

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN
SUPERIOR DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

**Características lagrangianas y conectividad en el Pacífico
Oriental Mexicano**

Tesis

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

Presenta:

Héctor Alejandro Inda Díaz

Ensenada, Baja California, México

2015

Tesis defendida por

Héctor Alejandro Inda Díaz

y aprobada por el siguiente comité

Dr. Alejandro Francisco Parés Sierra
Director del Comité

Dr. Julio Sheinbaum Pardo
Miembro del Comité

Dr. Bertha Eugenia Lavaniegos Espejo
Miembro del Comité

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
*Coordinador del Programa de
Posgrado en Oceanografía Física*

Dr. Jesús Favela Vara
Director de Estudios de Posgrado

Mayo, 2015

Resumen en español

Resumen de la tesis que presenta Héctor Alejandro Inda Díaz como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

Características lagrangianas y conectividad en el Pacífico Oriental Mexicano

Resumen elaborado por:

Héctor Alejandro Inda Díaz

Los ecosistemas de frontera oriental de los océanos son las regiones más productivas del mundo y sustentan un gran porcentaje de las pesquerías mundiales. Entender y describir la conectividad o intercambio entre diferentes zonas del océano es de gran importancia para el estudio de la dispersión de larvas y otros trazadores en el mar, como contaminantes. El objetivo de este trabajo es identificar las diferentes zonas del Pacífico Oriental Mexicano de acuerdo a su capacidad de retener partículas, y describir cómo se conectan a través de matrices de conectividad, transporte lagrangiano neto y la distancia recorrida a lo largo de la costa. Para ello utilizamos un modelo “offline” para calcular las trayectorias lagrangianas de partículas a partir de campos de velocidad previamente calculados con el modelo ROMS (Regional Ocean Modeling System) en el periodo de 1980-2006. Se identificaron tres zonas de alta retención de partículas en todas las épocas del año: Bahía Vizcaíno, al sur de Punta Concepción y el Golfo de Ulloa; y dos zonas de retención relativamente alta en invierno: frente a la costa de Nayarit y el Golfo de Tehuantepec. La conectividad en la península de Baja California tiene una clara dirección preferencial de norte a sur en invierno y primavera, influenciada principalmente por la manifestación superficial de la Corriente de California, mientras que en verano y otoño no existe una dirección preferencial de conectividad. En la región sur de México domina el transporte paralelo a la costa hacia el sur inducido por el “Domo de Tehuantepec”, con un debilitamiento en otoño e invierno, causando un aislamiento de la costa de Oaxaca y el Golfo de Tehuantepec respecto a las zonas más al norte de la costa de México. Se encontró una clara desconexión entre las zonas de Baja California y las zonas de Cabo Corrientes y más al sur, debida principalmente a una desorganización en el transporte lagrangiano en la zona frente a la boca del Golfo de California que actúa como barrera entre las regiones norte y sur de México. Los resultados muestran una variación interanual importante en los patrones de conectividad y dispersión lagrangiana asociada principalmente al fenómeno de El Niño, principalmente en verano y otoño; la dirección preferencial de la conectividad se invierte y conecta regiones normalmente aisladas, como el Golfo de Tehuantepec y Bahía Vizcaíno, con regiones más al norte. Nuestros resultados muestran que el grado de conectividad y la distancia a lo largo de la costa que recorren las partículas no aumenta significativamente para simulaciones mayores a 3 meses. Aunque este estudio es una primera aproximación al estudio de la conectividad en el Pacífico Oriental Mexicano y mucho trabajo queda por hacer, nuestros resultados podrían servir como una base para el estudio de la conectividad potencial de poblaciones marinas, o la dispersión de sustancias invasivas o contaminantes en la costa de México.

Palabras Clave: **Conectividad, trayectorias lagrangianas, retención, transporte, variación estacional, variación interanual y “El Niño”.**

Resumen en inglés

Abstract of the thesis presented by Héctor Alejandro Inda Díaz as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Master in Sciences in Physical Oceanography.

Lagrangian characteristics and connectivity in the Mexican Oriental Pacific

Abstract by:

Héctor Alejandro Inda Díaz

Eastern boundary ecosystems are the most productive regions in the world and they sustain a large percentage of world fisheries. Understanding and describing the connectivity and exchange between different regions of the ocean for larvae dispersion studies and other tracers like pollutants is very important. The aim of this work is to identify the different zones in the Mexican Pacific Ocean according to their capacity for retention or particles, and to describe how these zones are connected using connectivity matrixes, lagrangian net transport and the alongshore trajectory length. In this work we use an “offline” model to simulate Lagrangian particle trajectories in the Eastern Mexican Pacific (between 120-94 W and 12-34N). Particles are advected using velocity fields generated with the ROMS model (Regional Ocean Modeling System) in the period 1980-2006. We identified three zones of high retention of particles for all year: south of Point Conception, Vizcaino Bay and the Gulf of Ulloa; and two zones of relatively high retention in winter: the zone in front of Nayarit’s coast and the Gulf of Tehuantepec. Connectivity on the Peninsula of California has a clear equatorward preference during winter and spring due to intensification and organization of the California Current. In summer and fall there is not a dominant direction in the connectivity along the Peninsula. In the south region of Mexico, there is a dominant equatorward transport parallel to the coast due the anticyclonic circulation of the “Tehuantepec’s Bowl”. In fall and winter this circulation weakens producing an isolation of Oaxaca’s coast and Gulf of Tehuantepec from the northermost regions of Mexico. It is clear that there isn’t a connection between the zones of Baja California and the Cabo Corrientes zone and further south due to the transition zone in front of the entrance of the Gulf of California, where a clear transport pattern is absent; acting as a barrier between north and south regions of Mexico. It has been shown that there is interannual variability in the connectivity and dispersion patterns associated with “El niño” phenomenon. In summer and fall the dominant direction in connectivity is from south to north, reversed respect to the mean direction, thus connecting regions usually isolated –like Vizcaíno Bay and Gulf of Tehuantepec– with northermost regions of the coast of Mexico. Our results show that the degree of connectivity between different zones and the alongshore trajectory length does not increase significantly for simulations over 3 months. Although this is a first approach to the study of connectivity along the mexican coast, these results can provide a useful guide to potential connectivity of marine populations of Mexico, or the spread of invasive substances or pollutants.

Keywords: **Connectivity, lagrangian trajectories, retention, transport, seasonal variability, interannual variability and “El Niño”.**

Dedicatoria

A mis padres, Ana Luz y Emilio. No tengo como agradecer todo su apoyo. Les dedico esta tesis a ustedes, que con su ejemplo de incansable superación me han motivado a seguir preparándome.

A Rocío, Emilio, Juan e Iván, todas sus palabras de apoyo y ánimos me han ayudado poder terminar esta tesis. Los quiero.

A toda mi familia, que aunque estemos lejos siempre llevo en el corazón.

Agradecimientos

Agradezco enormemente a mi asesor, Alejandro Parés Sierra, por todos sus consejos, pláticas, apoyo y enseñanzas. Con él he aprendido muchísimas cosas que no hubiera podido aprender con nadie más.

Agradezco a mi comité de tesis: Julio Sheinbaum y Bertha Lavaniegos. Sus comentarios y sugerencias durante todo este proceso han enriquecido mi trabajo. Agradezco también sus rápidas correcciones, gracias por su apoyo.

Extiendo mi agradecimiento a todos mis profesores del departamento de Oceanografía Física de CICESE, de quienes he aprendido muchísimo, y quienes siempre han estado dispuestos a apoyarme en todas las formas que les ha sido posible. Su apoyo y orientación han sido claves en esta etapa de mi formación.

Un agradecimiento especial para Alina Morales y Lupita Pacheco. Su apoyo desde mi primer día hasta hoy, ha facilitado mi estancia en el departamento. ¡Muchas gracias!

Agradezco a todos mis compañeros y amigos en el departamento de Oceanografía Física. Ixe, Caro, Lena, Rosmery, Nathalí, Ivonne, Javi, Joseph, Ramsés, Tenoch, Rodney, Leo, Froy, Mauro, Chava, René, Lucía R., Lucía G., Esther, Maribel, Felipe, Ana Laura, Enric, Marco. Esta etapa de mi vida en Ensenada nunca hubiera sido lo mismo sin ustedes.

Agradezco a CONACyT por la beca otorgada para mi maestría. También agradezco al Departamento de Oceanografía Física de CICESE por la beca otorgada para concluir este trabajo.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Tabla de contenido	vi
Lista de figuras	vii
1. Introducción	1
1.1. Circulación de la zona de estudio	2
1.2. Objetivos	7
2. Metodología	8
2.1. Descripción del modelo de circulación	8
2.2. Modelo de advección, Trayectorias lagrangianas	9
2.3. Desplazamiento promedio	11
2.4. Matrices de conectividad	12
3. Resultados y discusión	16
3.1. Desplazamiento promedio de partículas	16
3.1.1. Región norte	16
3.1.2. Región sur	19
3.2. Conectividad promedio	23
3.2.1. Transporte Norte-Sur	26
3.3. Distancia a lo largo de la costa (Escala espacial de conectividad)	27
3.3.1. Baja California	28
3.3.2. Región Sur	30
3.4. Capacidad de retención	33
3.5. Varación Interanual	34
3.6. Relación con la circulación	38
4. Conclusiones	43
Lista de referencias	46
A. Modelo lagrangiano	50
B. Matrices de conectividad promedio	54

Lista de figuras

Figura	Página
1. Zona de estudio, Pacífico Oriental Mexicano.	3
2. Esquema de circulación del Pacífico Oriental propuesto por Kessler (2006).	4
3. Esquema de circulación de la rama sur de la zona de la Corriente de California, inferido de datos de satélite por Strub y James (2000).	6
4. Malla utilizada para el modelo ROMS.	9
5. Trayectorias de partículas lanzadas en el cuadro negro para 100 experimentos diferentes, en colores los diferentes experimentos.	10
6. Esquema gráfico del desplazamiento promedio.	11
7. (a) Definición de zonas en el Pacífico Mexicano para construir las matrices de conectividad. (b) Estructura de las matrices de conectividad, las líneas gruesas definen los cuadrantes que dividen las tres grandes regiones: Región Sur, Baja California y Golfo de California.	12
8. Integración del transporte norte-sur de las matrices de conectividad. En azul(rojo) se representa la parte baja(alta) de la matriz de conectividad representando el transporte al sur(norte). En negro las partículas sobre la diagonal representando la retención.	14
9. Desplazamiento promedio en invierno para la zona norte. El color representa la distancia recorrida en la dirección de la flecha para 1 mes de integración.	17
10. Desplazamiento promedio en primavera para la zona norte. El color representa la distancia recorrida en la dirección de la flecha para 1 mes de integración.	18
11. Desplazamiento promedio en verano para la zona norte. El color representa la distancia recorrida en la dirección de la flecha para 1 mes de integración.	18
12. Desplazamiento promedio en otoño para la zona norte. El color representa la distancia recorrida en la dirección de la flecha para 1 mes de integración.	19
13. Desplazamiento promedio en invierno para la zona sur. El color representa la distancia recorrida en la dirección de la flecha para 1 mes de integración.	21
14. Desplazamiento promedio en primavera para la zona sur. El color representa la distancia recorrida en la dirección de la flecha para 1 mes de integración.	21
15. Desplazamiento promedio en verano para la zona sur. El color representa la distancia recorrida en la dirección de la flecha para 1 mes de integración.	22
16. Desplazamiento promedio en otoño para la zona sur. El color representa la distancia recorrida en la dirección de la flecha para 1 mes de integración.	22

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
17. Matriz de conectividad promedio en invierno para partículas integradas por 3 meses.	23
18. Matriz de conectividad promedio en primavera para partículas integradas por 3 meses.	24
19. Matriz de conectividad promedio en verano para partículas integradas por 3 meses.	25
20. Matriz de conectividad promedio en otoño para partículas integradas por 3 meses.	25
21. Porcentaje de partículas al norte en rojo y al sur en azul, al cabo de tres meses de integración para la región de Baja California (izquierda) y de dos meses para la región Sur (derecha). En negro la retención total en toda la región. El eje horizontal representa el mes de liberación de las partículas. .	27
22. Distancia promedio recorrida por las partículas liberadas en invierno en puntos representativos de la región de Baja California, para 1, 2 y 3 meses de integración (de izquierda a derecha) y de norte a sur (arriba hacia abajo). Las distancias se agruparon en segmentos de 50 km, el cero representa el lugar de lanzamiento. Distancias positivas (negativas) representan transporte hacia polo (ecuador).	28
23. Distancia promedio recorrida por las partículas liberadas en primavera en puntos representativos de la región de Baja California, para 1, 2 y 3 meses de integración (de izquierda a derecha) y de norte a sur (arriba hacia abajo). Las distancias se agruparon en segmentos de 50 km, el cero representa el lugar de lanzamiento. Distancias positivas (negativas) representan transporte hacia polo (ecuador).	29
24. Distancia promedio recorrida por las partículas liberadas en verano en puntos representativos de la región de Baja California, para 1, 2 y 3 meses de integración (de izquierda a derecha) y de norte a sur (arriba hacia abajo). Las distancias se agruparon en segmentos de 50 km, el cero representa el lugar de lanzamiento. Distancias positivas (negativas) representan transporte hacia polo (ecuador).	29
25. Distancia promedio recorrida por las partículas liberadas en otoño en puntos representativos de la región de Baja California, para 1, 2 y 3 meses de integración (de izquierda a derecha) y de norte a sur (arriba hacia abajo). Las distancias se agruparon en segmentos de 50 km, el cero representa el lugar de lanzamiento. Distancias positivas (negativas) representan transporte hacia polo (ecuador).	30

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
26. Distancia promedio recorrida por las partículas liberadas en invierno en diferentes zonas de la región Sur, para 1, 2 y 3 meses de integración (de izquierda a derecha) y de norte a sur (arriba hacia abajo). Las distancias se agruparon en segmentos de 50 km, el cero representa el lugar de lanzamiento. Distancias positivas (negativas) representan transporte hacia polo (ecuador).	31
27. Distancia promedio recorrida por las partículas liberadas en primavera en diferentes zonas de la región Sur, para 1, 2 y 3 meses de integración (de izquierda a derecha) y de norte a sur (arriba hacia abajo). Las distancias se agruparon en segmentos de 50 km, el cero representa el lugar de lanzamiento. Distancias positivas (negativas) representan transporte hacia polo (ecuador).	31
28. Distancia promedio recorrida por las partículas liberadas en verano en diferentes zonas de la región Sur, para 1, 2 y 3 meses de integración (de izquierda a derecha) y de norte a sur (arriba hacia abajo). Las distancias se agruparon en segmentos de 50 km, el cero representa el lugar de lanzamiento. Distancias positivas (negativas) representan transporte hacia polo (ecuador).	32
29. Distancia promedio recorrida por las partículas liberadas en otoño en diferentes zonas de la región Sur, para 1, 2 y 3 meses de integración (de izquierda a derecha) y de norte a sur (arriba hacia abajo). Las distancias se agruparon en segmentos de 50 km, el cero representa el lugar de lanzamiento. Distancias positivas (negativas) representan transporte hacia polo (ecuador).	32
30. Porcentaje de retención estacional al cabo de tres meses de integración.	33
31. Trayectorias de partículas en verano liberadas en Golfo de Tehuantepec (panel inferior) y Bahía de Banderas (panel superior). El color representa tiempo desde su liberación. Se grafican tres años neutrales (1982, 1985 y 2004) y dos años Niño (2002 y 1997). Notar como el patrón general de dispersión de los dos últimos años (1997 y 2002) es cualitativamente diferente a los otros tres años.	34
32. Trayectorias de partículas en verano liberadas en Bahía Vizcaíno (panel inferior) y frente a Ensenada (panel superior). El color representa el tiempo desde su liberación. Se grafican tres años neutrales (1981, 1985 y 2004) y dos años Niño (1982 y 1997). Al igual que en la región sur, los dos últimos años (con influencia de El Niño) son cualitativamente diferentes a los otros tres, con el transporte neto siendo hacia el norte en contraste con los otros tres años.	35

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
33. Índice Océanico de El Niño (ONI). Anomalías de temperatura superficial del mar en °C. En rojo (azul) se muestran los eventos asociados al Niño (Niña).	35
34. Porcentaje de partículas advectadas al norte en rojo y al sur en azul al cabo de tres meses de integración para la región de Baja California y de dos meses para la región Sur. En negro la retención total en la región. A la izquierda los años Niño, a la derecha los años Niña. El eje horizontal representa el mes de liberación de las partículas.	36
35. Matrices de conectividad promedio para años Niño para partículas liberadas en Verano (arriba) y Otoño (abajo), e integradas por 1, 2 y 3 meses (de izquierda a derecha).	37
A.1. Esquema gráfico interpolación bilineal espacial del campo de velocidad. . .	53
B.1. Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en enero. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.	54
B.2. Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en febrero. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.	55
B.3. Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en marzo. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.	56
B.4. Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en abril. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.	57
B.5. Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en mayo. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.	58
B.6. Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en junio. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.	59
B.7. Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en julio. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.	60
B.8. Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en agosto. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.	61
B.9. Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en septiembre. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses. . .	62
B.10. Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en octubre. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.	63
B.11. Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en noviembre. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses. . .	64
B.12. Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en diciembre. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses. . . .	65

Capítulo 1. Introducción

El grado de conexión entre diferentes zonas en el océano o conectividad, se puede definir de manera simple como el intercambio de partículas debido a la acción de las corrientes oceánicas. El estudio de la conectividad en el océano es importante por muchas razones. Diferentes especies marinas tienen al menos una etapa dispersiva (etapa larvaria) en la que están sujetas al transporte de las corrientes oceánicas. Determinar las escalas de conectividad o intercambio entre poblaciones marinas y los factores que ocasionan este intercambio es clave para entender la dinámica poblacional, la estructura genética y biogeografía de las especies marinas (Siegel *et al.*, 2003; Cowen, 2000).

El conocimiento de la dispersión y conectividad marina es un punto clave en el diseño y conservación de reservas marinas, pesquerías y áreas protegidas (Largier, 2003). La escala y la estructura del intercambio y conectividad entre poblaciones marinas también tiene profundas implicaciones en el manejo de áreas marinas protegidas y la propagación de especies invasivas (Sala *et al.*, 2002; Palumbi, 2003; Cowen *et al.*, 2006).

Otro tipo de trazadores en el océano también están sujetos al transporte de las corrientes oceánicas, tales como contaminantes o plagas oceánicas. La dispersión de plagas marinas ha sido cuantificada en función de variables más fáciles de cuantificar, como el arrastre por buques (cascos y agua de lastre) y la infraestructura acuícola (Carlton, 1987); sin embargo, el potencial de dispersión de éstas por la circulación oceánica es grande por su capacidad de permanecer en la columna de agua por largos periodos de tiempo, como fue el caso del virus de la mancha blanca que afectó las comunidades camarónicas del Golfo de California (Sánchez-Paz, Arturo, 2010). Por otro lado, resultados de un estudio numérico sugieren que restos de Cesio-137 producto del derrame de Fukushima, Japón en 2011 penetrarán al fondo del océano y se esparcirán a las otras cuencas oceánicas durante las siguientes dos décadas (Rossi *et al.*, 2013).

La definición más aceptada de conectividad entre poblaciones marinas implica reclutamiento exitoso (asentamiento y reproducción); además algunos estudios han mostrado que incluir el movimiento larvario, mortalidad y fecundidad puede mejorar (y complicar) los resultados de conectividad y dispersión (Cowen *et al.*, 2006). Sin embargo se ha obser-

vado que la conectividad entre poblaciones comunicadas por corrientes oceánicas tiende a ser alta (Coleman *et al.*, 2011), por lo que estudiar la conectividad “potencial” basándose solamente en la circulación es una buena primera aproximación. Otros estudios han mostrado que para especies de larvas de capacidad de nado limitado, los patrones de circulación superficial son los principales agentes responsables del transporte de éstas (Rasmussen *et al.*, 2009; Kim y Barth, 2011).

