.
- Zamudio, L., Hogan, P. y Metzger, E. J. (2008). Summer generation of the Southern Gulf of California eddy train. *Journal of Geophysical Research*, 113. doi:10.1029/2007JC004497.

Anexo A. Análisis de Funciones Empíricas Ortogonales por Descomposición en Valores Singulares de una matriz (SVD)

Para este análisis se construyó una matriz de datos \mathbf{X} (M por N) donde M contiene el número de puntos espaciales y N el número de mapas mensuales. El cálculo de los FEO se puede realizar construyendo la matriz de covarianza de la serie ($C = \frac{1}{N} \mathbf{X}\mathbf{X}^T$) y calcular los autovalores y autovectores. Sin embargo, el análisis SVD obtiene los autovectores, autovalores y componentes principales sin calcular la matriz de covarianza. La definición de SVD de una matriz es,

dada una matriz \mathbf{X} de M por N puede ser factorizada en,

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T,$$

donde U y V son ortogonales y $\mathbf{\Sigma}$ es una matriz diagonal. Los valores singulares r sobre la diagonal de $\mathbf{\Sigma}$ (M por N) son la raíz cuadrada de los autovalores diferentes de cero de $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ y $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$. La columna de la matriz U (M por M) son ortonormales e idénticos a los autovalores obtenidos a partir de la matriz de covarianza de la serie de datos ($\mathbf{X}\mathbf{X}^T$) y son modos espaciales asociados con cada valor singular. Las filas de la matriz \mathbf{V}^T son también ortonormales y son proporcionales a las componentes principales A cuyas constantes de proporcionalidad son los valores singulares,

$$A = \mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T$$

La matriz A contiene la evolución temporal de los modos (componente principal) de la matriz de datos \mathbf{X} . A partir de A se puede reconstruir el campo original mediante la sumatoria de los modos obtenidos,

$$X_m(t) = \sum_{k=1}^K U_m^k r_k V^{Tk}(t)$$

Anexo B: Campo de velocidades Eulerianas mensuales y anual con puntos fijos (elípticos e hiperbólicos) y contornos del valor crítico del parámetro de Okubo-Weiss.

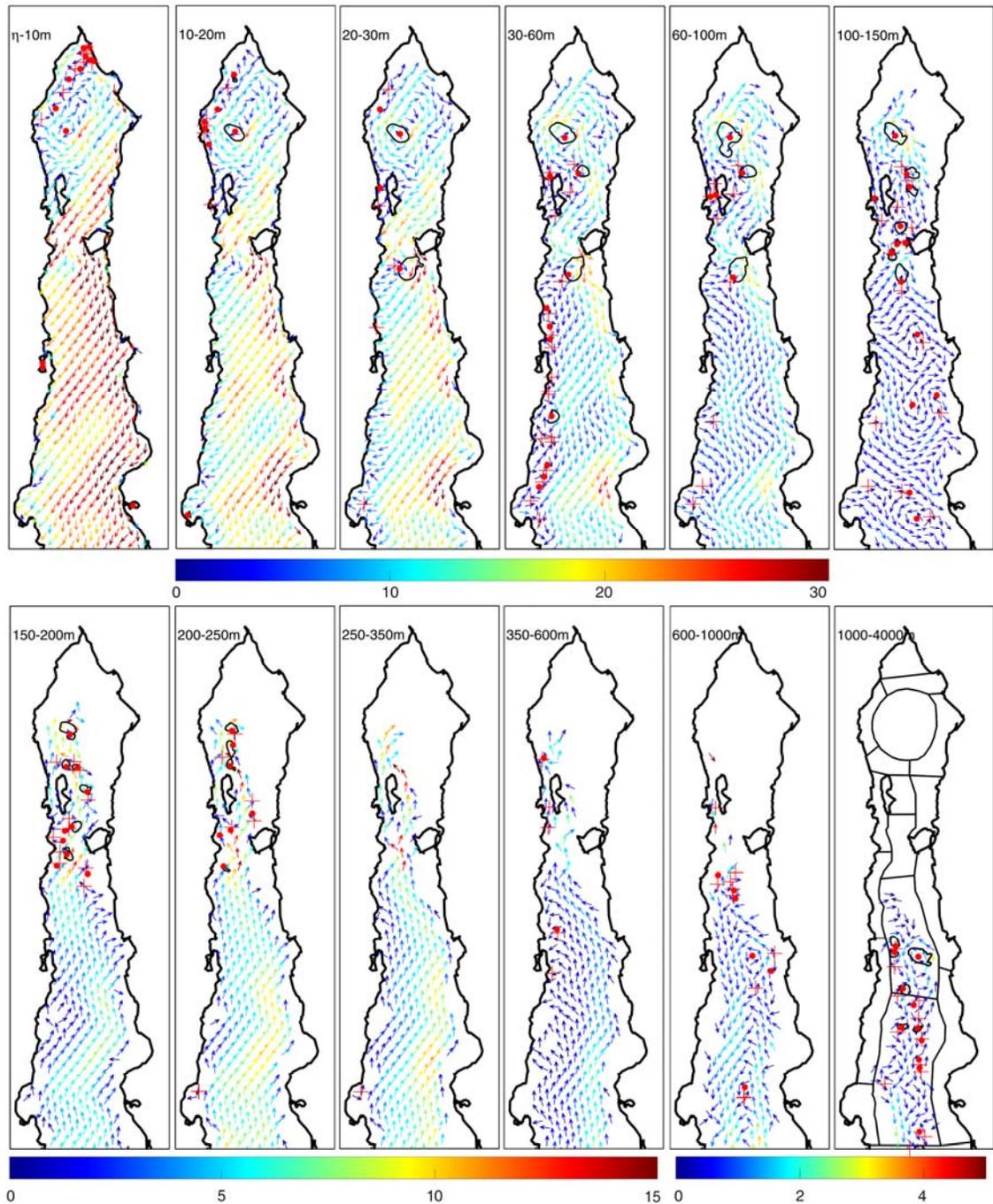


Figura B1. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para enero. Se grafica uno de cada 12 vectores y la magnitud (cm s^{-1}) se indica en la barra de colores para las diferentes capas.