Debido a la gran cantidad de procesos físicos y las diferentes escalas que influyen en el transporte de materia en el océano y su naturaleza estocástica (Siegel *et al.*, 2008; Mitarai *et al.*, 2008) se han desarrollado diferentes métodos para estudiar estos fenómenos, como trazadores Lagrangianos (boyas de deriva); y en el caso de larvas de peces se han desarrollado herramientas genéticas (Baums *et al.*, 2006), químicas y de similitud biológica. Es por esto que el uso de modelos numéricos para estudiar este tipo de fenómenos ha cobrado gran importancia, al representar una herramienta robusta que gracias a los avances computacionales de los últimos años ha sido permitido llevar a cabo estudios en escalas espaciales y temporales mayores. En muchas partes del mundo los modelos numéricos se utilizan para abordar el problema de dispersión y transporte Lagrangiano entre regiones oceánicas (Joseph y Swathi, 1999; Galindo *et al.*, 2006; Haza *et al.*, 2007; Mitarai *et al.*, 2008; Marinone *et al.*, 2008; Xue *et al.*, 2008; Rasmussen *et al.*, 2009; Peguero-Icaza *et al.*, 2010; Qiu *et al.*, 2010; Roughan *et al.*, 2011; Watson *et al.*, 2010; Kim y Barth, 2011; Marinone, 2012; Santiago-García *et al.*, 2014)

Existen diversos trabajos sobre la conectividad a nivel local, o para regiones pequeñas y cuencas semi-cerradas (Marinone *et al.*, 2008; Watson *et al.*, 2010; Kim y Barth, 2011; Mitarai *et al.*, 2008; Marinone, 2012; Joseph y Swathi, 1999; Haza *et al.*, 2007; Santiago-García *et al.*, 2014), que utilizan las matrices de conectividad para caracterizar el intercambio de partículas entre distintas regiones en el océano. Son menos los trabajos de conectividad a escala global, o regiones más grandes y abiertas al océano como el de Wood *et al.* (2013), que permiten investigar efectos estacionales e interanuales de la conectividad para regiones más extendidas y abiertas del océano (Roughan *et al.*, 2011), como es el caso del Pacífico Oriental. En particular para el Pacífico Mexicano no existe un trabajo global de conectividad que estudie las variaciones estacionales e interanuales

de los patrones de dispersión y conectividad.

1.1. Circulación de la zona de estudio

Los ecosistemas de frontera oriental son las regiones más productivas del mundo y sustentan un gran porcentaje de las pesquerías mundiales. La alta productividad en este tipo de ecosistemas está relacionada con la existencia de vientos favorables a surgencias costeras, originando el afloramiento de aguas relativamente frías y ricas en nutrientes hacia la superficie (Gaxiola-Castro y Durazo, 2010).

La zona de estudio de este trabajo comprende entre 13-35 N y 122-92 W. Abarcando desde Punta Concepción al sur de California, hasta el Golfo de Tehuantepec en el sur de México, justo en el Pacífico Oriental y Pacífico Oriental Tropical.



Figura 1: Zona de estudio, Pacífico Oriental Mexicano.

El pacífico oriental se distingue por el forzamiento del viento fuertemente influenciado por la topografía del continente Americano. La circulación está caracterizada por escalas zonales cortas, remolinos permanentes y surgencias costeras (Kessler, 2006). Podemos separar de manera muy general al Pacífico Oriental Mexicano en tres grandes zonas

de circulación. La rama sur de la Corriente de California (Región de Baja California), el Golfo de California y la región que comprende desde el Golfo de Tehuantepec hasta Cabo Corrientes (región Sur)

En la costa de Baja California fluye como parte del Giro subtropical del Pacífico Norte la corriente de California que gradualmente gira hacia el oeste cerca de la punta de la península integrándose a la corriente norecuatorial, su trayectoria es dependiente de la profundidad con variaciones estacionales (Kessler, 2006). En la zona sur de la costa mexicana, la dinámica está regida por una circulación anticiclónica al rededor del domo de Tehuantepec, generando la mayor parte del año un transporte hacia el sur por la costa de México. Se ha propuesto la existencia de la Corriente Mexicana Costera (CMC) que fluye de sur a norte, de la que se han observado evidencias de su existencia en verano (Kessler, 2006; Lavín *et al.*, 2006; Godínez *et al.*, 2010). La circulación en esta región fue esquematizada por Kessler (2006) y se muestra en la figura 2.

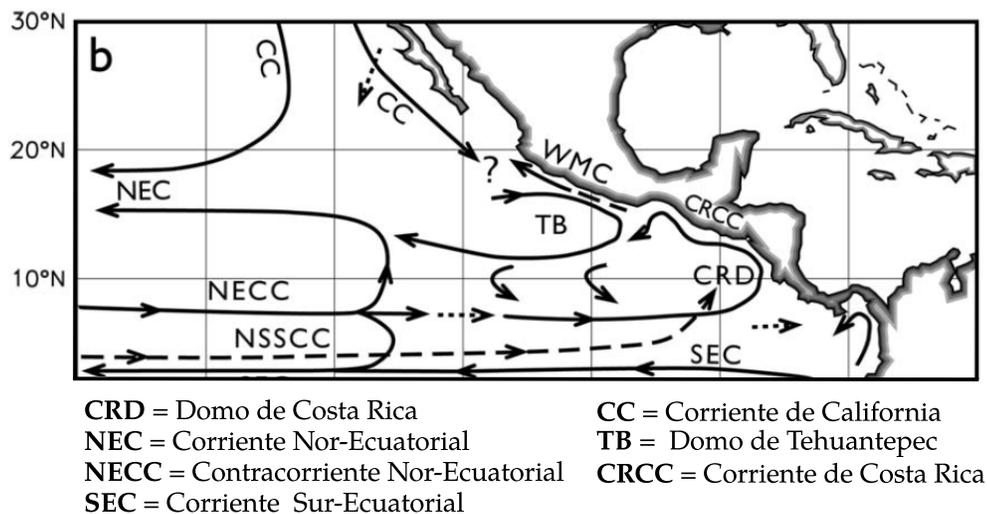


Figura 2: Esquema de circulación del Pacífico Oriental propuesto por Kessler (2006).

Wyrtki (1965) realizó una descripción de la circulación superficial a partir de datos de deriva de buque, señalando diferentes periodos típicos de circulación. De agosto a diciembre, cuando la Corriente de California deja la costa al rededor de 25 N, cuando la zona de convergencia intertropical se encuentra en su posición más al norte (~10 N) y la contracorriente ecuatorial está bien desarrollada. La CC se debilita y es mayormente hacia afuera de la costa, con mucha variabilidad espacial debida principalmente a la formación de meandros, remolinos de mesoescala y surgencias costeras. En enero la

Contracorriente Ecuatorial se debilita y la Corriente de California comienza a fortalecerse y extenderse al sur. De febrero a abril (cuando la ZCI está más al sur) la corriente de California es fuerte, casi paralela a la costa y penetra más al sur, alimentando aguas de la Corriente Nor-Ecuatorial. En el sur de México la circulación es anticiclónica al rededor del Domo de Tehuantepec (hacia el sureste por la costa y al noroeste desde el Golfo de Tehuantepec). De mayo a julio, la Corriente de California permanece relativamente fuerte pero no penetra al sur. En el sur existe un flujo hacia el polo por la costa hasta Cabo Corrientes (que describe como la Corriente de Costa Rica). De octubre a abril prevalece un flujo hacia el sureste en la costa sur de México, que gira al Oeste antes de llegar al Golfo de Tehuantepec, en junio y julio, cuando se debilita esta circulación el flujo al sureste sigue por la costa hasta el Golfo de Tehuantepec. Kessler (2006) infiere un incremento en el transporte hacia el Golfo de California durante eventos de El Niño y es posible que a largo plazo esto represente una contribución significativa al agua tropical observada en el Golfo de California (Baumgartner y Christensen, 1985; Lavín y Cabrera, 2003).

Strub y James (2000) examinan la circulación superficial en la zona de la Corriente de California. Ellos encuentran que en la región del sur de California y Baja California, en invierno hay un jet en dirección al Ecuador, parte de esta corriente da la vuelta en el giro semipermanente al sur de Punta Concepción y otra parte sigue hacia el sur hasta la punta de la Península. En Primavera la corriente hacia el sur es cercana a la costa y se separa hacia el oeste al rededor de Bahía Vizcaíno para seguir hacia el Sur. Durante primavera e inicio del verano existe un jet cercano a la costa con dirección al Ecuador. En verano y otoño este jet se mueve hacia afuera de la costa y genera meandros y remolinos que contribuyen a la energía cinética turbulenta del sistema; en esta época existe una corriente muy cercana a la costa en la parte Norte de Baja California con dirección al polo, mientras que una parte continúa al sur afectada por los procesos de mesoescala. En otoño se rompe la continuidad de la corriente hacia el sur sobre toda la península y la circulación se encuentra dominada por meandros y remolinos (figura 3).

El Golfo de California es un cuerpo de agua semicerrado al norte de México. Puede ser dividido de manera muy general en cinco zonas, a) zona de entrada (Boca), en comunicación abierta con el Pacífico Oriental Tropical, b) zona sur, desde Cabo San Lucas-El

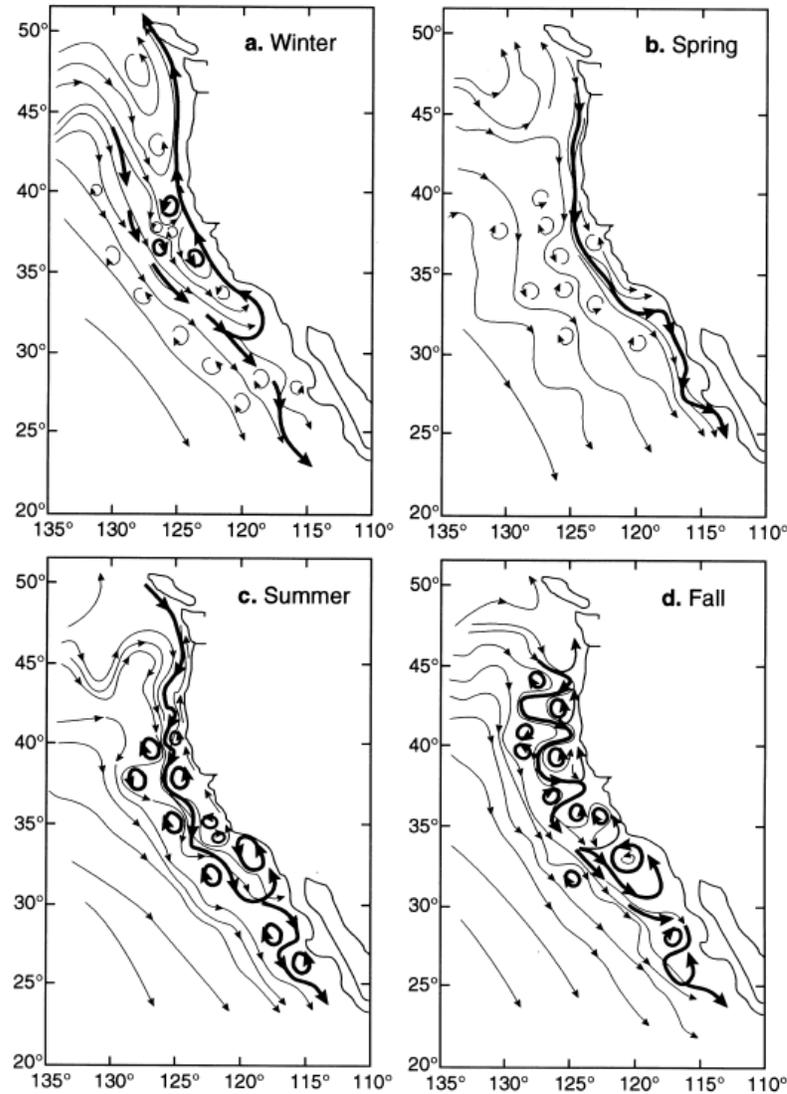


Figura 3: Esquema de circulación de la rama sur de la zona de la Corriente de California, inferido de datos de satélite por Strub y James (2000).

Dorado Sinaloa hasta el Sur de la región de grandes islas, c) el archipiélago formado por (Isla Ángel de la Guarda, Isla Tiburón, Isla San Lorenzo e Isla Turón), caracterizado por tener canales estrechos y hondos, de entre 300 y 600 metros de profundidad, d) el Norte del Golfo de California y e), i el Alto Golfo de California, una zona somera de menos de 30 metros de profundidad al norte de 31 N. Se encuentra principalmente forzado constantemente por un amplio espectro de señales provenientes del Océano Pacífico, como mareas, ondas subinerciales atrapadas de varias frecuencias y fenómenos como el Niño, a través de la zona de entrada o Boca del Golfo de California. Además el viento influye generando una circulación estacional bien marcada y los flujos de superficie como flujos de calor y evaporación son muy importantes en el Golfo (Lavín y Marinone, 2003). La

Península de California y la Boca del Golfo de California se encuentra en la zona de transición donde confluyen la Corriente de California y la Corriente Costera Mexicana, siendo una zona de alta actividad turbulenta y generación de remolinos y otras estructuras de mesoescala. Las tres zonas de mayor producción de remolinos en la zona de estudio son Punta Eugenia, Cabo Corrientes y Cabo San Lucas (Kurczyn *et al.*, 2012).

No existe un trabajo que cuantifique la conectividad a escala global del Pacífico Mexicano, ni examine la variación interanual del transporte lagrangiano entre las diferentes zonas de la costa del Pacífico Oriental Mexicano, por lo que con base en esta información se plantearon los siguientes objetivos:

1.2. Objetivos

Objetivos generales:

- Entender y describir los patrones de conectividad entre las zonas costeras del Pacífico Oriental Mexicano y relacionar estos patrones con la dinámica de la circulación en esta zona utilizando los modelos numéricos.

Objetivos particulares:

- Definir escalas espaciales y temporales de conectividad en el Pacífico Oriental Mexicano
- Describir cómo se conectan estas zonas mediante:
 - Matrices de conectividad
 - Desplazamiento promedio
 - Distancia a lo largo de la costa
- Estudiar la variación estacional e interanual de los patrones de conectividad en el Pacífico Oriental Mexicano

Capítulo 2. Metodología

Para este trabajo se contó con una base de datos calculada con el modelo ROMS (Regional Ocean Modeling System) en el periodo de 1980-2005. Para calcular las trayectorias de partículas se utilizó un modelo lagrangiano “offline” dedicado a adveccionar las partículas en el campo de velocidad y elevación del nivel del mar previamente calculado por el modelo ROMS.

2.1. Descripción del modelo de circulación

El ROMS es un modelo tridimensional que resuelve las ecuaciones primitivas (1-5) para un fluido incompresible con superficie libre, y para diferentes trazadores, como pueden ser salinidad, temperatura, etc. En la horizontal el modelo utiliza coordenadas curvilíneas. En la vertical utiliza la suposición de balance hidrostático y la aproximación de Boussinesq, con coordenadas generalizadas que siguen la batimetría (Shchepetkin y McWilliams, 2005).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + F_x, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + F_y, \quad (2)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\rho g}{\rho_0}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \partial v \partial y + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$\rho = \rho(T, S, P), \quad (5)$$

donde los términos F_x y F_y corresponden a esquemas de difusión, fricción y cerradura, y la ecuación (5) es la ecuación no lineal de estado correspondiente a la UNESCO (Jackett y McDougall, 1995). Más información y detalles técnicos del modelo en la documentación en línea ^{1,2}.

El dominio del modelo se encuentra entre los 2° y 45° N, y entre 135° y 90° O. La resolución horizontal de la malla varía entre 15 kilómetros cerca de la costa hasta 30

¹<http://www.myroms.org/>

²<http://www.romsagrif.org/>

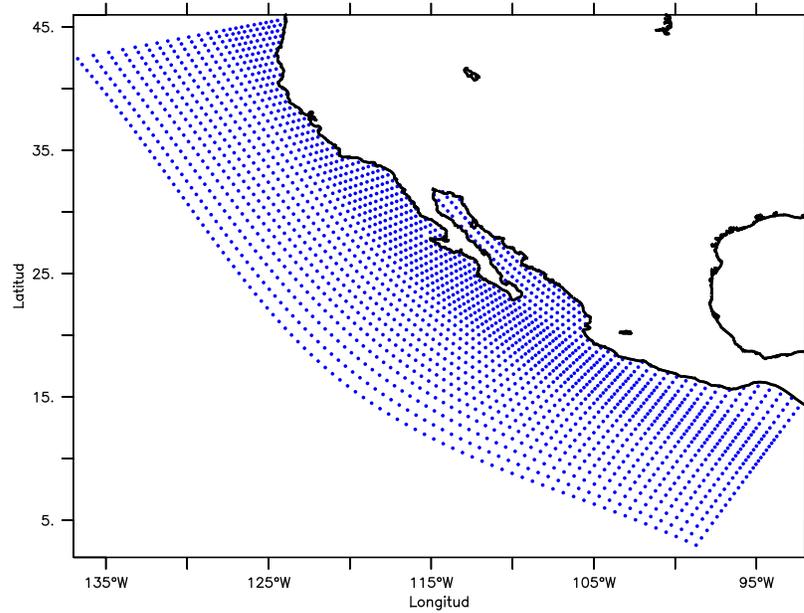


Figura 4: Malla utilizada para el modelo ROMS.

kilómetros en la región más al oeste (figura 4). En la vertical se utilizaron 20 capas sigma. El modelo se forzó con vientos promedios mensuales del NARR (North American Regional Reanalysis) y promedios mensuales del modelo SODA (Simple Ocean Data Assimilation) como condiciones de frontera. Las salidas se guardaron cada dos días y para este trabajo se contó con datos en el periodo de 1980 a 2005.

2.2. Modelo de advección, Trayectorias lagrangianas

La posición de cada partícula p un tiempo t $\vec{x}_p(t)$ se obtiene de resolver la ecuación diferencial de primer orden:

$$\frac{d\vec{x}_p}{dt} = \vec{u}(\vec{x}, t) , \quad (6)$$

al integrar obtenemos:

$$\vec{x}_p(t) = \vec{x}_p(t=0) + \int_0^t \vec{u}(\vec{x}, \tau) d\tau . \quad (7)$$

Para simular las trayectorias de partículas se utilizó un modelo *offline*, es decir la posición de cada partícula se calcula a partir de un campo Euleriano de velocidad calculado previamente con el modelo ROMS. El modelo Lagrangiano resuelve la ecuación (7) en las mismas coordenadas curvilineas de la malla del modelo ROMS, utilizando un método predictor de Milne de cuarto orden y un método corrector de Hamming de cuarto orden (Press *et al.*, 1992; Milne, 1926; Hamming, 1959). Se utilizó un intervalo temporal de integración

de 0.01 días. Para obtener el campo de velocidad a cada intervalo temporal se realiza una interpolación lineal en el tiempo para las dos componentes del campo de velocidad (u y v). Aunque el modelo está contruido para advectar las partículas en 3 dimensiones, para este trabajo la componente vertical de la velocidad (w) se hace cero, para estudiar sólo la conectividad superficial. Se realizaron experimentos con partículas liberadas cada mes (Enero-Diciembre) y para cada año (1980-2005), y se obtuvieron las trayectorias de seis meses de duración. El modelo guarda la posición de las partículas en índices de malla del modelo ROMS y en latitud/longitud a un archivo NetCDF. Las partículas se liberaron de manera uniforme (10 por punto de malla en todo el dominio) al inicio de cada mes y se calcularon sus trayectorias durante seis meses.

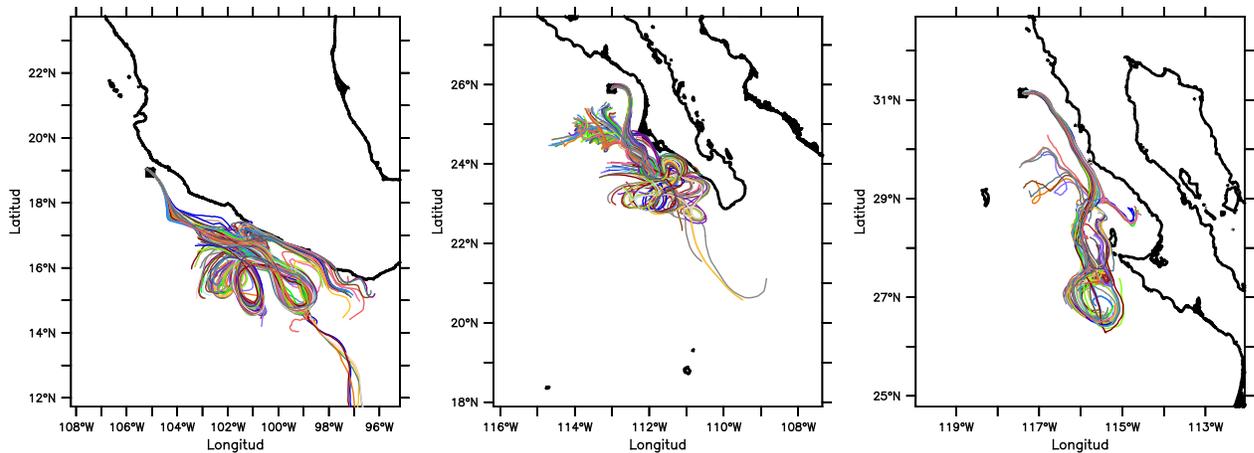


Figura 5: Trayectorias de partículas lanzadas en el cuadro negro para 100 experimentos diferentes, en colores los diferentes experimentos.

En cada paso temporal además de advectar las partículas con el campo euleriano de velocidad, se introduce una perturbación aleatoria a la posición de la partícula de la forma

$$\sigma \vec{dw} , \quad (8)$$

donde σ es una constante y \vec{dw} es un vector con componentes de una distribución normal de media 0 y varianza 1. Para nuestra zona de estudio, y con un Δt de 0.01 días en la integración de la ecuación (7) se encontró que un valor que funcionó bien es de $\alpha = 0.001$. El experimento se repitió 300 veces para cada mes del periodo de estudio, pues se observó que para más repeticiones los resultados no cambian significativamente. En la figura 5 se muestra un ejemplo del efecto de la parte aleatoria en la trayectoria

de una partícula, en la que se lanzaron 100 partículas en el mismo punto de malla. Se observa como las partículas¹ siguen trayectorias ligeramente diferentes, pero en general siguen un patrón determinado por el campo de velocidad euleriana. En el apéndice A se encuentra una explicación más detallada sobre el modelo Lagrangiano y sus características.

2.3. Desplazamiento promedio

Para contestar a la pregunta de hacia dónde tienden a desplazarse las partículas se calculó el desplazamiento promedio. Al promediar la posición final de todas las partículas liberadas en un punto de malla al cabo de un tiempo determinado, se busca capturar un efecto de transporte o “acarreo” promedio de partículas en todo el periodo de estudio. Los resultados de este análisis se muestran en forma de mapas vectoriales en donde la dirección de la flecha indica la dirección promedio a donde se fueron las partículas liberadas en el punto de malla donde está situada la flecha, y en colores la distancia en kilómetros.

Entonces para cada punto de malla (i, j) , al cabo de un tiempo t el desplazamiento promedio se define como:

$$\vec{dt}_{(i,j,t)} = (\overline{dx}_{(i,j,t)}, \overline{dy}_{(i,j,t)}) , \quad (9)$$

donde la barra denota el promedio sobre todas las partículas liberadas, en todos los años del periodo de estudio. Este análisis se realizó para partículas liberadas en todos los meses del año.

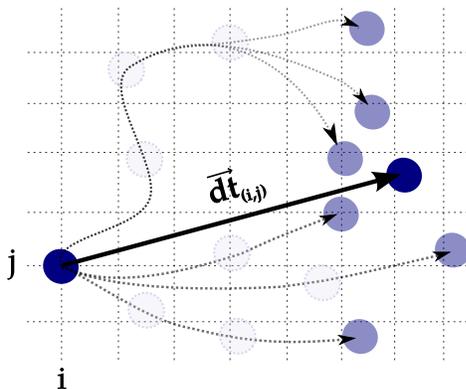


Figura 6: Esquema gráfico del desplazamiento promedio.

2.4. Matrices de conectividad

Para cuantificar el intercambio entre diferentes zonas del Pacífico Oriental Mexicano, utilizamos las matrices de conectividad, representadas como $N_{jk}(t)$. Es decir el número de partículas que sale de la zona i y llega a la zona j en un tiempo t , dividido por el número inicial de partículas en la zona i :

$$C_{i \rightarrow j}^t = \frac{N_{i \rightarrow j}^t}{P_j^{t=0}} \quad (10)$$

La ecuación (10) representa el porcentaje de partículas que salen de la zona i (eje horizontal) y llegan a una zona j (eje vertical) a un tiempo t . Los puntos sobre la diagonal ($i = j$) son zonas de retención, mientras que las partes diagonal superior y diagonal inferior representan transporte hacia otras zonas. Para caracterizar el intercambio entre diferentes zonas del Pacífico Mexicano se definieron 30 zonas para calcular las matrices de conectividad, mostradas en la figura 7(a). De acuerdo a esta distribución, las matrices de conectividad tendrían la estructura de la figura 7(b).

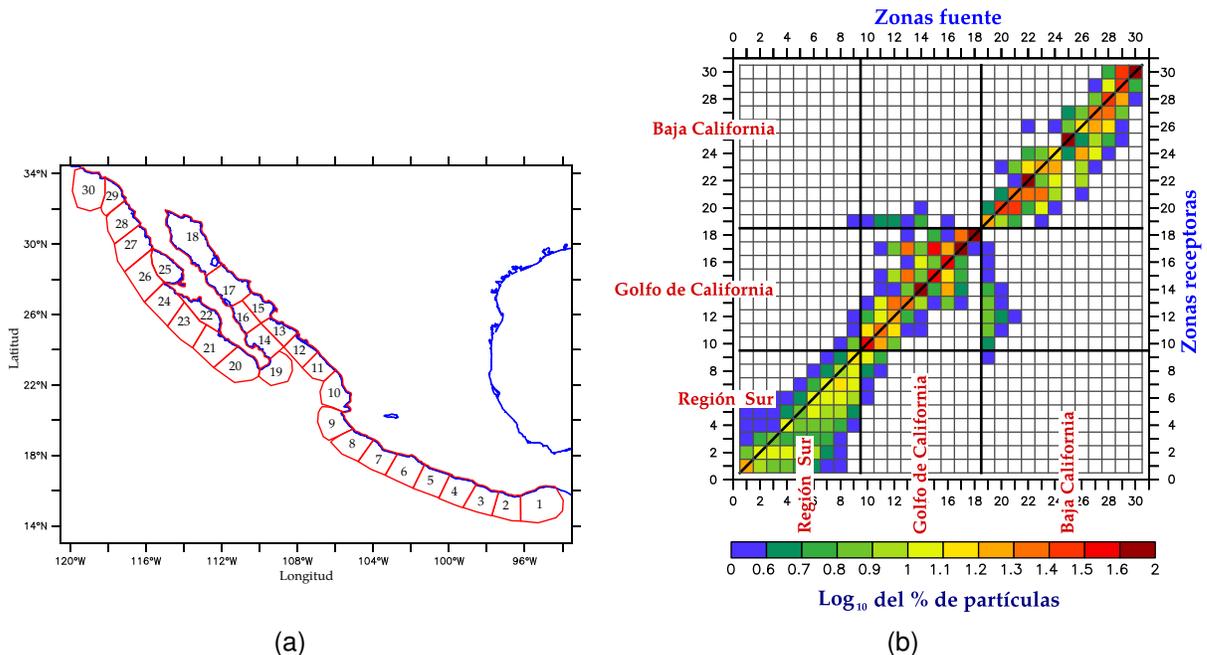


Figura 7: (a) Definición de zonas en el Pacífico Mexicano para construir las matrices de conectividad. (b) Estructura de las matrices de conectividad, las líneas gruesas definen los cuadrantes que dividen las tres grandes regiones: Región Sur, Baja California y Golfo de California.

La matriz de conectividad de la figura 7(b) está dividida en tres grandes zonas:

- **Región Sur (SUR):** Desde el Golfo de Tehuantepec hasta Cabo Corrientes (zonas 1-9)
- **Golfo de California (GOC):** Comprende la boca del golfo, desde Bahía de Bandejas, hasta el norte del Golfo de California (zonas 10-18).
- **Región de Baja California (BC):** Desde la punta de la península en Los Cabos, hasta la región de Punta Concepción en California (zonas 19-30).

Cada uno de los cuadrantes delimitados por las líneas gruesas de de la figura 7(b) representa el intercambio entre las tres zonas, siendo el eje x las zonas fuente y el eje y las zonas receptoras. Los puntos sobre la diagonal representan la retención de partículas, es decir partículas que se quedaron en la misma zona de liberación. Por la forma en que están construídas las matrices de conectividad, en los cuadrantes inferior izquierdo (Sur) y superior derecho (Baja California), la conectividad arriba(abajo) de la diagonal representa transporte al norte(sur). Una conectividad del 100 % en ij quiere decir, por ejemplo, que el 100 % de las partículas de la zona i termina en la zona j . La escala de colores es logarítmica y se utiliza el logaritmo base diez del porcentaje de partículas con un rango de 0 a 2 (del 1 % al 100 %). El color azul (0 a 0.6) representa entre el 1 % y el 5 %, del verde al amarillo entre 5 % y 10 %, de los amarillos al rojo claro el 10 % y 40 %, y el rojo oscuro porcentajes de conectividad mayores al 40 %.

Para los cuadrantes de Baja California y la zona Sur, con el objetivo de determinar el patrón general del transporte de partículas, se integraron las siguientes tres secciones de la matriz de conectividad: sobre la diagonal principal (retención), arriba de la diagonal (transporte hacia el norte) y abajo de la diagonal (transporte hacia el sur). Para calcular el transporte se suman todas las partículas de cada caso y se dividen entre el número total de partículas que se liberaro inicialmente en toda la región.

Entonces el transporte al sur/norte para un tiempo t se define como:

$$T_{nor}(t) = 100 \sum_{ij} (N_{ij}^t) / N_0, \quad j > i \quad (11)$$

$$T_{sur}(t) = 100 \sum_{ij} (N_{ij}^t) / N_0, \quad j < i \quad (12)$$

$$Ret(t) = 100 \sum_{i=j} (N_{ij}^t) / N_0, \quad j = i \quad (13)$$

donde N_0 representa la suma de todas las partículas liberadas en cada una de las zonas al tiempo cero, y N_{ij}^t representan la cantidad de partículas que fueron advectadas de una zona i a otra zona j . Para la región de Baja California las zonas que se suman son de la 19 a la 30, para la región sur de la 1 a la 9 (apartado 2.4).

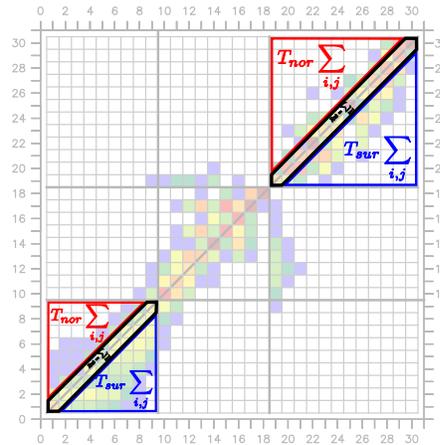


Figura 8: Integración del transporte norte-sur de las matrices de conectividad. En azul(rojo) se representa la parte baja(alta) de la matriz de conectividad representando el transporte al sur(norte). En negro las partículas sobre la diagonal representando la retención.

La suma del transporte al sur, al norte y la retención, siempre es menor al 100%. La diferencia entre la suma de los tres y el total de partículas (100%) es la cantidad de partículas que se liberaron en las zonas definidas y se fueron a otras regiones no contabilizadas como a las fronteras del modelo o hacia el interior del océano.

Evidentemente el transporte de partículas no es un proceso uniforme. Las partículas no son transportadas hacia el sur o hacia el norte como una unidad. Es evidente que un mismo flujo, por efecto de la turbulencia, giros e inestabilidades transporta a unas partículas hacia el norte y a otras hacia el sur, y que existe una diferencia entre el transporte de cada año. Es en este sentido que hablamos de transporte preferencial hacia una u otra di-

rección dependiendo si un mayor o menor porcentaje de partículas son advectadas hacia una u otra dirección.

Capítulo 3. Resultados y discusión

3.1. Desplazamiento promedio de partículas

¿Hacia dónde se van las partículas en promedio? Para contestar esta pregunta, se presentan de la figura 9 a la figura 15 los mapas de desplazamiento neto promedio para los 26 años de estudio al cabo de 1 mes de integración. Para facilitar la presentación de los resultados, se dividió el área de estudio en dos regiones: la norte: desde Punta Concepción al sur de California hasta la entrada al Golfo de California y la Sur: de la entrada al Golfo de California hasta el Golfo de Tehuantepec.

3.1.1. Región norte

Invierno: Al inicio del invierno (diciembre) no existe un patrón muy organizado sobre la península. En enero comienza a organizarse un flujo de partículas hacia el ecuador paralelo a la península. Para el final del invierno (febrero) ya es posible distinguir un patrón claro de movimiento de partículas pegado a la costa desde 32°N hasta el sur de la península a los 23°N. Se puede distinguir también la presencia de una estructura de circulación anticiclónica frente a Punta Eugenia, al rededor de 27°N y 118°W (figura 9).

Primavera: Es en marzo-abril cuando se distingue claramente la influencia de la rama sur de la Corriente de California y su intensificación de primavera en el transporte superficial de partículas. Al sur de California (33°N, 121°W) se observa un flujo hacia el ecuador que se pega a la costa de Baja California en los 32°N y continua paralelo a la Península de forma bien organizada hasta la zona al sur de Cabo San Lucas donde presenta la mayor magnitud de desplazamiento en Marzo (210 km). Mayo es una época de transición, el transporte pierde coherencia espacial, las partículas dan la vuelta sobre el giro semi permanente al sur de Punta Concepción y comienza a distinguirse un transporte débil hacia el norte (~60 km en 1 mes) pegado a la costa de 31° a 32°N. Frente a Punta Eugenia se observa la influencia de una circulación anticiclónica que impide el transporte directo de norte a sur y lo confina a la zona más cercana a la costa (figura 10).

Verano: A diferencia de la primavera, no existe un patrón determinado de desplazamiento de partículas a lo largo de la península de Baja California. Persiste la circulación

anticiclónica enfrente de Punta Eugenia y la circulación ciclónica al sur de Punta Concepción (aproximadamente en 32°N y -122°W). En junio y julio se tiene un transporte hacia el polo pegado a la costa desde los 29°N aproximadamente a la altura de Punta Baja hasta Punta Concepción a 34°N (figura 11), con una distancia recorrida de ~ 120 km en un mes.

Otoño: La región se divide en dos regiones con diferente patrón de transporte lagrangiano. La primera, una zona de flujo hacia el ecuador desde 30°N hasta la punta de la península con menor intensidad y organización que en primavera y con una componente hacia afuera de la costa en la zona frente al Golfo de Ulloa (25°N 114°W). Y la segunda, al norte de 30°N , donde existe un flujo hacia el polo pegado a la costa pero de menor intensidad que en verano (~ 60 km por mes). Noviembre es la segunda época de transición y no podemos distinguir un patrón definido en el transporte promedio de la zona sur de península (figura 12).

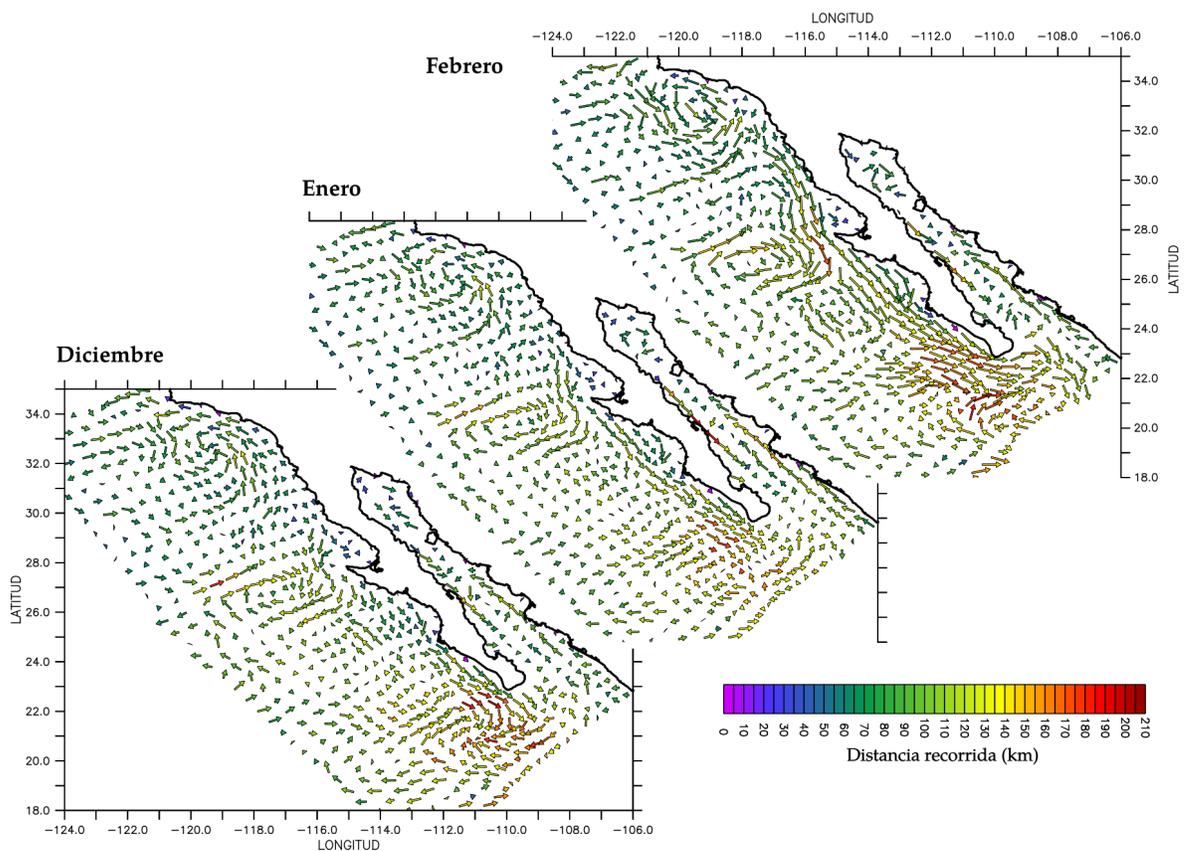


Figura 9: Desplazamiento promedio en invierno para la zona norte. El color representa la distancia recorrida en la dirección de la flecha para 1 mes de integración.

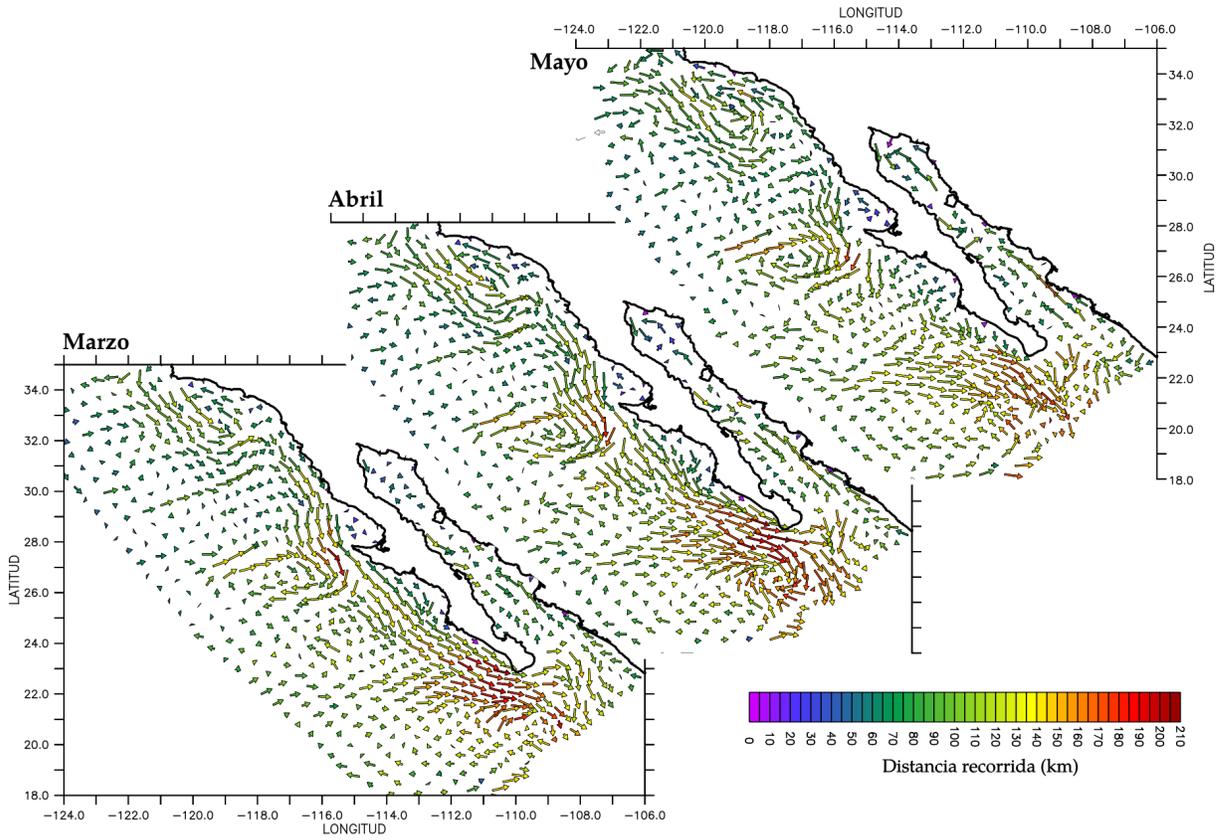


Figura 10: Igual que la figura 9 en primavera.