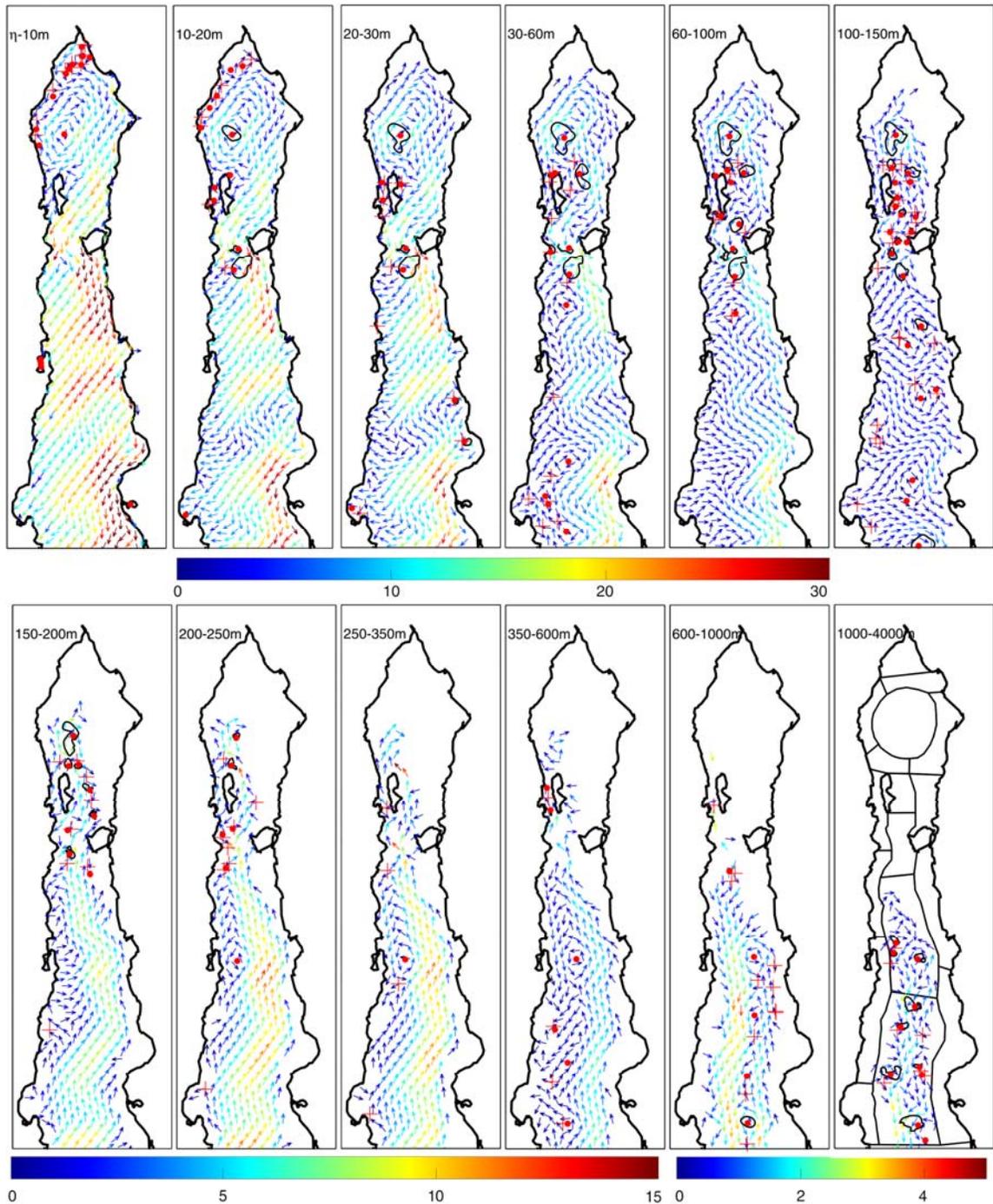


Figura B2. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para febrero. Se grafica uno de cada 12 vectores y la magnitud (cm s^{-1}) se indica en la barra de colores para las diferentes capas.

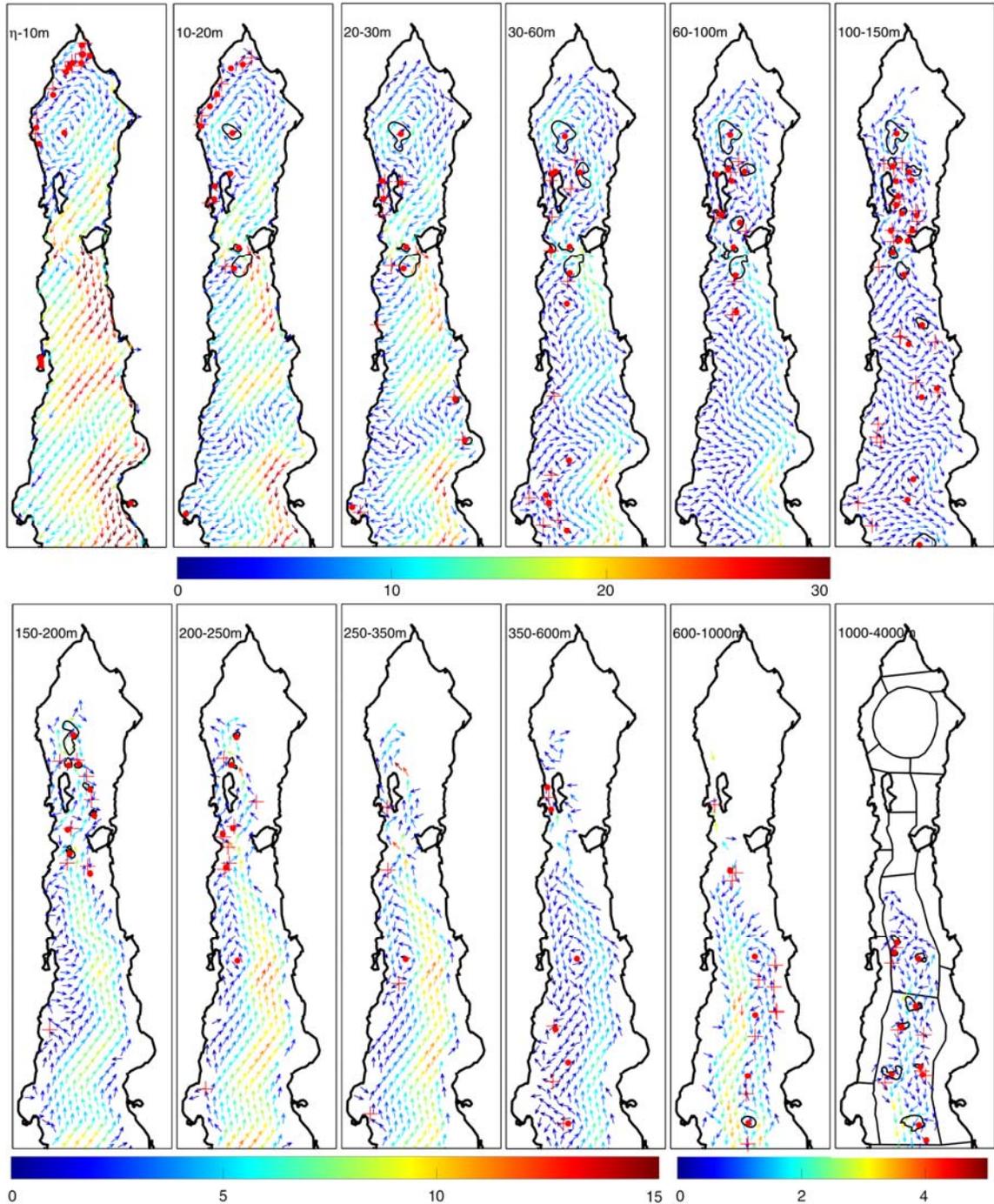


Figura B3. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para marzo. Se grafica uno de cada 12 vectores y la magnitud (cm s^{-1}) se indica en la barra de colores para las diferentes capas.