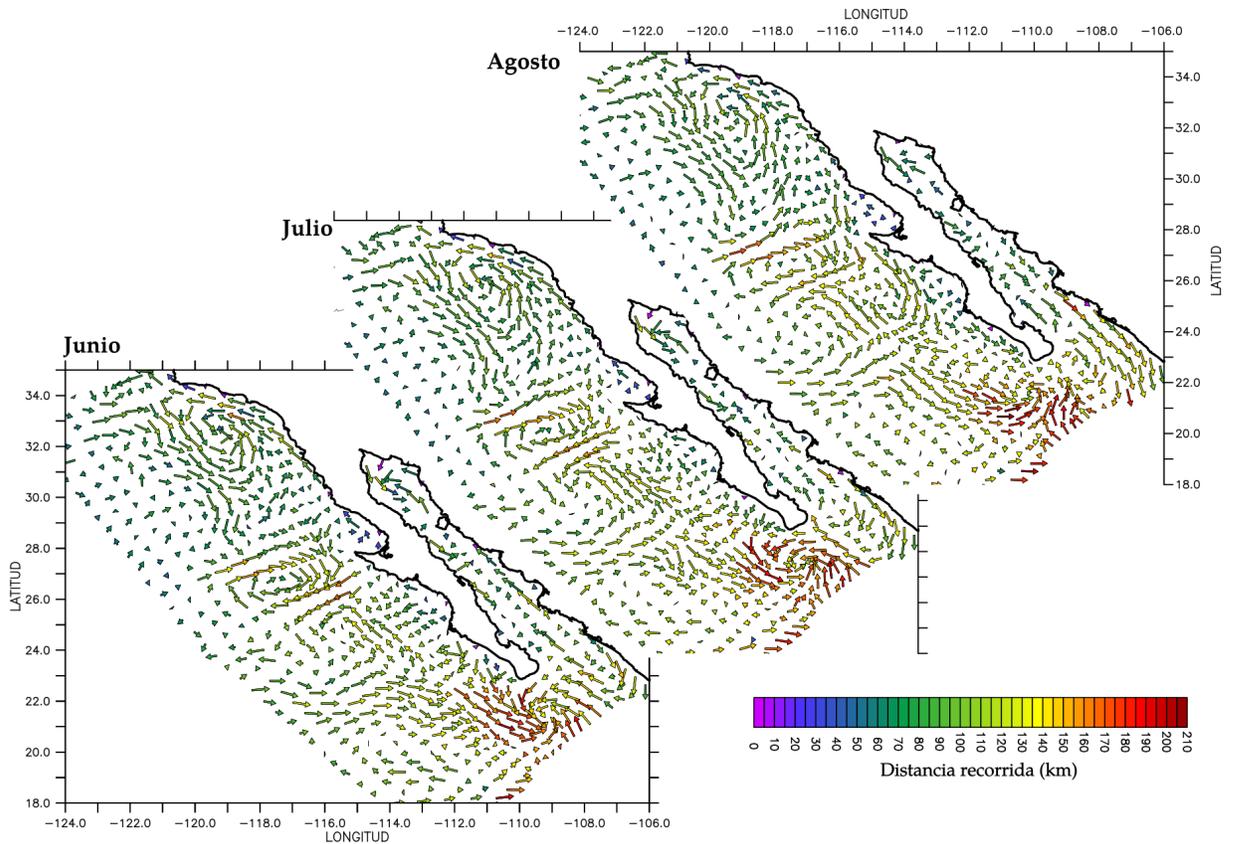


Figura 11: Igual que la figura 9 en verano.

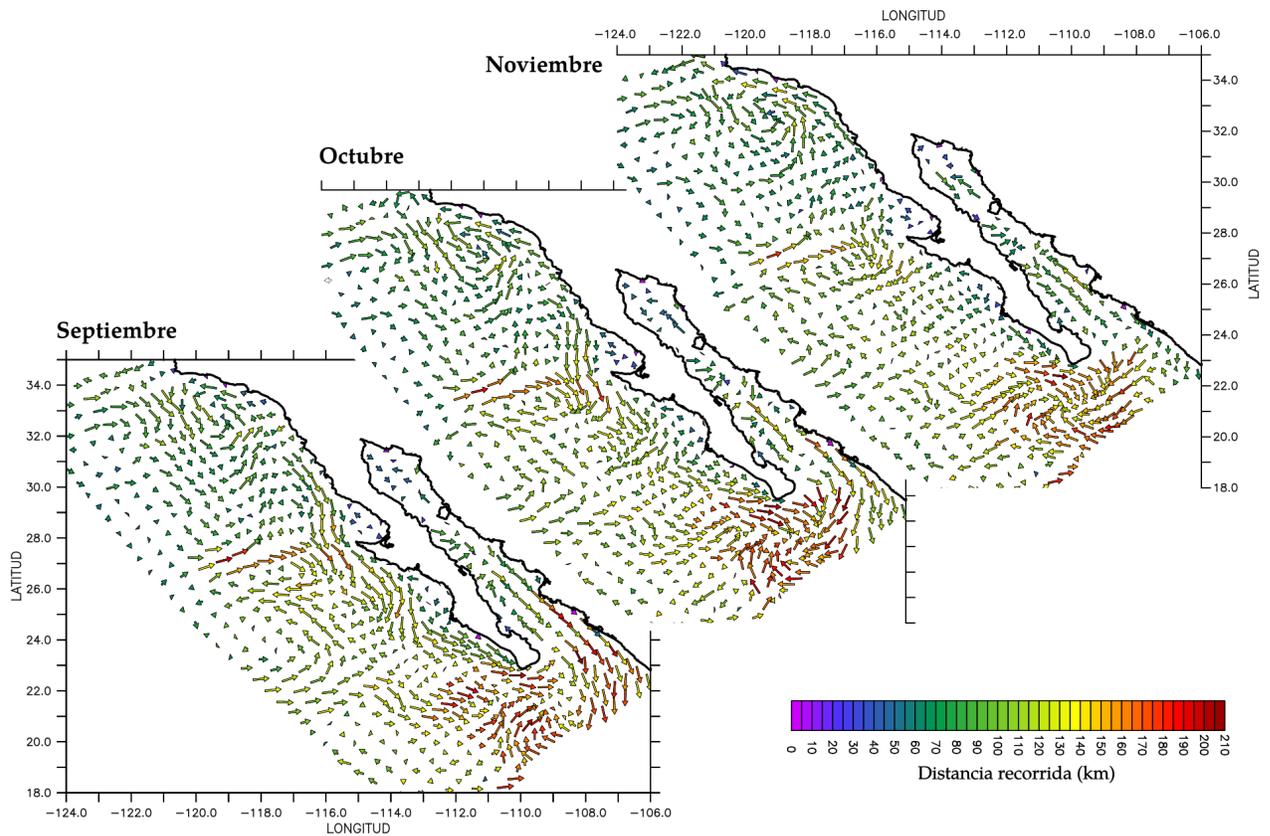


Figura 12: Igual que la figura 9 en otoño.

3.1.2. Región sur

Invierno: En diciembre no existe un patrón promedio con una estructura espacial clara sobre la costa sur de México ni para la entrada al Golfo de California al norte de Cabo Corrientes ($21^{\circ}\text{N}, 106^{\circ}\text{W}$). Más al sur, existe un flujo bien definido e intenso desde el Golfo de Tehuantepec y la costa de Oaxaca hacia el interior del océano que se bifurca en una parte que se va hacia el oeste arriba de los 11°N y otra que se va hacia el sur por debajo de los 11°N aproximadamente a 100°W . En enero y febrero este patrón se mantiene y comienza a formarse una circulación hacia el ecuador paralela a la costa de México desde Cabo Corrientes hacia regiones más al sur con una intensidad máxima de 260 km por mes, y aproximadamente en $15^{\circ}\text{N}, 98^{\circ}\text{W}$ el flujo es desde la costa de Oaxaca hacia el interior del océano (figura 13).

Primavera: En marzo y abril el patrón de transporte sugiere una circulación anticiclónica al rededor de 15°N y 108°W que contribuye al transporte hacia el ecuador desde la

zona al frente de Cabo Corrientes hacia la costa de Oaxaca ($16^{\circ}\text{N}, 97^{\circ}\text{W}$), con un promedio de movimiento de ~ 220 km por mes. Este patrón se extiende hasta aproximadamente 250 km desde la costa al interior del océano. En la costa de Oaxaca ($15^{\circ}\text{N}, 96^{\circ}\text{W}$) y el Golfo de Tehuantepec se debilita el flujo hacia el océano interior respecto al invierno (figura 14).

Verano: En junio y julio la circulación anticiclónica presente en primavera es menos evidente y el transporte desde Cabo Corrientes hacia el ecuador se restringe a una zona más estrecha y cercana a la costa que en primavera. En agosto las partículas lanzadas en la entrada del Golfo de California (frente a las costas de Nayarit, Sinaloa y Jalisco) fluyen hacia el sur por la costa hacia Cabo Corrientes, y se intensifica el transporte hacia el ecuador desde 19° hasta 14°N con una magnitud máxima de ~ 300 km en 1 mes, y más restringido a la costa que en primavera (figura 15).

Otoño: En septiembre las partículas en la entrada al Golfo de California fluyen hacia el sur hacia la zona de Cabo Corrientes. El transporte hacia el ecuador tiene intensidad máxima de ~ 350 km en un mes y está bien desarrollado desde 20° hasta 15°N . En octubre este patrón comienza a disminuir y alejarse de la costa, y en noviembre desaparece completamente. Noviembre es una época de transición en que las partículas de la entrada al Golfo de California y la región sur de México no tienen un patrón de transporte definido (figura 16).

Las diferencias entre la dinámica de la región norte y sur son claras. La región sur es más energética con transporte promedio máximo en la región más costera de ~ 300 km en 1 mes y de más de 350 km en 1 mes para la región oceánica. En la península la magnitud máxima del transporte es ~ 200 km en 1 mes en primavera justo en la zona enfrente de Punta Eugenia. Una característica importante es que la zona frente a la entrada del Golfo de California (entre 20° y 23°N y 110° y 106°W) es una zona de transición entre las dos regiones y actúa como una barrera entre las partículas liberadas en Baja California y la región Sur de México. Para ninguna época del año se aprecia un patrón claramente definido a través de la boca del Golfo, ni con la magnitud suficiente para que partículas liberadas en la punta de la península de Baja California alcancen las regiones de Cabo Corrientes y más al sur.

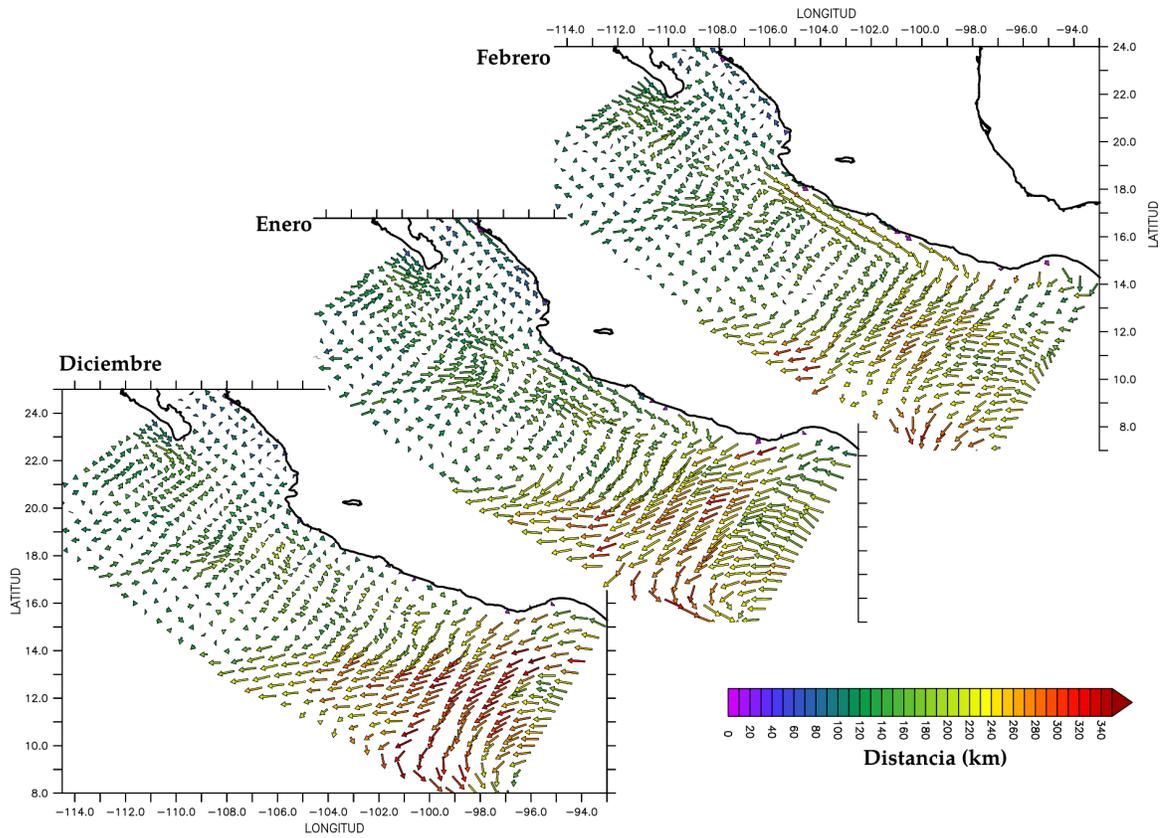


Figura 13: Desplazamiento promedio en invierno para la zona sur. El color representa la distancia recorrida en la dirección de la flecha para 1 mes de integración.

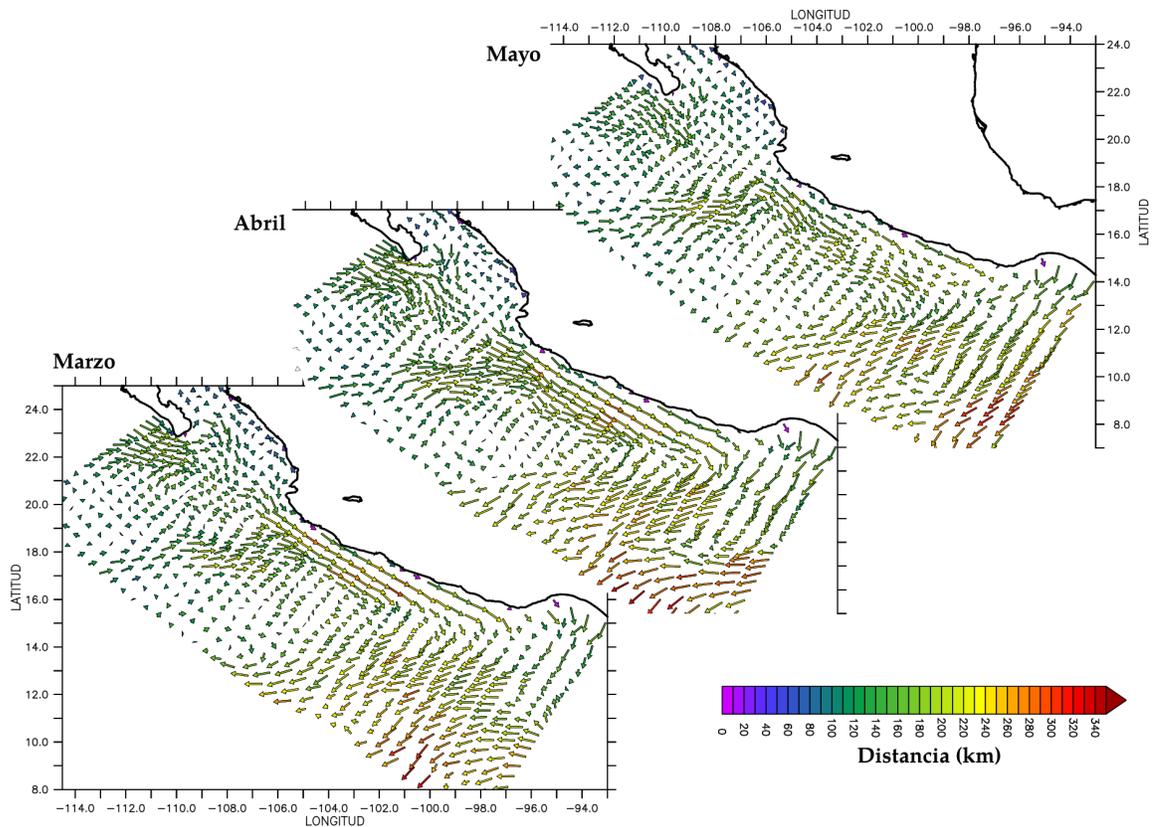


Figura 14: Igual que la figura 13 en primavera.

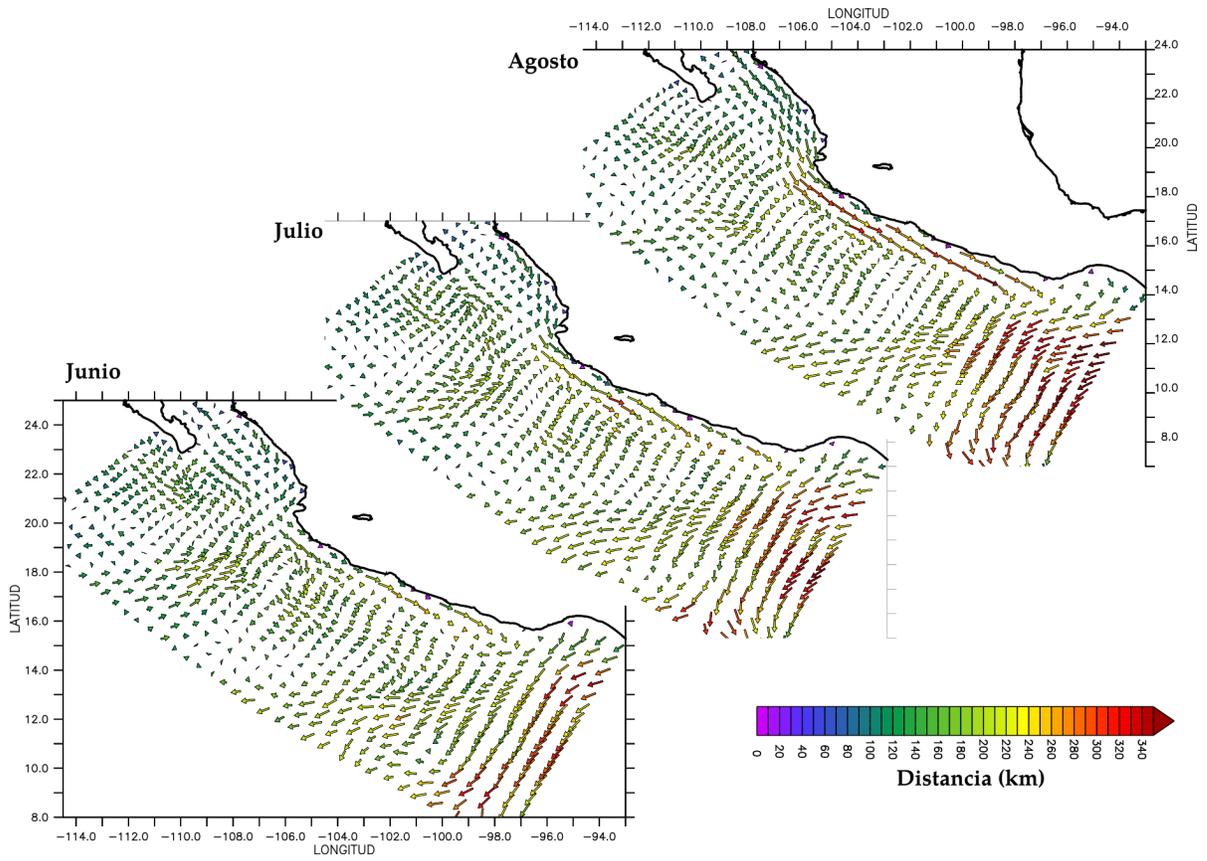


Figura 15: Igual que la figura 13 en verano.

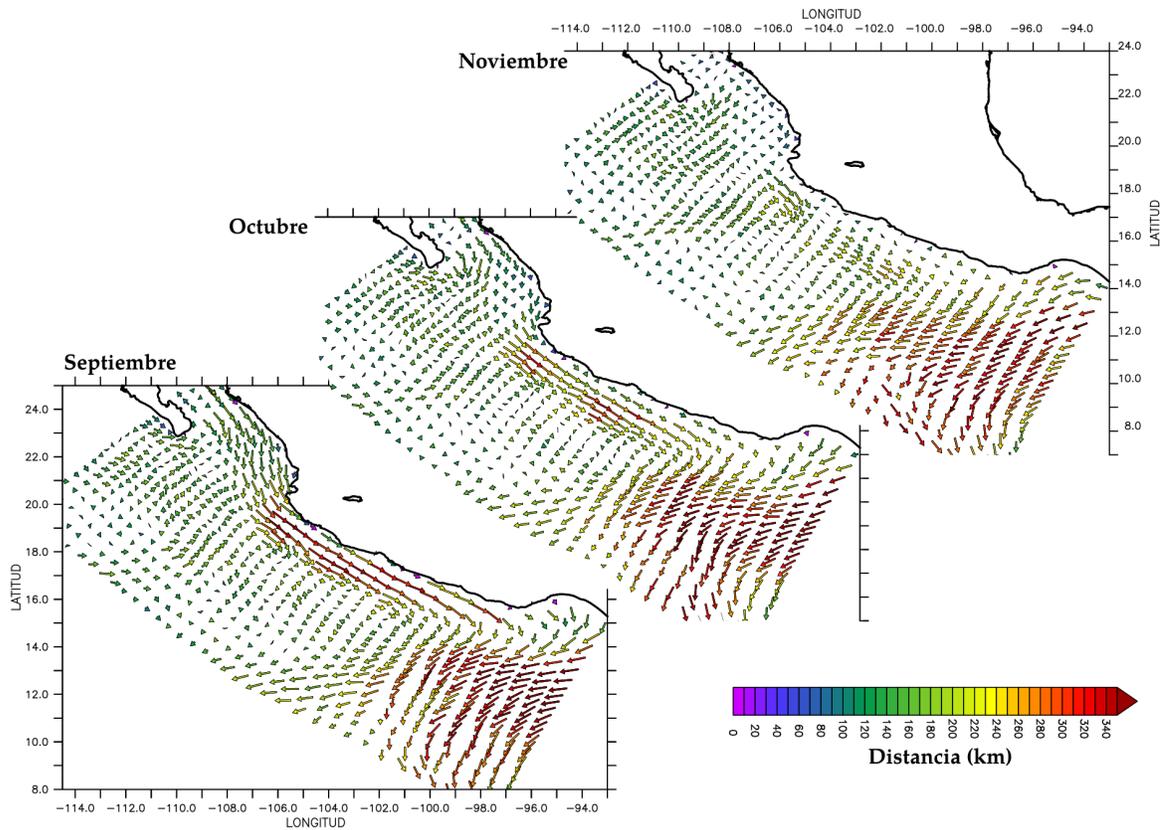


Figura 16: Igual que la figura 13 en otoño.

3.2. Conectividad promedio

Las matrices de conectividad promedio de los 27 años de estudio se calcularon para partículas lanzadas en cada mes del año e integradas por 1,2,3,4,5 y 6 meses. Se encontró que para tiempos mayores a 3 meses las escalas de conectividad no aumentan de forma significativa, y después de cuatro meses comienzan a disminuir. Para un análisis más detallado de la conectividad promedio de cada mes, se anexan en el apéndice B las matrices de conectividad para los 12 meses del año para tiempos de 1 hasta 4 meses. En esta sección se presentan los resultados de las matrices de conectividad promedio para invierno, primavera, verano y otoño (figuras 17 a 20 respectivamente), para partículas integradas por 3 meses.

En invierno (figura 17) la conectividad en la región sur es preferencialmente de norte a sur (esto es: tendencia de los valores de conectividad a estar bajo la diagonal principal) con una conectividad baja entre las zonas de la entrada al Golfo de California y las zonas más al sur de Cabo Corrientes. El Golfo de Tehuantepec se encuentra relativamente aislado de las demás zonas con valores de conectividad menores al 5% entre las zonas 3 a la 9 y el golfo. En la península de Baja California la conectividad es preferencialmente hacia el sur.

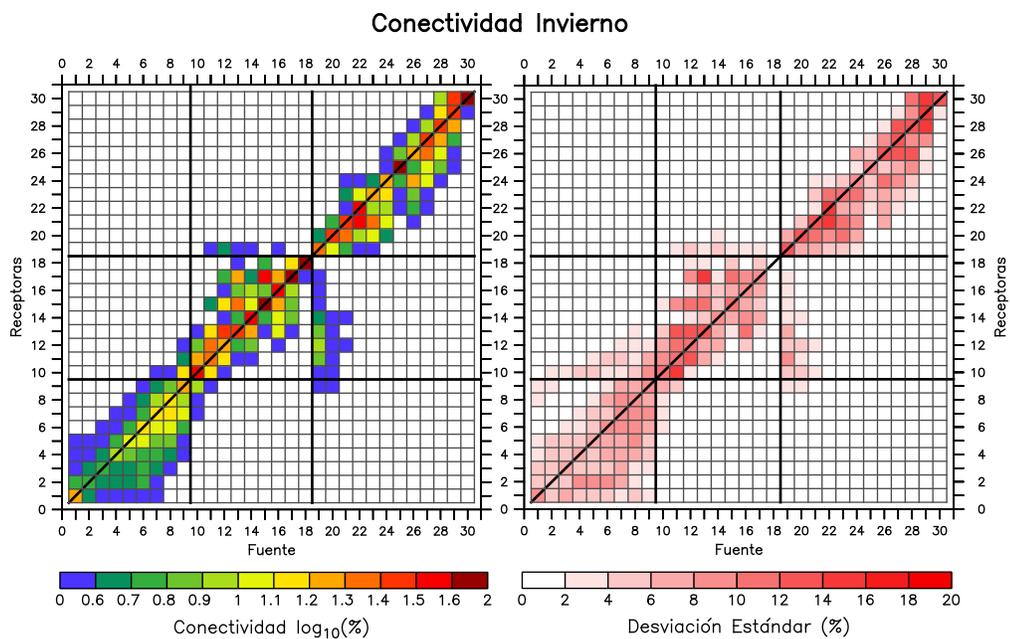


Figura 17: Matriz de conectividad promedio en invierno para partículas integradas por 3 meses.

En primavera el aislamiento del Golfo de Tehuantepec respecto a las otras zonas del sur de México desaparece (como se observa en la figura 18y) recibe partículas de las zonas 2 a 8. El sentido preferencial de la conectividad es de norte a sur, con mayor intensidad que en invierno. Se observa que existe un pequeño aporte de partículas de la entrada al Golfo de California (zonas 10 y 11) hacia Cabo Corrientes y zonas más al sur. En la región de Baja California, la conectividad es preferentemente de norte a sur.

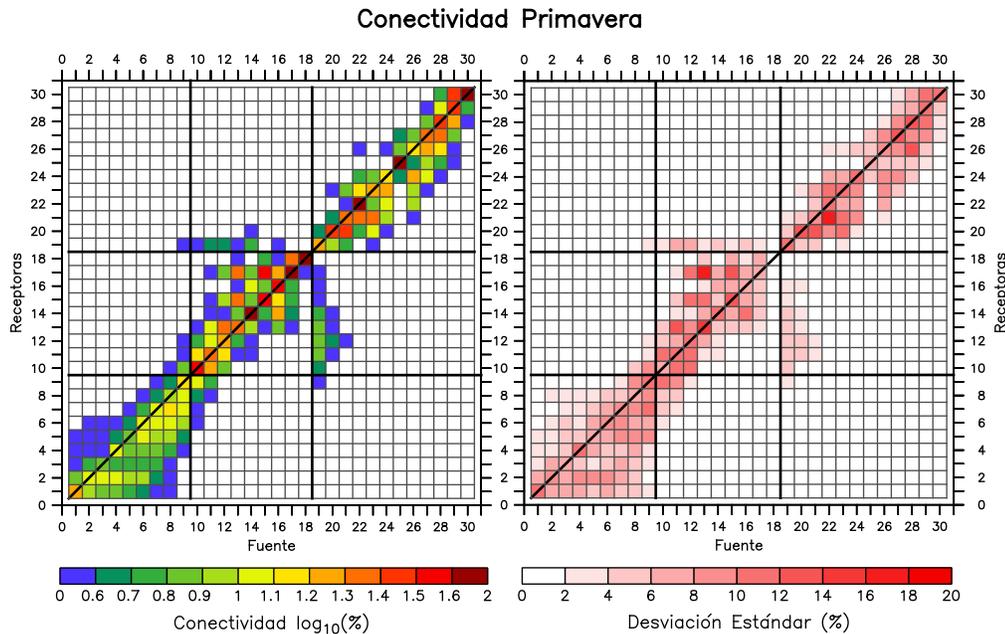


Figura 18: Matriz de conectividad promedio en primavera para partículas integradas por 3 meses.

En verano (figura 19) la zona sur presenta una mayor conexión de norte a sur que las demás épocas del año y existe el mayor aporte de partículas de la región de la costa de Nayarit y Sinaloa hacia Cabo Corrientes y más al sur (desde las zonas 10-13 hacia 4-9). La matriz de conectividad en la región de Baja California es más simétrica, (esto es: no existe una transporte neto preferentemente hacia el norte o hacia el sur). Es la época con mayor grado de conectividad de sur a norte, de las zonas 27 a 30, en concordancia con lo que se observa en los mapas de desplazamiento promedio de la figura 11.

En otoño el Golfo de Tehuantepec y la costa de Oaxaca tienen un grado alto de desconexión respecto a las otras zonas representado por los colores azules en la zona sur de la matriz de conectividad (figura 20). Toda la zona sur (de Tehuantepec a Cabo Corrientes) presenta un patrón muy simétrico y más cercano a la diagonal que en las otras tres

época de transición en la que las matrices de conectividad son simétricas y los niveles de coenctividad bajos.

También se distinguen otros patrones generales en las matrices de conectividad. Existe conectividad entre la parte exterior sur de la Península de Baja California (zonas 20 y 21) y la zona de la Bahía de la Paz (zona 14) y la parte continental de la entrada al Golfo de California, con un máximo en invierno y primavera. La región de Baja California tiene más zonas de alta retención (caracterizada por los colores rojos en la matriz de conectividad), respecto a la región sur de México, que es una zona más energética y tiende a deshacerse de una mayor cantidad de partículas. En promedio no existe una conectividad efectiva entre las zonas en la Península de Baja California y la región sur de México para ninguna época del año. El aporte de partículas de la zona sur hacia el Golfo de California es en promedio muy bajo mientras que en sentido contrario (de la entrada del Golfo hacia el sur) tiene una contribución alta en primavera y verano.

Las figuras 17 a 20 representan la conectividad típica estacional promedio en el periodo de 1980-2005, y se han señalado sus características más generales, sin embargo si se quisiera obtener una descripción más detallada de la conectividad entre todas las zonas del pacífico mexicano puede realizarse un análisis más detallado zona por zona y para diferentes escalas temporales en todos los meses del año, con las matrices del apéndice B.

3.2.1. Transporte Norte-Sur

En la figura 21 se muestra el porcentaje de partículas advectado hacia el norte, hacia el sur y el porcentaje de retención integrado en toda la región de Baja California y la región Sur. Se presentan los resultados para partículas liberadas en cada uno de los meses del año e integradas durante tres meses para la región de Baja California y durante 2 meses para la región Sur. El valor en el eje vertical representa el transporte de toda la región (Baja California o Región Sur) hacia el sur en azul, hacia el norte en rojo y la retención de toda la región en negro. El eje horizontal representa el mes de liberación de las partículas.

En Baja California el transporte hacia el sur es dominante en invierno y primavera, con un máximo para las partículas liberadas en febrero de 35 % y un máximo local de 25 % en

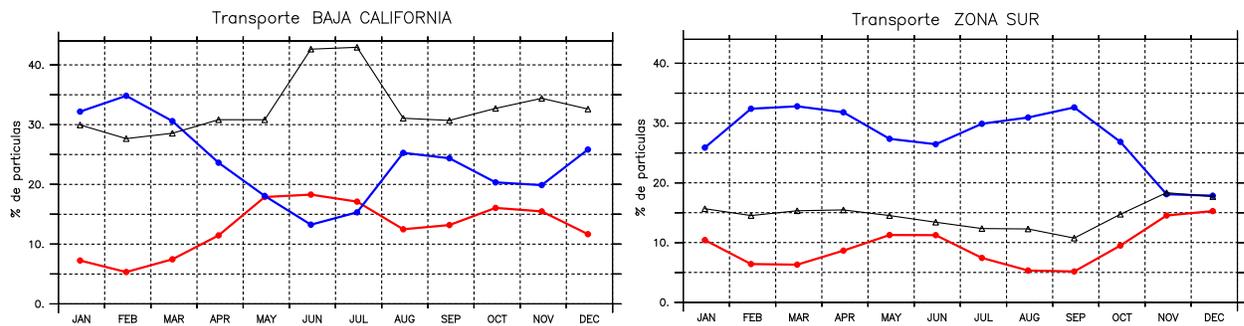


Figura 21: Porcentaje de partículas al norte en rojo y al sur en azul, al cabo de tres meses de integración para la región de Baja California (izquierda) y de dos meses para la región Sur (derecha). En negro la retención total en toda la región. El eje horizontal representa el mes de liberación de las partículas.

agosto. En mayo, junio y julio el transporte total hacia el norte es ligeramente mayor que hacia el sur y el porcentaje de retención total de partículas es máximo para esta región (44 %).

En la región sur todo el año domina el transporte al sur con dos máximos de 33 % en marzo y septiembre. En general el transporte al norte es menor al 12 %, excepto para partículas liberadas en noviembre y diciembre cuando que alcanza el 15 %, el transporte al sur es mínimo y la retención de partículas máxima.

A diferencia de la región de Baja California, la región sur retiene menos del 15 % de las partículas durante casi todo el año al ser una región mucho más energética y con mayor tendencia a adveccionar partículas hacia el interior del océano. La región de Baja California pierde o advecciona hacia el interior del océano aproximadamente el 30 % del total de las partículas iniciales mientras que la región Sur al rededor de 50 %.

3.3. Distancia a lo largo de la costa (Escalas espaciales de conectividad)

¿Qué tan lejos llegan las partículas liberadas en cada una de las zonas?

Se presentan en forma de histogramas la distancia promedio a lo largo de la costa recorrida por las partículas liberadas en la región de Baja California y la región sur. Esto nos ayuda a identificar las escalas espaciales de conectividad y dispersión y la variabilidad espacial en las trayectorias de las partículas. La distancia se considera como una línea recta entre el punto inicial y final de la partícula. Distancias positivas (negativas) indican transporte hacia el polo (ecuador). Las distancias están agrupadas en "bins" de

50 km donde 0 km indica el sitio de liberación de la partícula. Los resultados revelan la importancia de la estacionalidad y las escalas temporales para determinar las escalas espaciales de dispersión y conectividad. Se presentan resultados para dispersión para algunos puntos representativos al cabo de uno, dos y tres meses, pues se observó que para más de tres meses las escalas espaciales y el porcentaje de partículas advectadas al norte o sur no aumentaba o incluso disminuía para tiempos mayores a cuatro meses.

3.3.1. Baja California

En las figuras 22 a 25 observamos como en invierno y primavera domina el transporte de partículas hacia el sur, con una distancia máxima de -450 km en primavera para las partículas que salen de la zona 27 (frente a San Quintín). Aunque existen partículas que llegan hasta -450 km de su zona de liberación, los histogramas muestran que el transporte de partículas es un proceso altamente dispersivo y que un gran porcentaje de las partículas (de hecho la mayor parte) no llega a la distancia máxima, si no que se van dispersando a lo largo de la península, y normalmente el pico de máximo porcentaje de partículas advectadas está a menor distancia que la distancia máxima alcanzada.

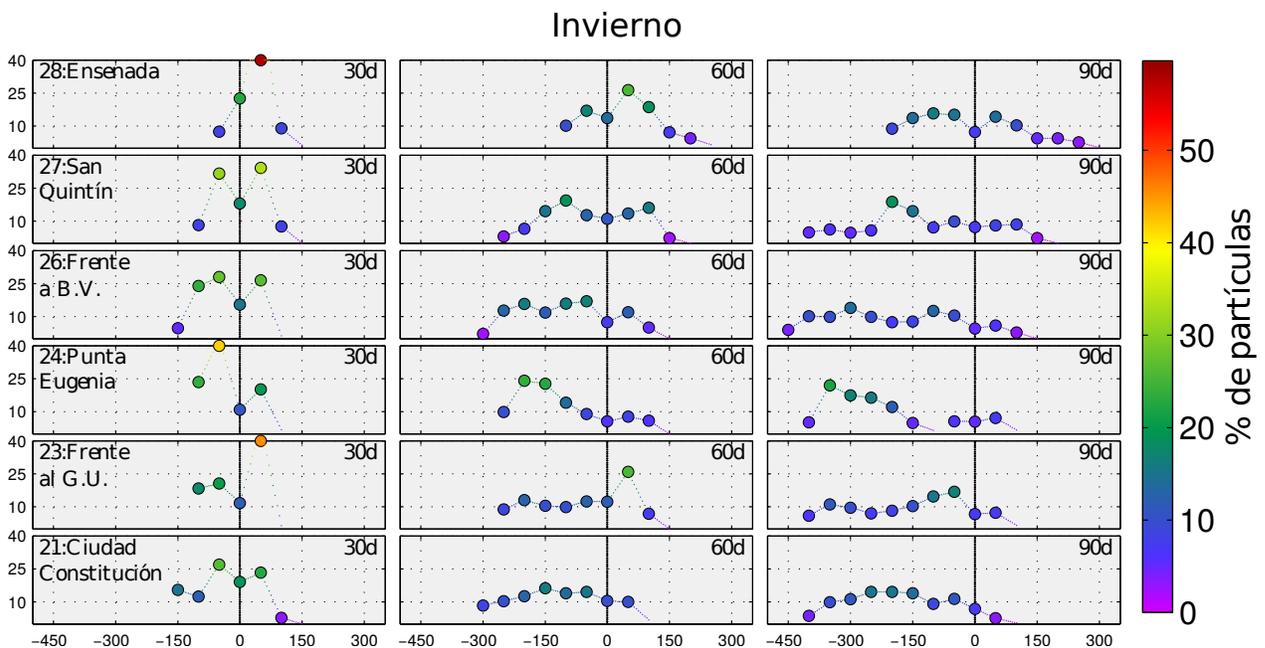


Figura 22: Distancia promedio recorrida por las partículas liberadas en invierno en puntos representativos de la región de Baja California, para 1, 2 y 3 meses de integración (de izquierda a derecha) y de norte a sur (arriba hacia abajo). Las distancias se agruparon en segmentos de 50 km, el cero representa el lugar de lanzamiento. Distancias positivas (negativas) representan transporte hacia polo (ecuador).