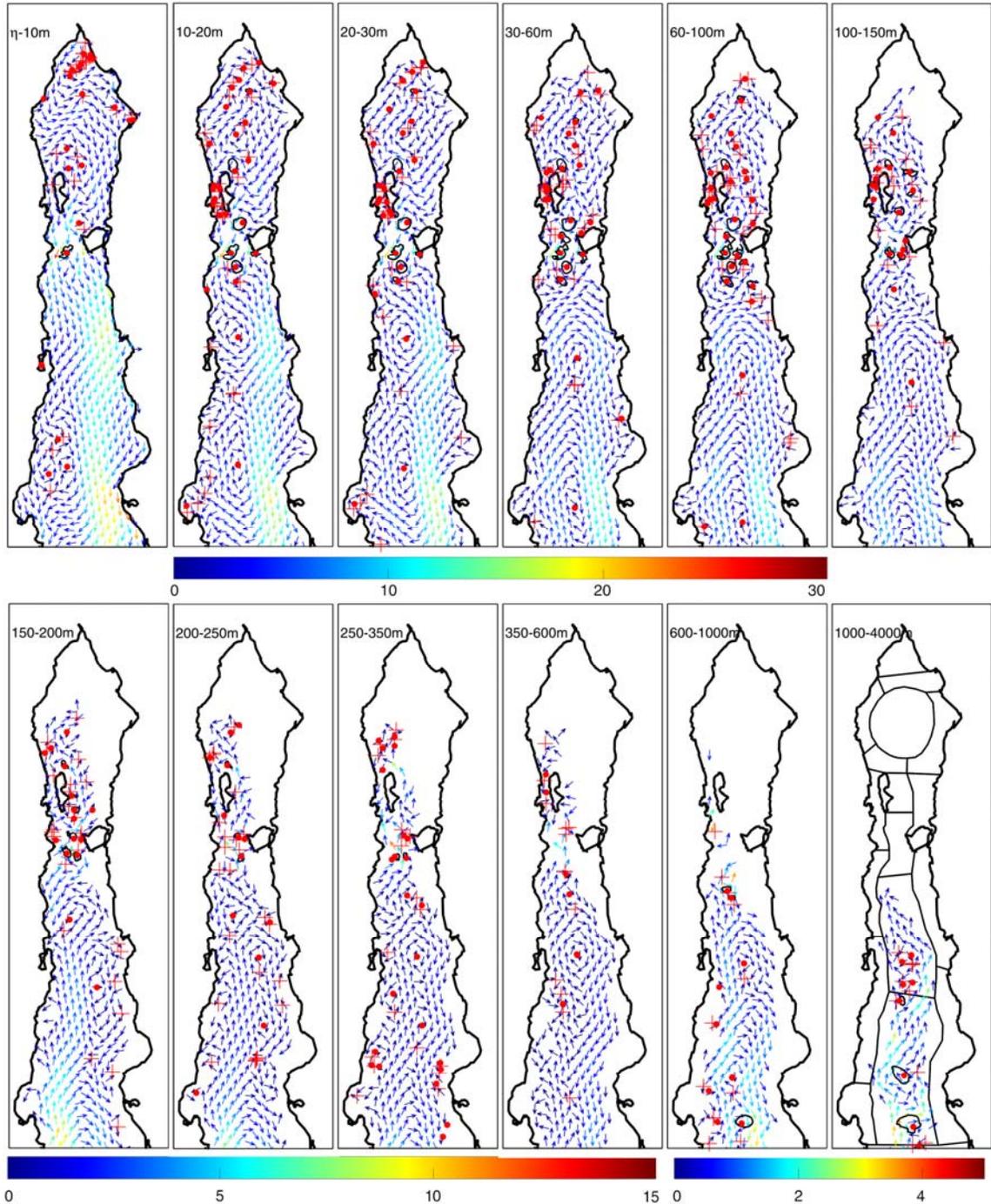


Figura B4. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para abril. Se grafica uno de cada 12 vectores y la magnitud (cm s^{-1}) se indica en la barra de colores para las diferentes capas.