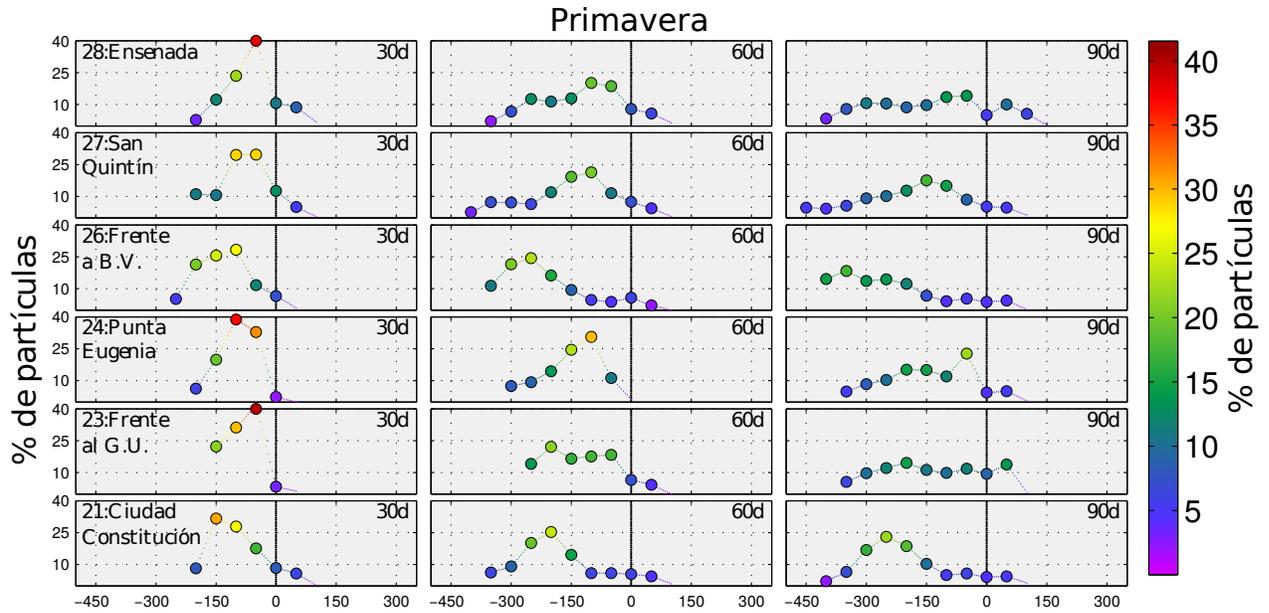


Figura 23: Igual que la figura 22 para primavera.

En verano las partículas se distribuyen en general más uniformemente hacia el norte y hacia el sur de la zona de liberación (0 km) y alcanzan una menor distancia. Las partículas de la zona 28 (frente a Ensenada) tiene muy poca dispersión hacia el sur y la mayor parte se va hacia el norte recorriendo una distancia máxima a lo largo de la costa de 300 km.

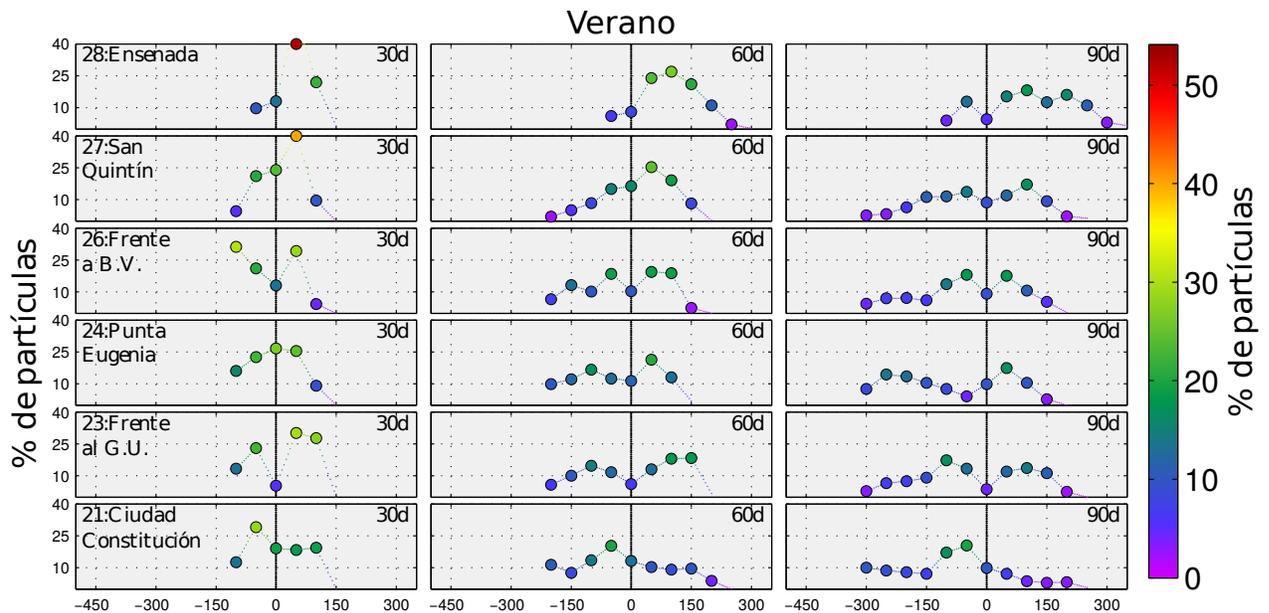


Figura 24: Igual que la figura 22 para verano.

En otoño persiste una distribución uniforme al rededor del punto de liberación, sin embargo para las zonas más al sur (frente al Golfo de Ulloa y Punta Eugenia) domina

ligeramente el transporte hacia el sur pero con una distancia máxima de 300 km menor que en primavera. En la zona 28 (frente a Ensenada) las partículas son advectadas preferencialmente hacia el norte con una distancia máxima recorrida de 250 km.

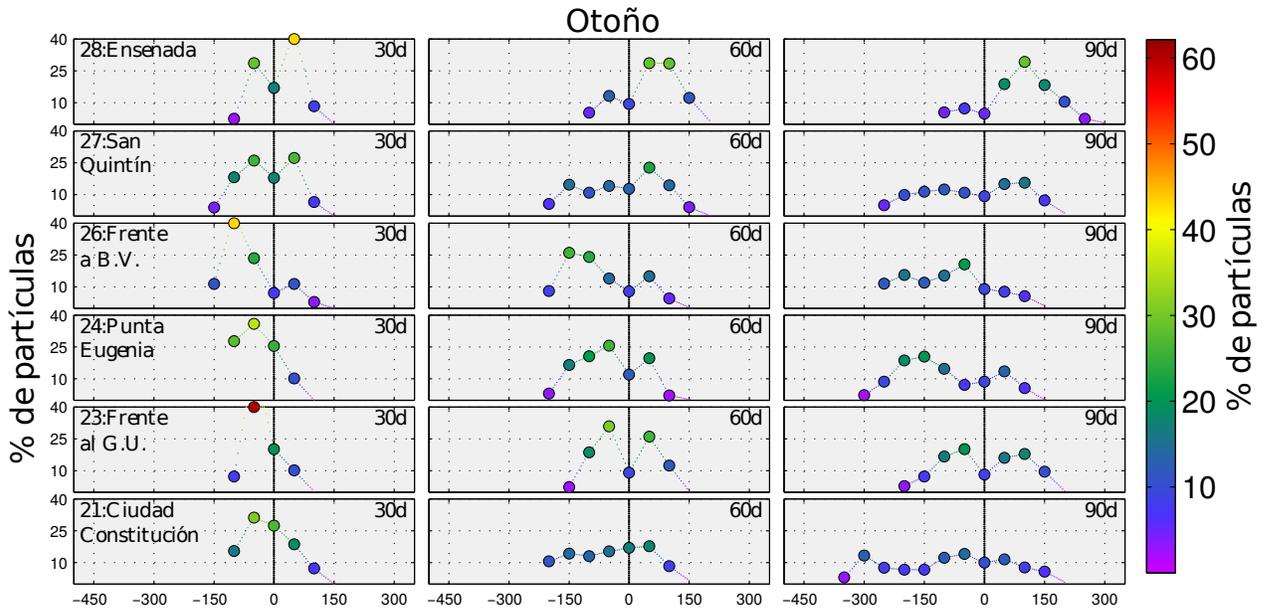


Figura 25: Igual que la figura 22 para otoño.

3.3.2. Región Sur

La región sur de México se caracteriza por ser más energética respecto a la región de Baja California, por lo tanto las escalas espaciales de dispersión son mayores también a las de la península.

En invierno la región 10 (frente a Nayarit) es una región de alta retención respecto a las demás zonas del sur (retiene 25 % de sus partículas hasta 3 meses) y las partículas alcanzan una distancia máxima de 250 km. De Cabo Corrientes a la costa de Oaxaca (zonas 9 a 3) las partículas son advectadas con preferencia hacia el sur y una distancia máxima de -500 km para las partículas que salen de la zonas 7 y 5.

En primavera es clara la intensificación del transporte hacia el ecuador. En todas las zonas de la región sur la advección de partículas es predominantemente hacia el sur con porcentajes muy bajos de partículas advectadas al norte.

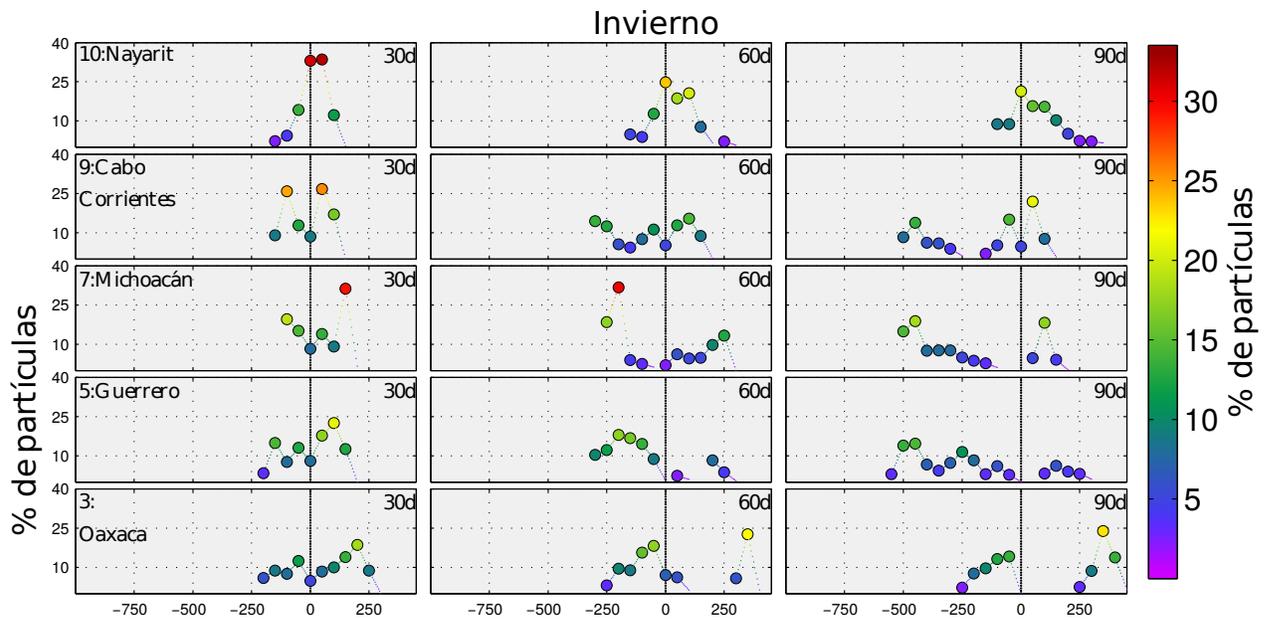


Figura 26: Distancia promedio recorrida por las partículas liberadas en invierno en diferentes zonas de la región Sur, para 1, 2 y 3 meses de integración (de izquierda a derecha) y de norte a sur (arriba hacia abajo). Las distancias se agruparon en segmentos de 50 km, el cero representa el lugar de lanzamiento. Distancias positivas (negativas) representan transporte hacia polo (ecuador).

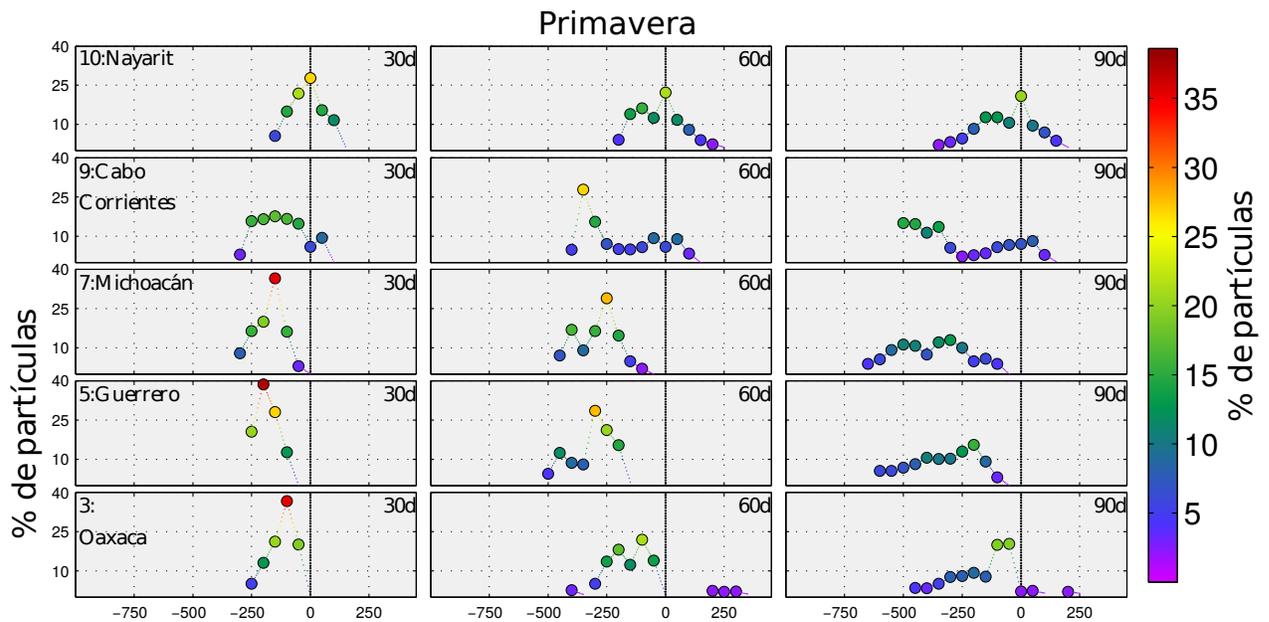


Figura 27: Igual que la figura 26 para primavera.

En verano se presentan las escalas espaciales mayores con una distancia máxima a lo largo de la costa de -850 km para las partículas que salen de Cabo Corrientes (zona 9). Al igual que sobre la península de Baja California el proceso es dispersivo, y las partículas llegan a diferentes puntos sobre la costa sur de México.

En otoño, que como se encontró en la apartado 3.1 es una época de transición, el transporte de partículas es mínimo tanto hacia el sur como hacia el norte, las partículas se confinan a distancias no mayores a ± 300 km desde su sitio de liberación o son advectadas hacia el oceano interior.

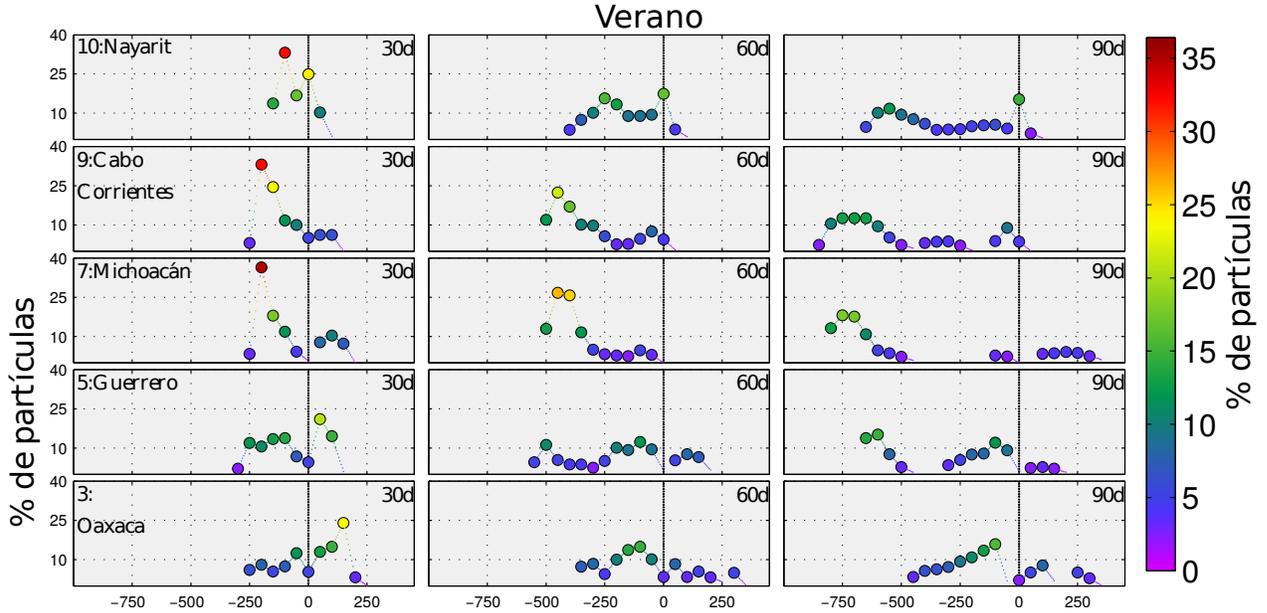


Figura 28: Igual que la figura 26 para verano.

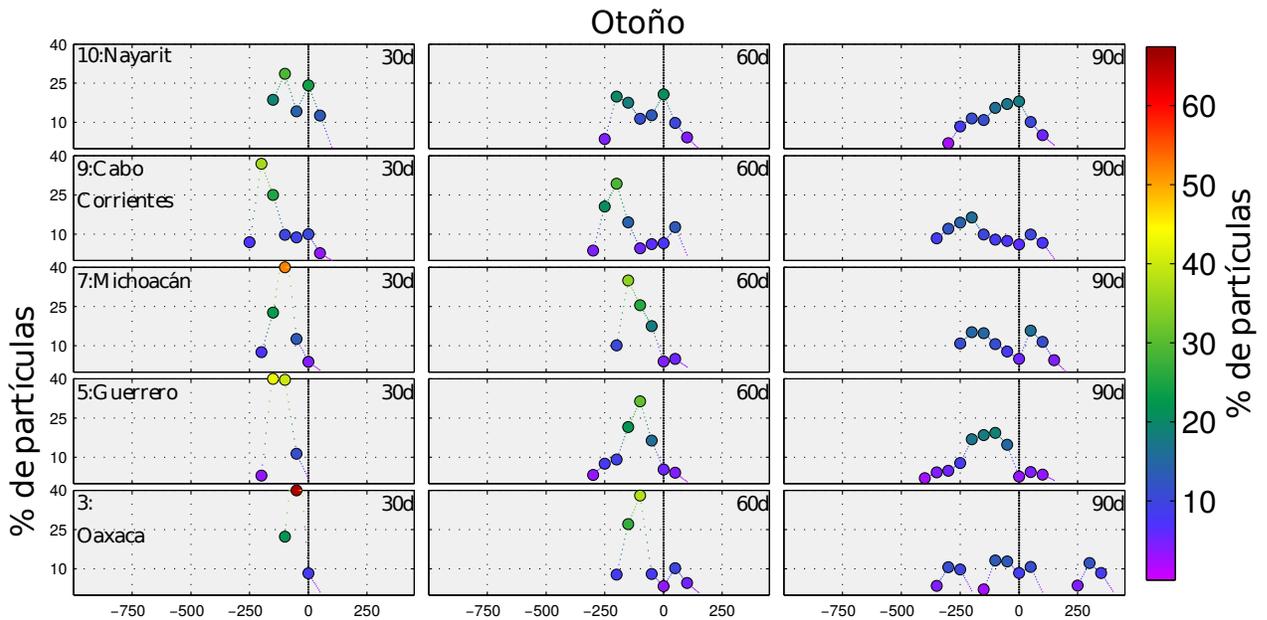


Figura 29: Igual que la figura 26 para otoño.

3.4. Capacidad de retención

La capacidad de retención la definimos como el porcentaje de partículas que al cabo de 3 meses de trayectoria se quedaron a menos de 50 km de la posición en que fueron lanzadas. Aunque la variación interanual es muy alta y la retención de cada año es diferente, el promedio de los 26 años de estudio revela zonas persistentes de retención mostradas en la figura 30. Las zonas sobre la costa en la región de estudio con mayor capacidad de retención son la región al sur de Punta Concepción aproximadamente en 120°W y 32°N, Bahía Vizcaíno y el golfo de Ulloa. Estas tres regiones tienen valores altos de retención para todas las épocas del año. Además, la zona en la costa de Nayarit y sur de Sinaloa es una zona de retención en invierno, con valores de retención mayores al 30% mientras que tiende a deshacerse de sus partículas en las demás épocas del año. El Golfo de Tehuantepec en invierno tiene una zona muy cercana a la costa de alta retención de partículas comparado con las regiones cercanas.