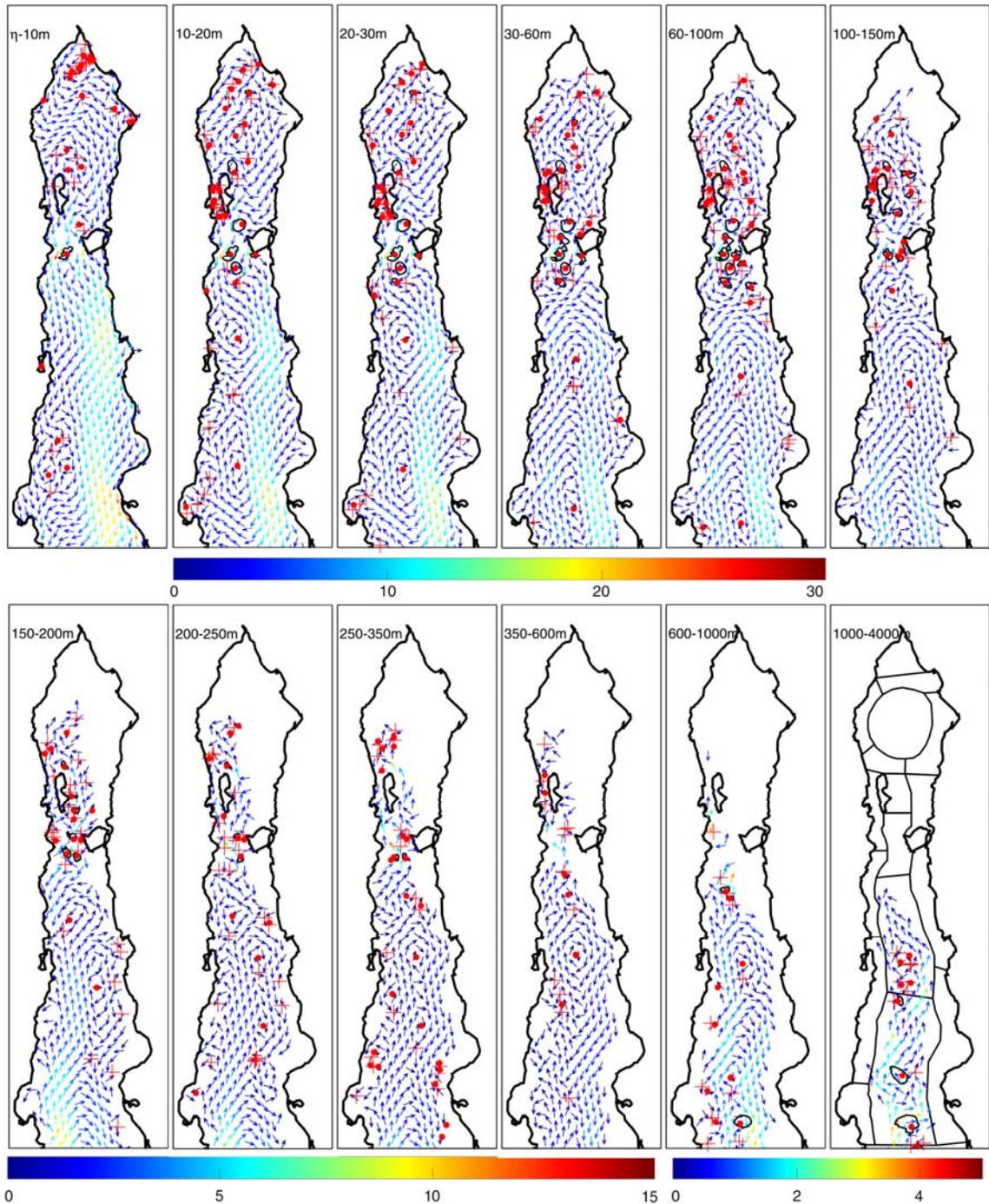


Figura B5. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para mayo. Se grafica uno de cada 12 vectores y la magnitud (cm s^{-1}) se indica en la barra de colores para las diferentes capas.

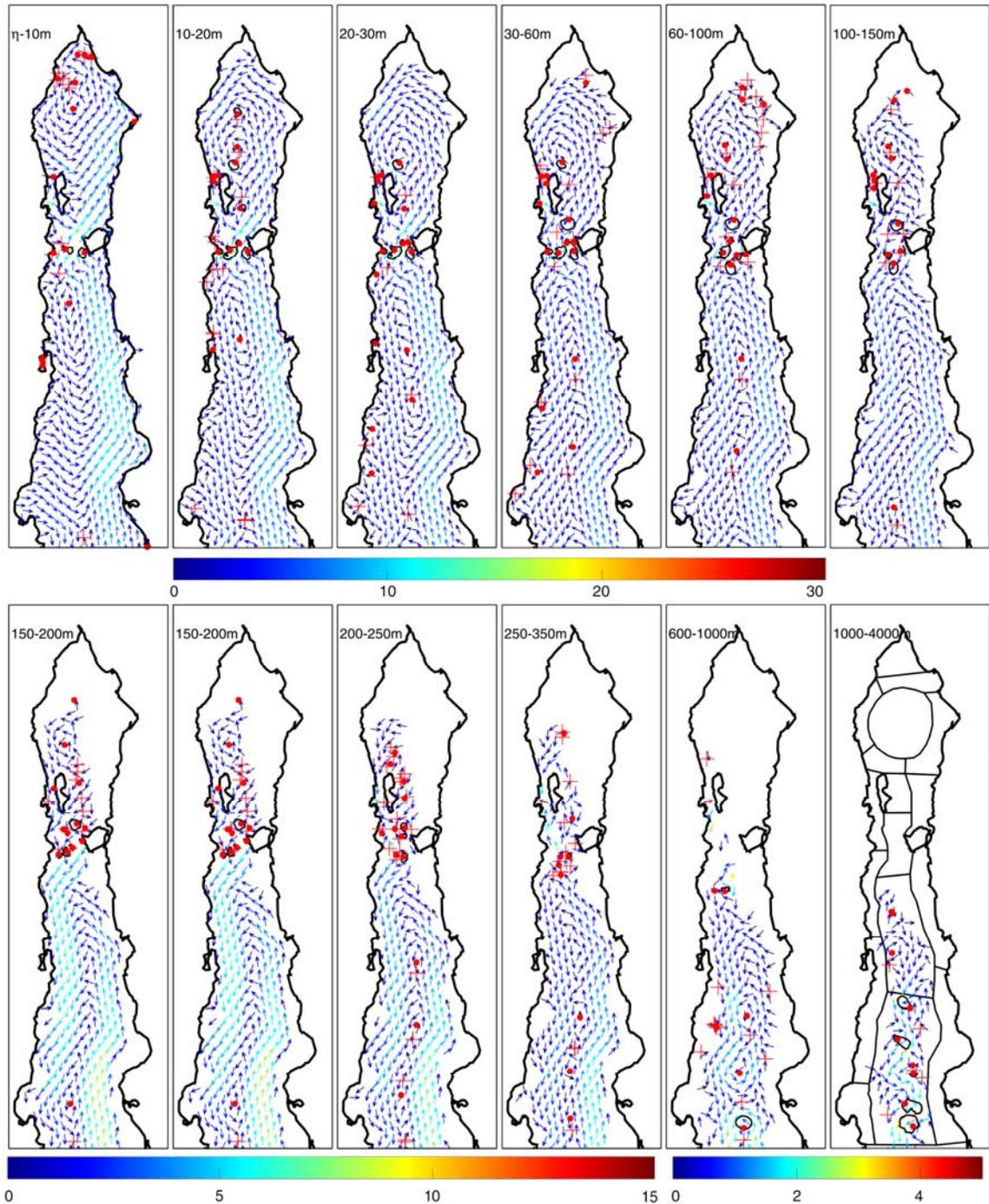


Figura B6. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para junio. Se grafica uno de cada 12 vectores y la magnitud (cm s^{-1}) se indica en la barra de colores para las diferentes capas.