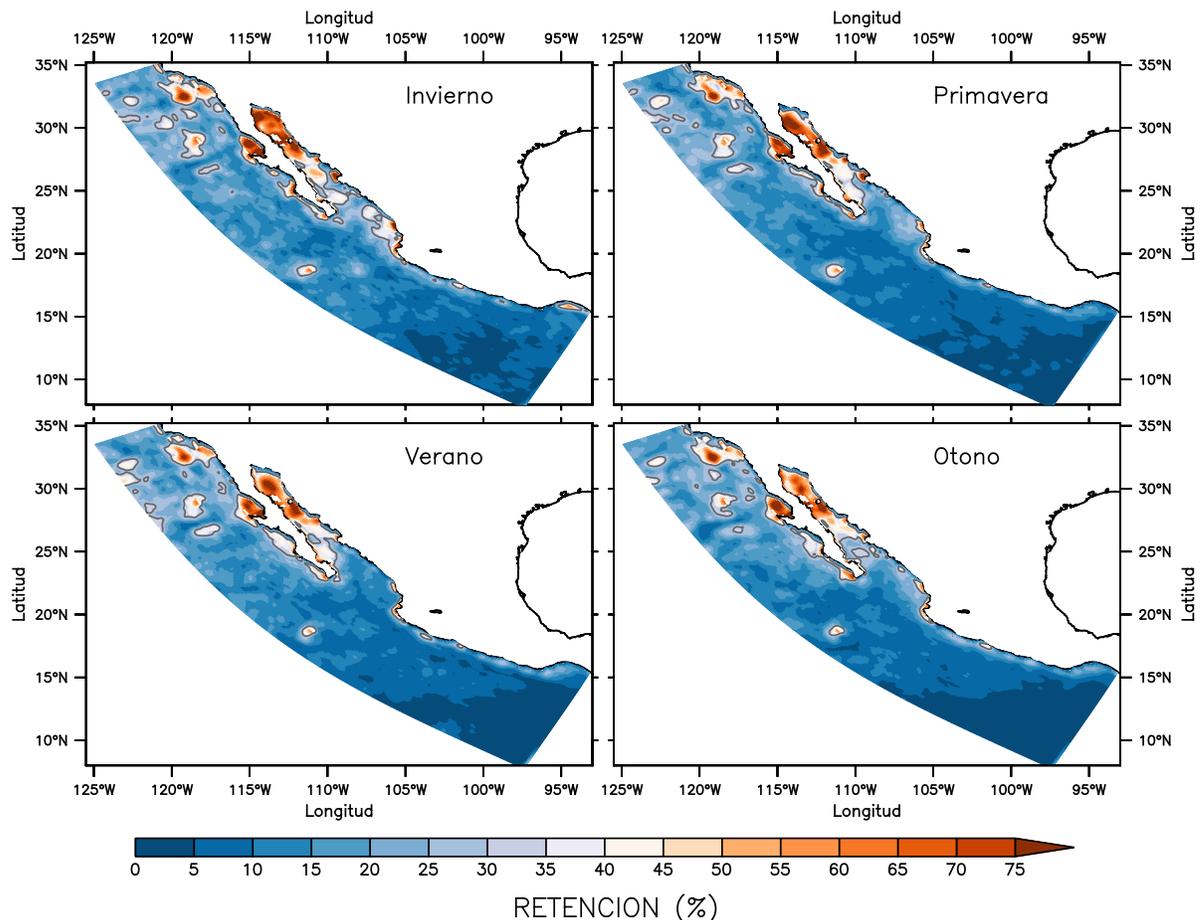


Figura 30: Porcentaje de retención estacional al cabo de tres meses de integración.

3.5. Varación Interanual

En un análisis cualitativo se pudo apreciar que para algunos casos particulares el patrón de dispersión de las partículas liberadas en la costa del Pacífico Mexicano muestra un cambio notorio para los años bajo la influencia de el fenómeno de El Niño. En las figuras 31(b), 31(c), 32(b) y 32(c) se grafican las trayectorias de partículas saliendo de las zonas 1, 10, 25 y 28 (Golfo de Tehuantepec, Bahía de Banderas, Bahía Vizcaíno y frente a Ensenada) y liberadas en verano. Se muestran 5 años diferentes, tres años sin influencia de El Niño (las primeras tres de izquierda a derecha) y dos años con influencia (las ultimas dos). Cualitativamente existe una diferencia en la dirección preferencial de las trayectorias lagrangianas para los casos de los años Niño. Con base en estas evidencias de eventos particulares se propuso determinar objetivamente si existe una variación interanual en los patrones de conectividad del Pacífico Oriental Mexicano y en particular una variación asociada al fenómeno del Niño/Niña. Para determinar qué meses y en qué años estuvieron bajo la influencia de El Niño se decidió utilizar el “Índice Oceánico de El Niño” *ONI* por sus siglas en inglés (Null, 2015; NOAA, 2015).

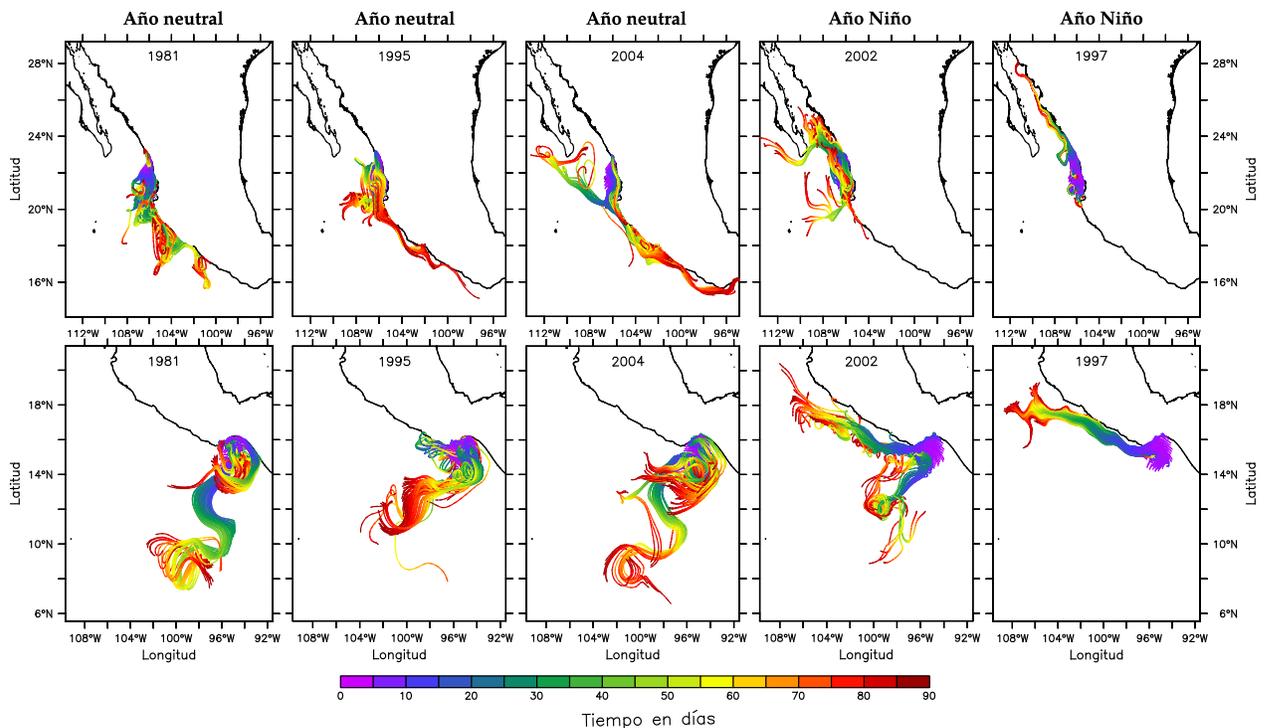


Figura 31: Trayectorias de partículas en verano liberadas en Golfo de Tehuantepec (panel inferior) y Bahía de Banderas (panel superior). El color representa tiempo desde su liberación. Se grafican tres años neutrales (1982, 1985 y 2004) y dos años Niño (2002 y 1997). Notar como el patrón general de dispersión de los dos últimos años (1997 y 2002) es cualitativamente diferente a los otros tres años.

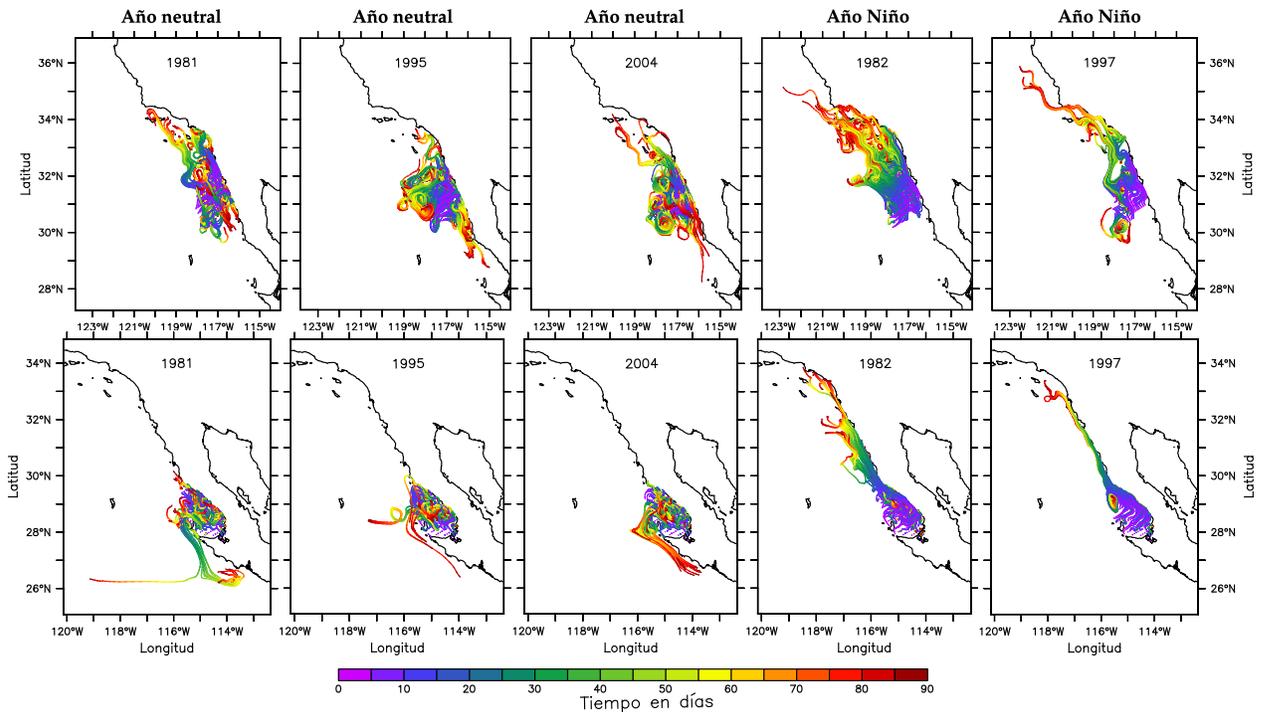


Figura 32: Trayectorias de partículas en verano liberadas en Bahía Vizcaíno (panel inferior) y frente a Ensenada (panel superior). El color representa el tiempo desde su liberación. Se grafican tres años neutrales (1981, 1985 y 2004) y dos años Niño (1982 y 1997). Al igual que en la región sur, los dos últimos años (con influencia de El Niño) son cualitativamente diferentes a los otros tres, con el transporte neto siendo hacia el norte en contraste con los otros tres años.

Definimos los eventos fuertes como los meses en que la anomalía de temperatura superficial es superior a ± 0.5 °C y que el pico máximo de ese evento supera ± 1 °C. Los resultados para años Niño/Niña de nuestras variables los calculamos promediando los eventos de 1982-1983, 1991-1992, 1997-1998 y 2002-2003 para años Niño (anomalías positivas en rojo) y 1984-1985, 1988-1989 y 1998-2000 para años Niña (anomalías negativas en azul).

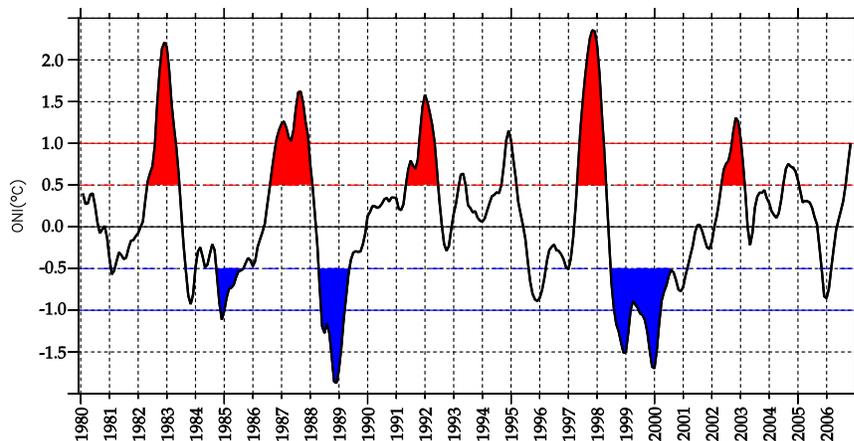


Figura 33: Índice Océanico de El Niño (ONI). Anomalías de temperatura superficial del mar en °C. En rojo (azul) se muestran los eventos asociados al Niño (Niña).

Se calcularon las matrices de conectividad para cada uno de los meses y se analizó el transporte integrado hacia el norte y hacia el sur de la misma forma que en la apartado 3.2.1 para poder determinar si existe un cambio global en la dirección preferencial de la conectividad para años Niño/Niña, los resultados se muestran en la figura 34, donde el eje vertical representa los porcentajes de retención, transporte al sur y al norte al cabo de dos meses (región sur) y tres meses (región norte) de integración; y el eje horizontal el mes de liberación de las partículas.

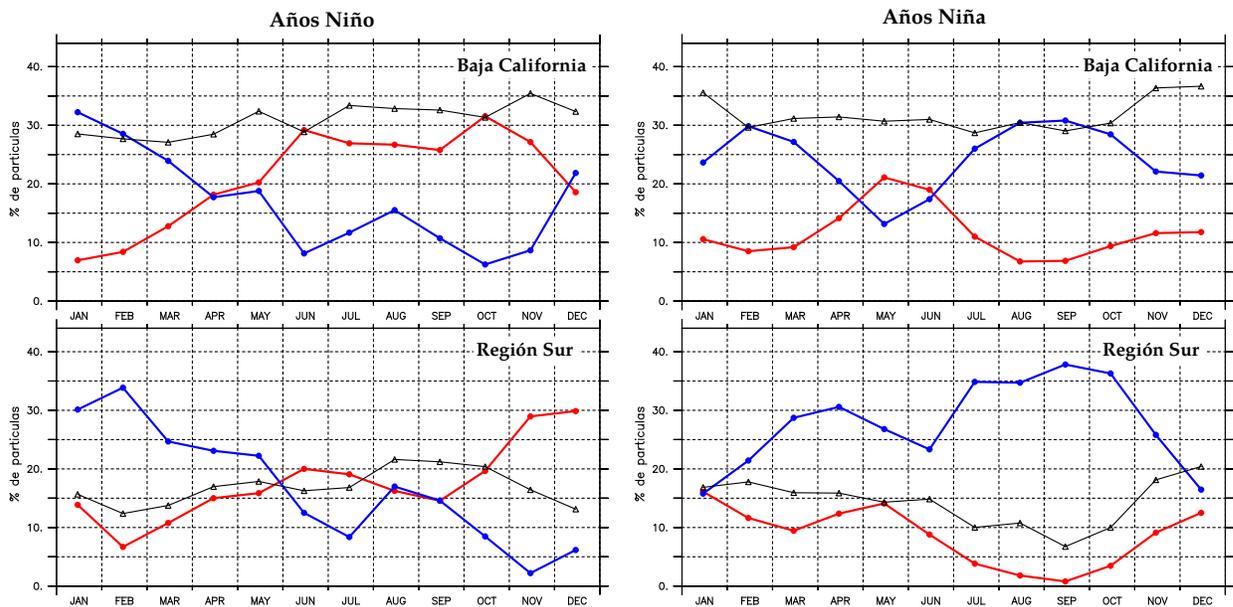


Figura 34: Porcentaje de partículas advectadas al norte en rojo y al sur en azul al cabo de tres meses de integración para la región de Baja California y de dos meses para la región Sur. En negro la retención total en la región. A la izquierda los años Niño, a la derecha los años Niña. El eje horizontal representa el mes de liberación de las partículas.

Si comparamos las figuras 34(a) y 34(b) con la figura 21 podemos observar que el cambio más significativo en el comportamiento global del transporte norte-sur se da en años Niño para los meses de mayo a noviembre. A diferencia de la dirección preferencial de conectividad promedio, donde para ambas regiones (Baja California y Sur) domina el transporte hacia el sur, excepto para junio y julio en Baja California donde domina ligeramente el transporte al norte. En años Niño se invierte el transporte total y domina el transporte al norte de mayo a noviembre para Baja California (figura 34(a) panel superior) y de junio a diciembre para la región sur (figura 34(a) panel inferior). Para los años Niña no se observa un cambio en la dirección preferencial de conectividad, pero el máximo

(mínimo) local de transporte al sur (norte) a final del verano y en el otoño aumenta (disminuye) respecto al valor promedio, es decir, se intensifica ligeramente la preferencia de transporte al sur para ambas regiones.

Con base en los resultados de la figura 34 se recalcularon las matrices de conectividad promedio de verano y otoño para años Niño, y se presentan los resultados para uno, dos y tres meses de integración (de izquierda a derecha):

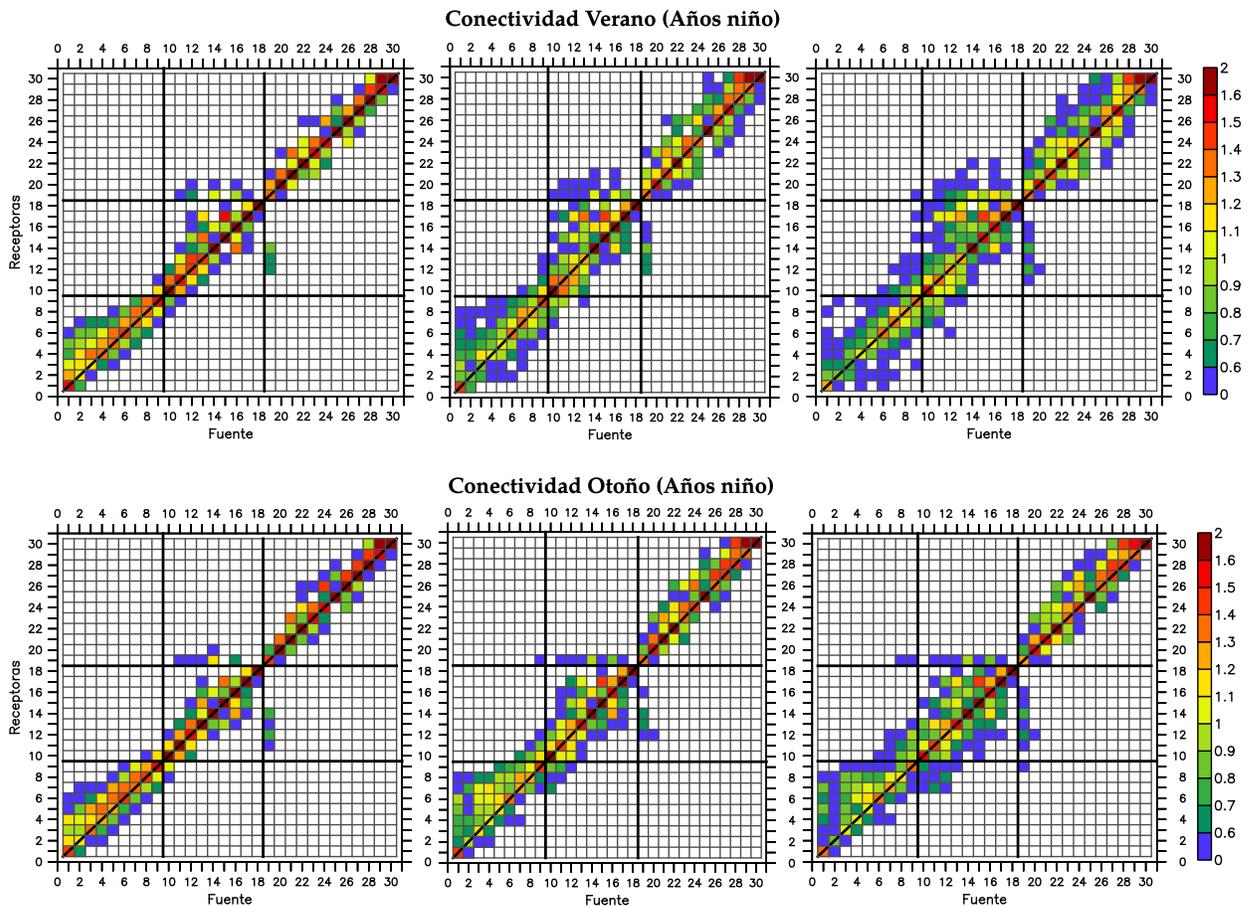


Figura 35: Matrices de conectividad promedio para años Niño para partículas liberadas en Verano (arriba) y Otoño (abajo), e integradas por 1, 2 y 3 meses (de izquierda a derecha).