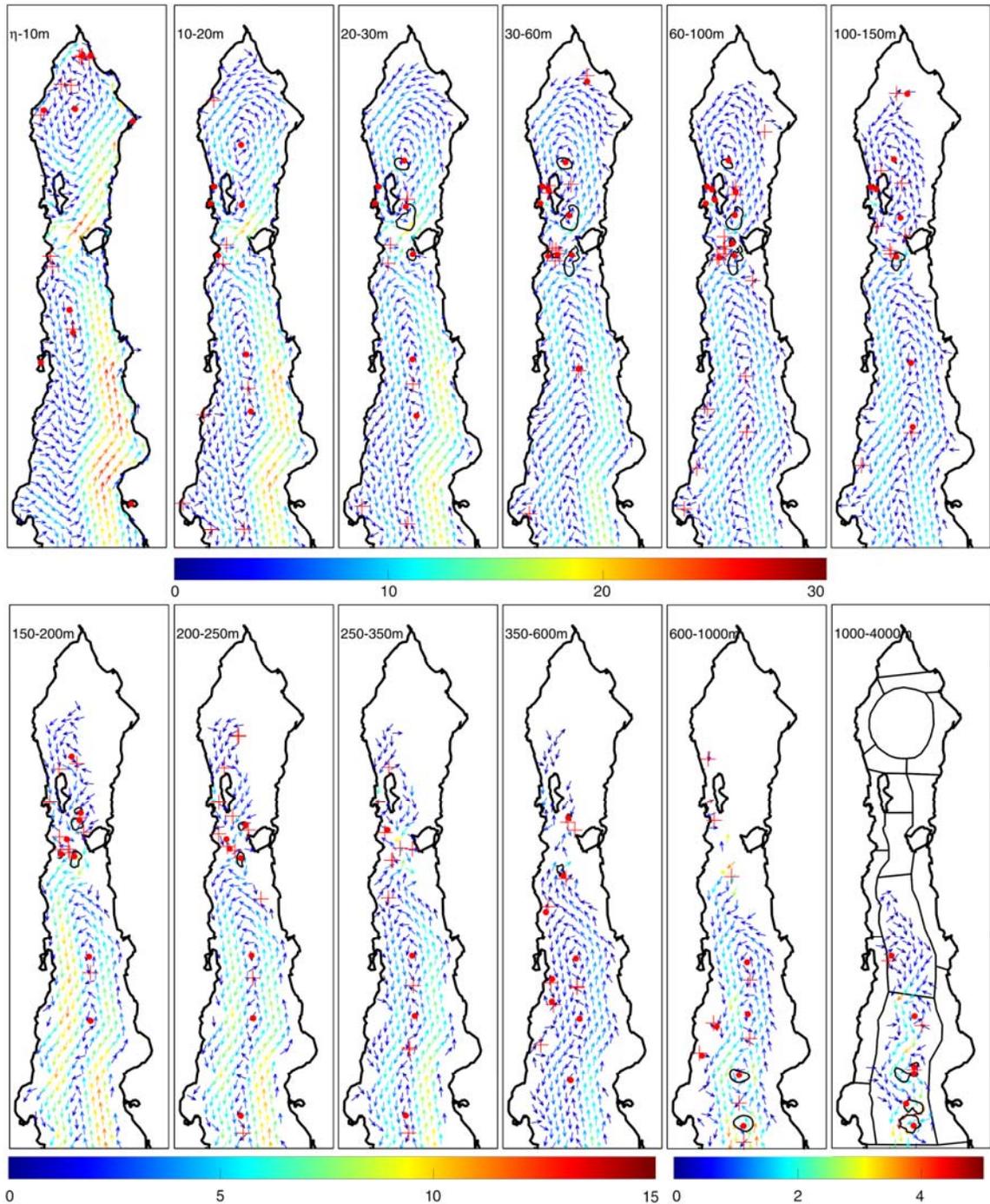


Figura B7. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para julio. Se grafica uno de cada 12 vectores y la magnitud (cm s^{-1}) se indica en la barra de colores para las diferentes capas.

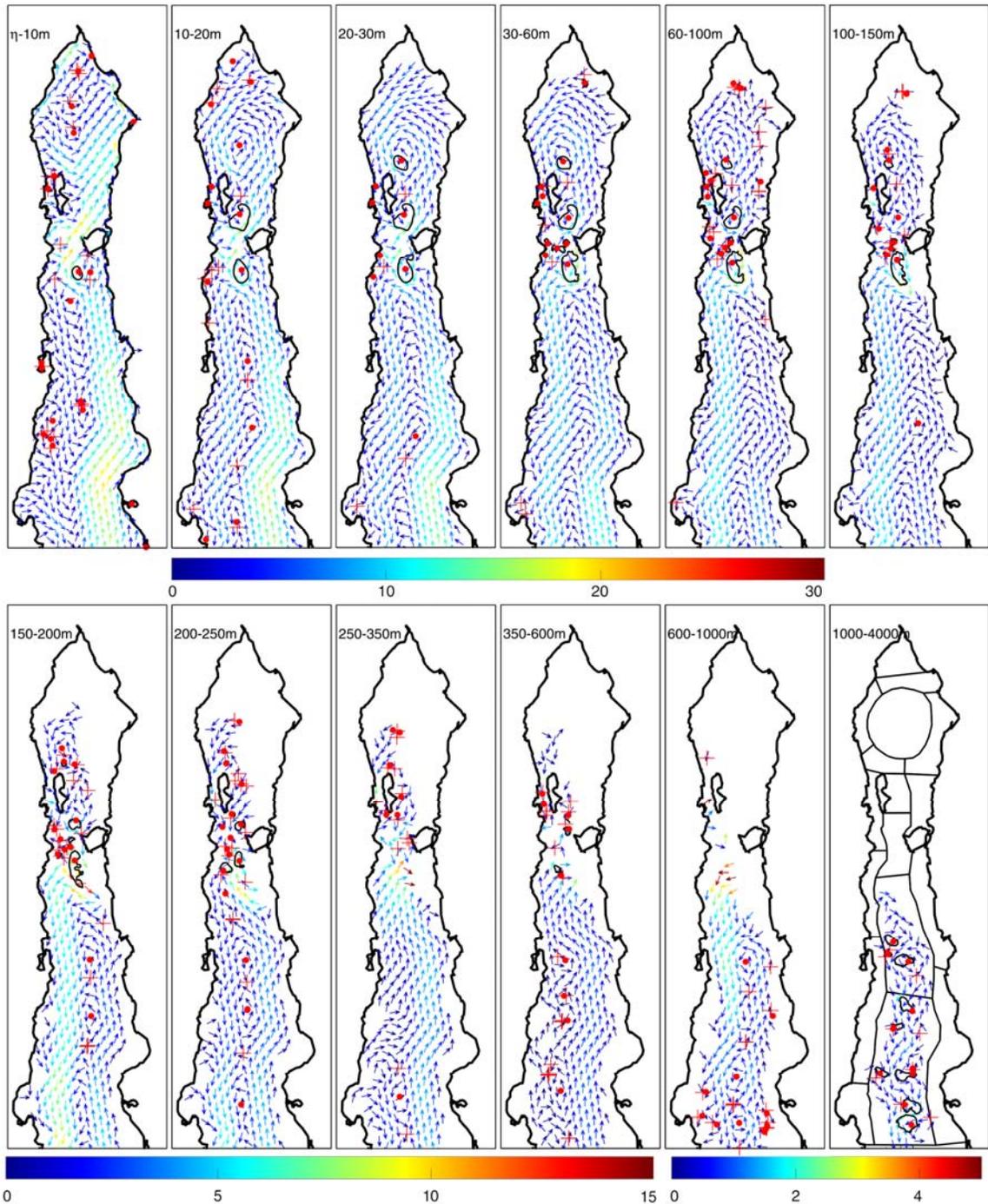


Figura B8. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para agosto. Se grafica uno de cada 12 vectores y la magnitud (cm s^{-1}) se indica en la barra de colores para las diferentes capas.

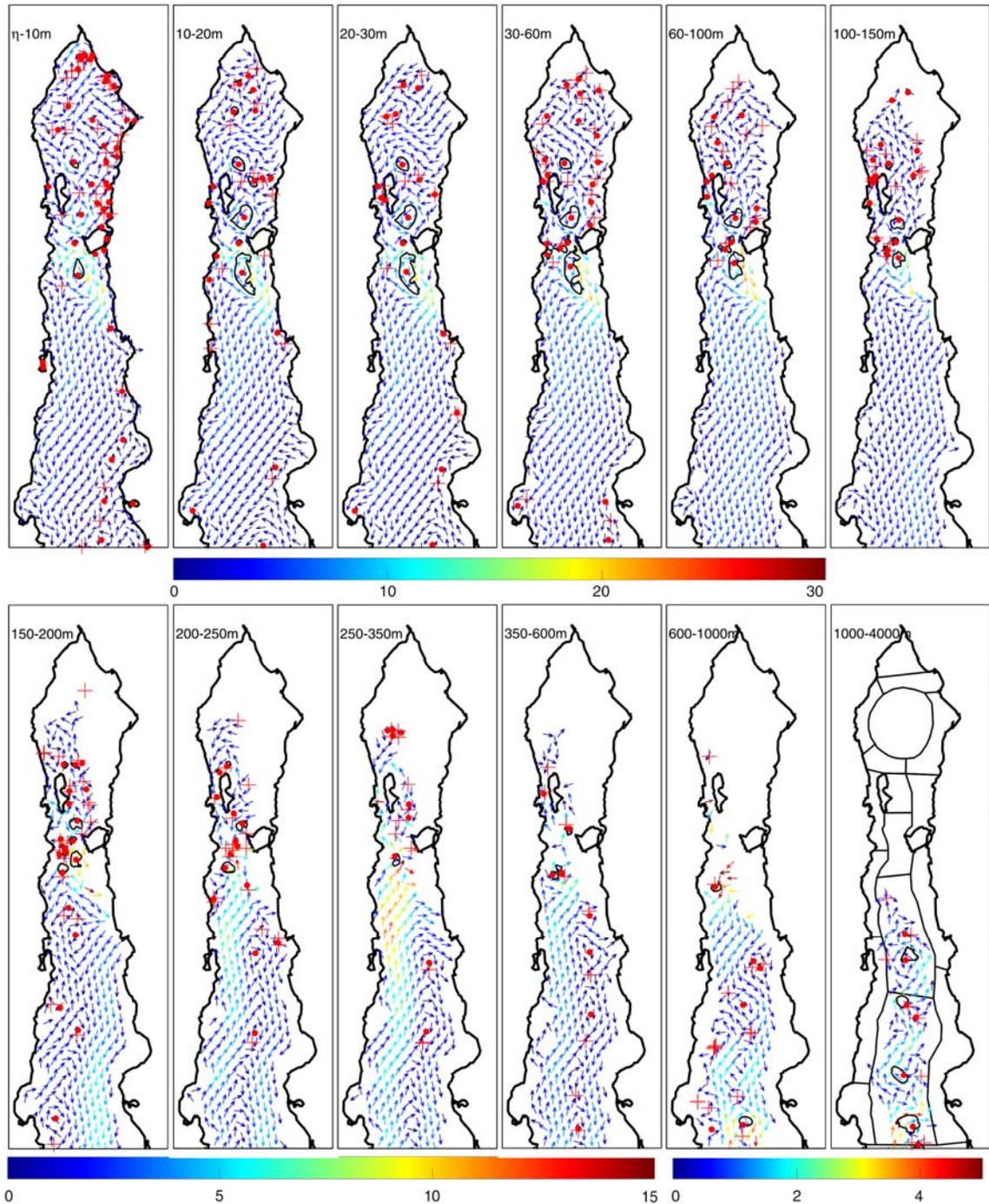


Figura B9. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para septiembre. Se grafica uno de cada 12 vectores y la magnitud (cm s^{-1}) se indica en la barra de colores para las diferentes capas.

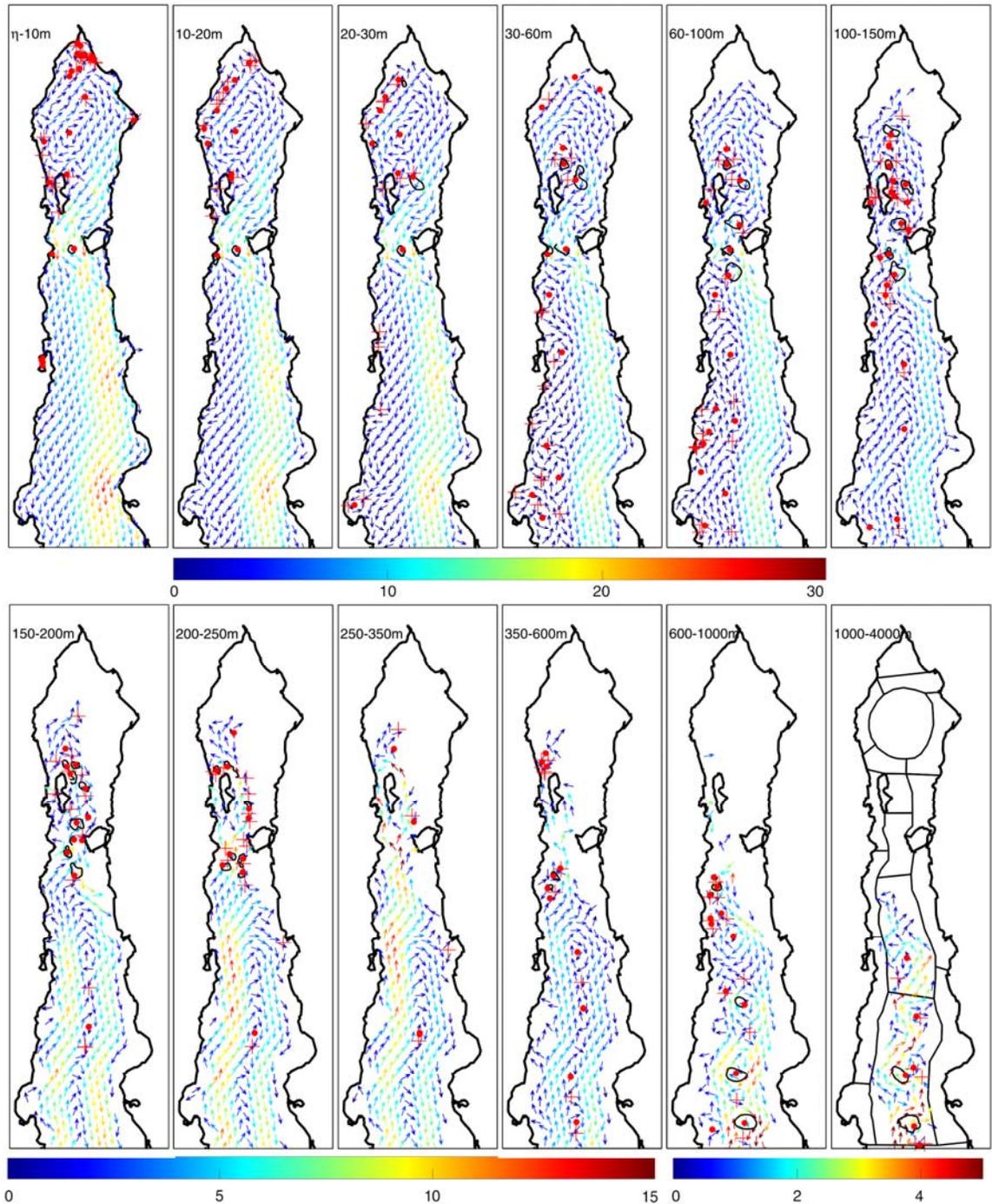


Figura B10. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para octubre. Se grafica uno de cada 12 vectores y la magnitud (cm s^{-1}) se indica en la barra de colores para las diferentes capas.

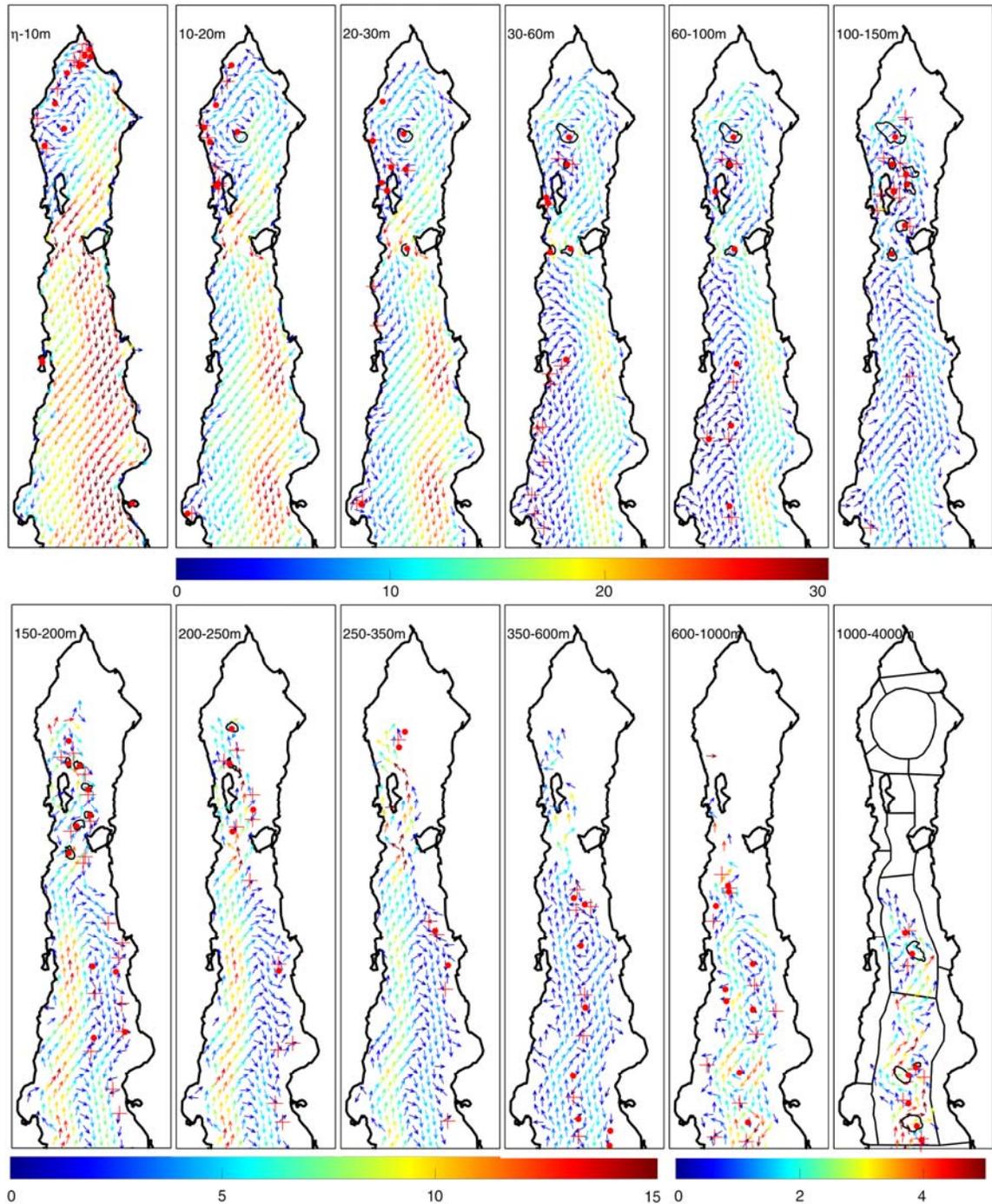


Figura B11. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para noviembre. Se grafica uno de cada 12 vectores y la magnitud (cm s^{-1}) se indica en la barra de colores para las diferentes capas.

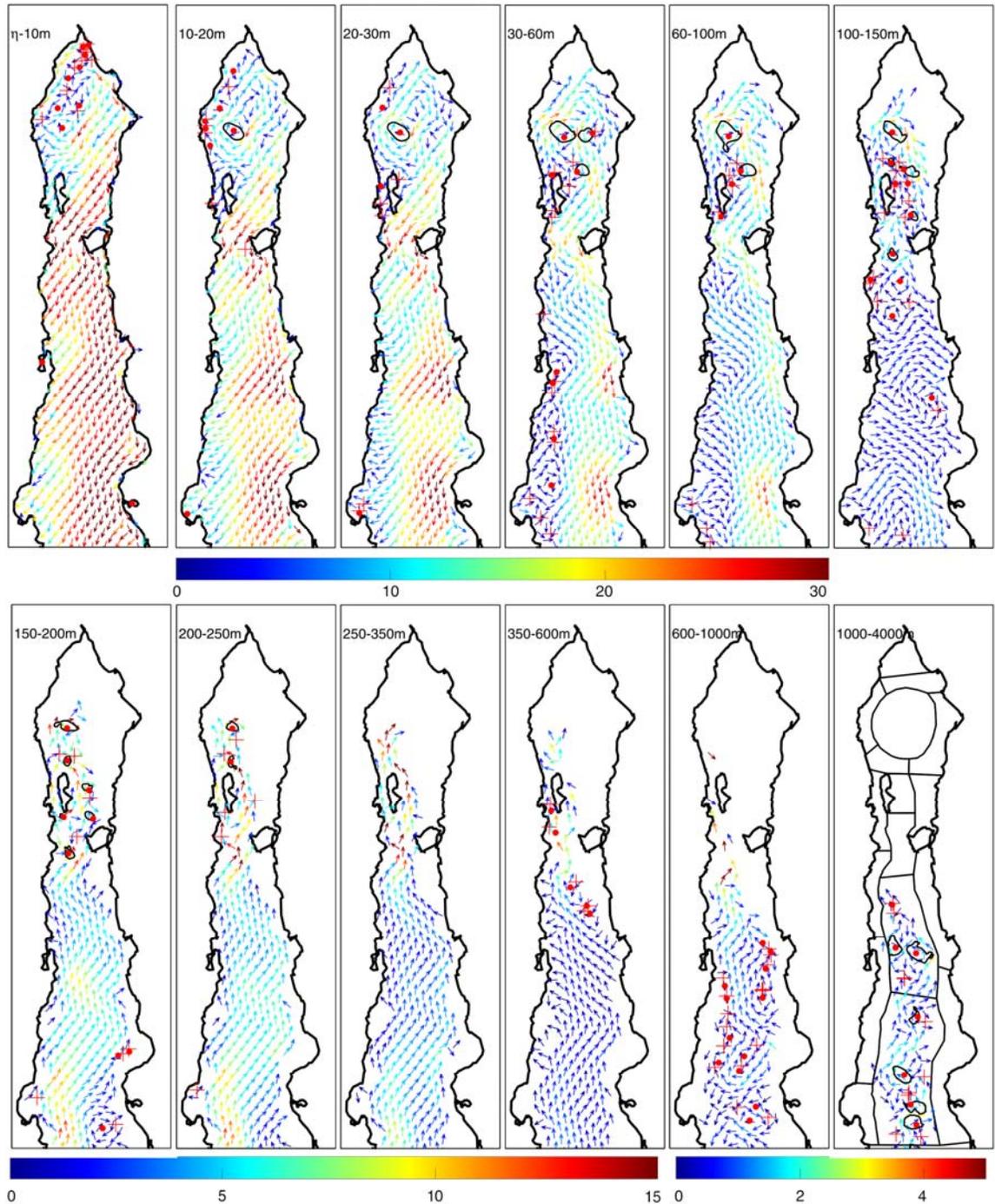


Figura B12. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidad, que corresponden a las 12 capas del modelo para diciembre. Se grafica uno de cada 12 vectores y la magnitud (cm s^{-1}) se indica en la barra de colores para las diferentes capas.

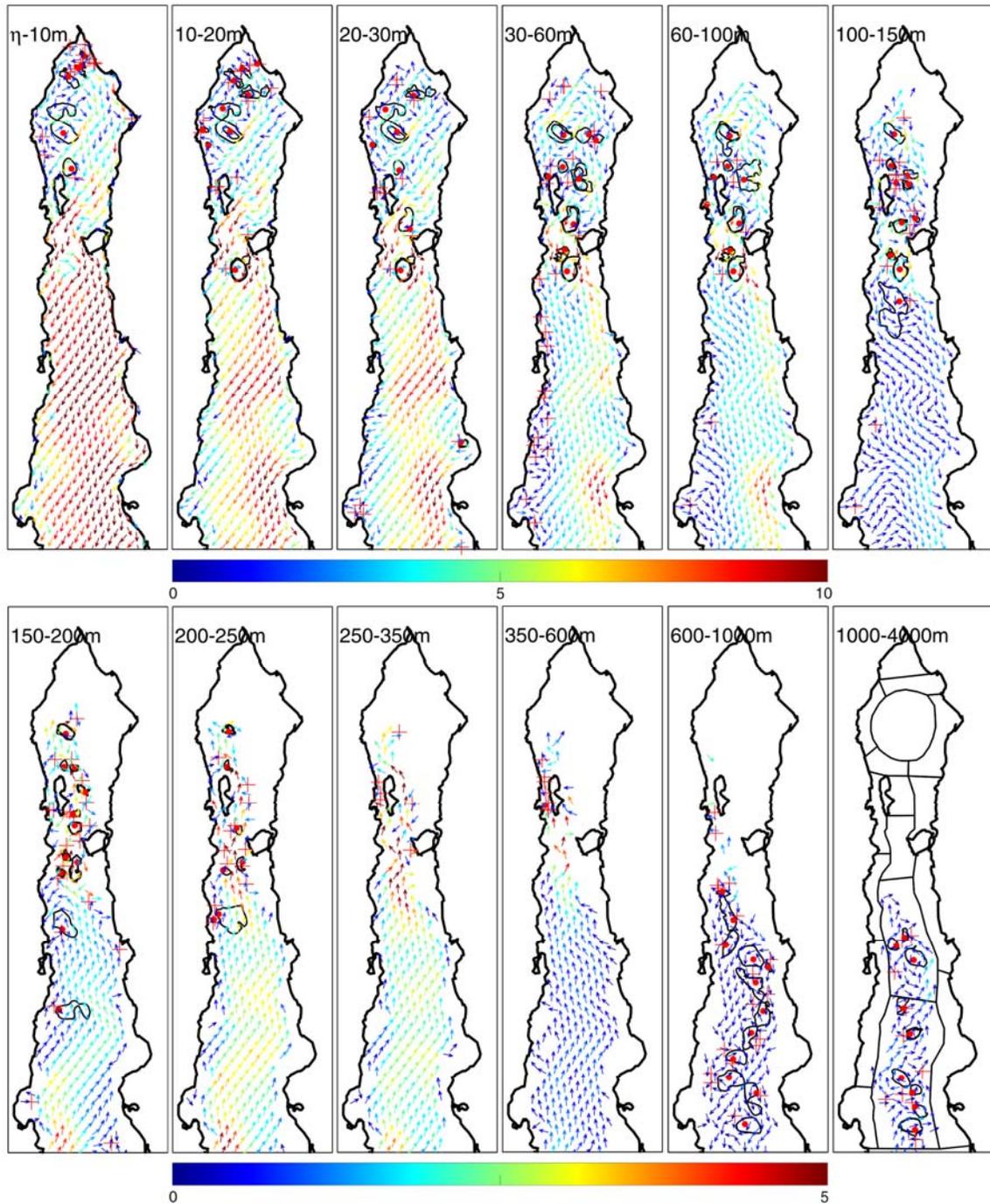


Figura B13. Puntos de estancamiento: elípticos (puntos rojos), hiperbólicos (cruces rojas) y contornos de Q_c asociados a puntos elípticos del campo de velocidades, que corresponden a las 12 capas del modelo para el promedio anual. Se grafica uno de cada 12 vectores y la magnitud (cm s^{-1}) se indica en la barra de colores para las diferentes capas.