Para el cuadrante inferior izquierdo que representa la región sur se aprecia claramente como desde 1 y 2 meses de integración existe una conectividad fuerte desde las zonas 1 a 3 hacia las zonas más al norte y la conectividad de norte-sur es prácticamente nula (figuras 35 y 35(a)). Existe un mayor aporte de partículas desde Cabo Corrientes y la costa de Jalisco y Colima hacia la región del Golfo de California (cuadrante central-izquierdo) y una conexión débil pero significativa desde las zonas de la boca del Golfo de California

hacia la región exterior de la península de Baja California (cuadrante central-superior). En la región de la península de Baja California representada por el cuadrante superior derecho observamos una matriz claramente dominada hacia el norte (arriba de la diagonal) sobre todo para la matriz de otoño (figura 35(b)), características contrarias a las matrices promedio de todo el periodo de estudio. Estas características generales tienen consecuencias particulares sobre zonas específicas. En promedio (figuras 19 y 20), el Golfo de Tehuantepec no envía partículas hacia las zonas más al norte, pero para los años Niño observamos que existe un flujo de partículas importante de sur a norte desde el Golfo de Tehuantepec y zonas vecinas hasta Cabo Corrientes. Bahía Vizcaíno (zona 25), que en promedio permanece relativamente aislada de las zonas vecinas, presenta una conexión importante hacia las zonas más al norte en años Niño con valores de conectividad de $\approx 10\%$ con la zona de Punta Concepción, la más al norte del área de estudio (zona 30). En las figuras 35(a) y 35(b) distinguimos una intrusión de partículas liberadas desde Cabo Corrientes, Bahía de Banderas y la boca del Golfo de California (zonas 9 a 14) hacia dentro del Golfo, llegando incluso hasta el alto Golfo de California y la zona de las grandes islas (zonas 17 y 18). Aunque se requiere un estudio más detallado y con un enfoque más regional para poder determinar los efectos en el patrón de conectividad sobre cada región, estos resultados son una primera aproximación que sugieren la existencia de cambios importantes en la dispersión y conectividad en las costas de México por efecto del fenómeno del Niño.

3.6. Relación con la circulación

En resumen, sobre la península de Baja California existe un flujo organizado hacia el ecuador paralelo a la península con mayor intensidad y más definido en primavera. La conectividad tiene dirección preferencial hacia el sur y escalas espaciales de conectividad máximas en primavera de al rededor de 400 km. Esta asimetría en la dirección de la conectividad se debe principalmente a la intensificación y organización en primavera de la corriente de California. Este patrón de circulación homogéneo en invierno y primavera, ha sido observado con datos *in situ* por Durazo (2015) y con datos de satélite por Strub y James (2000).

En mayo se presenta la primera época de transición de esta región y el transporte

paralelo a la península se rompe. En verano y otoño en la parte norte (aproximadamente a 28°N) se desarrolla un transporte de partículas hacia el polo paralelo a la costa que llega hasta las costas del sur de California y Punta Concepción en 34°N. En esta época existe conectividad desde las zonas 27 y 28 correspondientes a Ensenada y San Quintín con la zona 30 de Punta Concepción, recorriendo una distancia máxima de 300 km al norte de la posición de liberación para las partículas liberadas frente a Ensenada, asociada a la existencia de corriente costera hacia el polo desarrollada en esta época (Strub y James, 2000; Durazo, 2015). Al sur de 28 °N, desde la zona 27 (San Quintín) hasta la 20 (Todos Santos) la conectividad en verano no tiene dirección preferencial, y las escalas espaciales son menores respecto a la primavera, con distancias máximas a lo largo de la costa de 300 km hacia el sur y 150 km hacia el norte. Esta falta de dirección dominante en la conectividad sobre la península de Baja California en verano está asociada con una circulación dominada por estructuras de mesoescala, meandros, la generación de remolinos y la ocurrencia de surgencias costeras generadas por viento que sopla de norte a sur paralelo a la costa (Strub y James, 2000; Soto-Mardones *et al.*, 2004; Kurczyn *et al.*, 2012; Durazo, 2015).

Al sur de la península, frente a la zona de entrada al Golfo de California, no existe un patrón bien definido de transporte lagrangiano; las partículas que salen de esta zona no tienen una dirección preferencial. En primavera existe un transporte bien organizado de partículas de la punta de la península hacia el continente en la boca del California pero no más hacia el sur. Esto se ve reflejado en una completa desconexión entre las zonas en la península de Baja California y las zonas de Cabo Corrientes y más al sur para todas las épocas del año, y una conexión entre la exterior de la península y la parte interior (Bahía de la Paz) y la parte continental de la entrada al Golfo (Sinaloa y Nayarit). Esta desconexión está asociada a que la zona frente a la entrada al Golfo de California es una zona altamente energética, donde dominan estructuras de mesoescala y remolinos que se desprenden de Cabo Corrientes y la punta de la península, que se desplazan al oceano interior (Kurczyn *et al.*, 2012). Es así que la dinámica de esta zona actúa como una barrera física entre las partículas liberadas en la península de Baja California y las zonas más al sur de la costa de México.

Existen 3 zonas de alta retención de partículas durante todo el año en la península de Baja California, las dos más fuertes: Bahía Vizcaíno y la zona al sur de Punta Concepción, y en menor medida el Golfo de Ulloa. Sin embargo, los resultados sugieren que para años Niño la dirección preferencial de la conectividad sobre la península se invierte para los meses de verano y otoño, y que las partículas liberadas en esta región son advectadas hacia el norte. Como consecuencia Bahía Vizcaíno, que está generalmente desconectada del resto de la península, exporta partículas hacia las zonas más al norte hasta (34°N), y crea una conexión desde el Golfo de Ulloa hasta la zona frente de Ensenada. Los efectos de este transporte hacia el polo que encontramos característico de años Niño ha sido observado en estudios de zooplankton. Jiménez-Pérez y Lavaniegos (2004) reportaron la presencia de especies ecuatoriales, tropicales y subtropicales de copépodos y una ausencia de especies subárticas en la región de la península de Baja California asociada al transporte anómalo de sur a norte durante el Niño 1997-1998.

En la región sur, en invierno, la costa de Nayarit es una zona de retención de partículas y no existe un patrón de transporte definido en la entrada al golfo de California. A la altura de Cabo Corrientes comienza a desarrollarse un transporte preferencialmente de norte a sur paralelo a la costa que se define claramente en primavera y verano, con mayor intensidad en agosto y septiembre. La dirección preferencial en la conectividad es de norte a sur, existiendo conexión desde zonas como Cabo Corrientes hasta la costa de Oaxaca y en menor medida al Golfo de Tehuantepec. Este transporte norte-sur esta asociado principalmente con la corriente que fluye paralela a la costa de Mexico hacia el ecuador como parte de la circulación anticiclónica del “Domo de Tehuantepec” (Strub y James, 2002; Kessler, 2006). Las escalas espaciales de conectividad para la región son máximas en verano, alcanzando hasta 800 km al sur de su sitio de liberación para las zonas 6,7,8 y 9 (desde Michoacán hasta Cabo Corrientes). En julio-agosto-septiembre existe una alta conectividad entre las zonas de la entrada al Golfo de California y las zonas de Cabo Corrientes y más al sur producto de un patrón de transporte superficial bien claro desde la costa de Sinaloa y Nayarit hacia afuera del Golfo y hacia el sur paralelo a la costa sur de México.

En octubre comienza a debilitarse el transporte costero norte-sur sobre la costa sur de

México y en noviembre este patrón desaparece completamente, marcando así una época de transición en esta región. La conectividad en otoño no tiene una dirección preferencial y está caracterizado por una matriz de conectividad simétrica respecto a la diagonal principal y con escalas espaciales no mayores a 350 km al norte y al sur del sitio de liberación. En otoño se observa un aislamiento del Golfo de Tehuantepec respecto al resto de la costa de México ya que en promedio no recibe ni manda partículas hacia otras zonas. Esto se debe principalmente al flujo que existe desde la costa hacia el oceano interior en la costa de Oaxaca, aproximadamente entre 14° y 15° N y 96° y 97° W, como parte de la corriente Norecuatorial y la corriente de Costa Rica. Además en Otoño existe una incursión al norte y una entrada al Golfo de Tehuantepec de la corriente de Costa Rica (Strub y James, 2002; Kessler, 2006), aumentando el transporte desde el Golfo de Tehuantepec y costa de Oaxaca hacia el oceano interior, que sumado al debilitamiento de la circulación anticiclónica del “Domo de Tehuantepec” causan que disminuya la corriente costera y generan el aislamiento de las regiones más al sur de la costa de México.

El efecto de El Niño en el transporte de partículas sobre la costa sur de México es drástico, éste pasa de ser completamente dominante hacia el sur (en promedio) a ser de sur a norte de Junio a Diciembre. Esto tiene consecuencias directas en la conectividad y hace que las partículas liberadas en las zonas de la costa de Oaxaca y Golfo de Tehuantepec lleguen hasta Cabo Corrientes. De igual forma en años Niño existe una conexión anómala respecto al promedio desde el sur de México hacia la entrada del Golfo de California, y una mayor contribución de las zonas del Golfo de California hacia el lado exterior de la península de Baja California. En verano y otoño de años Niño existe una conexión anómala respecto al promedio desde el sur de México hacia la entrada del Golfo de California, y una mayor contribución de las zonas del Golfo de California hacia el lado exterior de la península de Baja California.

Se encontró que en general para tiempos de integración mayores a tres meses no aumenta el grado de conectividad ni las escalas espaciales de las trayectorias lagrangianas aumentan, lo cual ha sido ya reportado en otros trabajos como el de Roughan *et al.* (2011) en el que también estudian la conectividad en una zona de corriente costera al oeste de Australia.

Las zonas persistentes de alta retención encontradas en este trabajo, como Bahía Vizcaíno, Golfo de Ulloa y Golfo de Tehuantepec, coinciden con los centros de alta actividad biológica en el Pacífico Mexicano (Luch-Belda *et al.*, 2002) los podrían estar directamente relacionados con la capacidad de retención de estas zonas, y que la dispersión anómala y alta exportación de estas zonas en años Niño tenga implicaciones biológicas importantes. Nuestros resultados sugieren una conexión de estas zonas normalmente aisladas con las otras zonas costeras del Pacífico Mexicano en años Niño que podría actuar como repoblación o reconexión de estos centros de alta actividad biológica hacia las demás regiones del Pacífico Oriental Mexicano.

Capítulo 4. Conclusiones

Se utilizó un modelo lagrangiano “offline” utilizando datos de velocidad euleriana previamente calculados por el modelo ROMS, para estudiar los patrones de conectividad superficial y transporte lagrangiano del Océano Pacífico Mexicano, en el periodo de 1980-2006. Se encontró una variación estacional en los patrones de conectividad y transporte lagrangiano, así como una variación interanual importante asociada al fenómeno de el niño.

En invierno y primavera existe en promedio un transporte hacia el sur paralelo a la península de Baja California, que favorece una dirección preferencial de la conectividad superficial de norte a sur en esta región, asociada principalmente a la intensificación y organización de la Corriente de California. En verano y otoño la península se divide en dos regiones con comportamientos diferentes: Al norte de Punta Eugenia se tiene un transporte hacia el norte pegado a la costa, mientras que al sur de ésta no se logra definir un patrón bien organizado de transporte lagrangiano y la conectividad no tiene dirección preferencial. Las matrices de conectividad de verano y otoño se caracterizan por ser más simétricas, debido principalmente a la alta actividad de meandros, remolinos de mesoescala y surgencias costeras en esta región. La distancia máxima a lo largo de la costa que recorren las partículas lagrangianas en Baja California es de 450 km hacia el sur (en primavera) y de 300 km hacia el norte (en verano).

En la región sur de México, la conectividad superficial promedio es preferencialmente de norte a sur, asociada a un transporte de partículas paralelo a la costa desde la entrada al Golfo de California y la zona de Cabo Corrientes hacia el sur de México, con intensidades máximas en verano. Este transporte está asociado principalmente a la circulación anticiclónica del “Domo de Tehuantepec”. En otoño existe un aislamiento de las zonas en la costa de Oaxaca y el Golfo de Tehuantepec debido al debilitamiento de la corriente costera y la incursión al norte de la Corriente de Costa Rica. La región sur de México es más energética respecto a la región de la Península de Baja California, y las partículas recorren una distancia máxima a lo largo de la costa de 850 km hacia el sur en verano y de 250 km hacia el norte en invierno.

Los resultados de este trabajo muestran que existe una desconexión entre la región de Baja California y las zonas de la región Sur de México. La región frente a la entrada del Golfo de California no presenta un patrón bien definido de transporte lagrangiano y representa un bloqueo para las partículas liberadas en Baja California y el sur de México.

Se encontró que para simulaciones mayores a tres meses, la conectividad entre las diferentes zonas del Pacífico Mexicano no aumenta, e incluso comienza a disminuir. De igual forma la distancia máxima a lo largo de la costa que recorren las partículas no aumentan significativamente para partículas advectadas por más de 3 meses.

Nuestros resultados muestran que existen tres zonas persistentes de retención de partículas durante todo el año: la zona al sur de Punta Concepción, Bahía Vizcaíno, y el golfo de Ulloa; y dos zonas de retención en invierno: el Golfo de Tehuantepec y zona al frente de Nayarit.

Se encontró que para años niño existe una variación importante en los patrones de conectividad y transporte lagrangiano en el Pacífico Mexicano. En verano y otoño la dirección preferencial de conectividad se invierte y domina el transporte de sur a norte, de forma contraria al comportamiento promedio de todo el periodo de estudio. Estas variaciones interanuales en los patrones de dispersión y conectividad podrían tener implicaciones importantes en los procesos biológicos, pues conecta áreas que normalmente están aisladas de las demás regiones costeras, como el Golfo de Tehuantepec y Bahía Vizcaíno, con las regiones más al norte.

Este trabajo constituye una primera aproximación a la descripción de los patrones generales de transporte lagrangiano y conectividad en el pacífico Mexicano. Dado que la advección de partículas lagrangianas es un proceso no uniforme y altamente dependiente de las variaciones espaciales y temporales del campo de velocidad, es necesario un estudio más detallado de este fenómeno, enfocándose en un área menos extensa para poder estudiar con mayor detalle sus características. Se ha explorado de manera preliminar que existe una alta dependencia de los patrones de dispersión y conectividad con la distancia a la costa del sitio de liberación de las partículas, sin embargo para explorar esta idea es necesario enfocar el estudio en un área más pequeña y contar con mayor

resolución en el modelo numérico.

Lista de referencias

- Baumgartner, T. R. y Christensen, N. (1985). Coupling of the gulf of california to large-scale interannual climatic variability. *Journal of Marine Research*, **43**(4): 825–848.
- Baums, I. B., Paris, C. B., y Che, L. M. (2006). A bio-oceanographic filter to larval dispersal in a reef-building coral. **51**(5): 1969–1981.
- Carlton, J. T. (1987). Patterns of transoceanic marine biological invasions in the pacific ocean. *Bulletin of Marine Science*, **41**(2): 452–465.
- Coleman, M. a., Roughan, M., Macdonald, H. S., Connell, S. D., Gillanders, B. M., Kelaher, B. P., y Steinberg, P. D. (2011). Variation in the strength of continental boundary currents determines continent-wide connectivity in kelp. *Journal of Ecology*, **99**(4): 1026–1032.
- Cowen, R. K. (2000). Connectivity of Marine Populations: Open or Closed? *Science*, **287**(5454): 857–859.
- Cowen, R. K., Paris, C. B., y Srinivasan, a. (2006). Scaling of connectivity in marine populations. *Science (New York, N.Y.)*, **311**(5760): 522–7.
- Durazo, R. (2015). Seasonality of the transitional region of the california current system off baja california. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **120**(2): 1173–1196.
- Galindo, H. M., Olson, D. B., y Palumbi, S. R. (2006). Seascape genetics: A coupled oceanographic-genetic model predicts population structure of caribbean corals. *Current Biology*, **16**(16): 1622 – 1626.
- Gaxiola-Castro, R. y Durazo, R. (2010). *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California 1997-2007*.
- Godínez, V. M., Beier, E., Lavín, M. F., y Kurczyn, J. a. (2010). Circulation at the entrance of the Gulf of California from satellite altimeter and hydrographic observations. *Journal of Geophysical Research*, **115**(C4): C04007.
- Hamming, R. W. (1959). Stable predictor-corrector methods for ordinary differential equations. *J. ACM*, **6**(1): 37–47.
- Haza, A. C., Piterbarg, L. I., Martin, P., Özgökmen, T. M., y Griffa, A. (2007). A Lagrangian subgridscale model for particle transport improvement and application in the Adriatic Sea using the Navy Coastal Ocean Model. *Ocean Modelling*, **17**(1): 68–91.
- Jackett, D. R. y Mcdougall, T. J. (1995). Minimal adjustment of hydrographic profiles to achieve static stability. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **12**(2): 381–389.
- Jiménez-Pérez, L. y Lavaniegos, B. (2004). Changes in dominance of copepods off baja california during the 1997-1999 el niño and la niña. *Marine Ecology Progress Series*, **277**: 147–165.
- Joseph, B. y Swathi, P. S. (1999). Lagrangian particle transport in the Indian Ocean: A model study. *Journal of Geophysical Research*, **104**(C3): 5211.

- Kessler, W. S. (2006). The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, **69**(2-4): 181–217.
- Kim, S. y Barth, J. a. (2011). Connectivity and larval dispersal along the Oregon coast estimated by numerical simulations. *Journal of Geophysical Research*, **116**(C6): C06002.
- Kurczyn, J. a., Beier, E., Lavín, M. F., y Chaigneau, a. (2012). Mesoscale eddies in the northeastern Pacific tropical-subtropical transition zone: Statistical characterization from satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research*, **117**(C10): C10021.
- Largier, J. L. (2003). Considerations in estimating larval dispersal distances from oceanographic data. *Ecological Applications*, **13**(1): pp. S71–S89.
- Lavín, M. F. y Cabrera, C. (2003). Sea surface temperature anomalies in the Gulf of California. **42**(March 1983): 363–375.
- Lavín, M. F., Beier, E., Gómez-Valdés, J., Godínez, V. M., y García, J. (2006). On the summer poleward coastal current off SW México. *Geophysical Research Letters*, **33**(2): L02601.
- Lavín, M. y Marinone, S. (2003). An overview of the physical oceanography of the gulf of California. En: O. Velasco Fuentes, J. Sheinbaum, y J. Ochoa (eds.), *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Springer Netherlands, pp. 173–204.
- Luch-Belda, D., Elourdy-Garay, J., Lluch-Cota, S., y Ponce-Díaz, G., (eds.) (2002). *Centros de Actividad Biológica del Pacífico mexicano*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
- Marinone, S. (2012). Seasonal surface connectivity in the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **100**: 133–141.
- Marinone, S., Ulloa, M., Parés-Sierra, a., Lavín, M., 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*, (1-2): 149–158.
- Milne, W. E. (1926). Numerical integration of ordinary differential equations. *The American Mathematical Monthly*, **33**(9): pp. 455–460.
- Mitarai, S., Siegel, D., y Winters, K. (2008). A numerical study of stochastic larval settlement in the California Current system. *Journal of Marine Systems*, **69**(3-4): 295–309.
- NOAA (2015). El niño southern oscillation. Recuperado el 11 de mayo de 2015 de www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml.
- Null, J. (2015). El niño and la niña years and intensities based on oceanic niño index. Recuperado el 11 de mayo de 2015 de www.ggweather.com/enso/oni.htm.
- Palumbi, S. R. (2003). Population genetics, demographic connectivity, and the design of marine reserves. *Ecological Applications*, **13**(sp1): 146–158.

- Peguero-Icaza, M., Sanchez-Velasco, L., Lavin, M. F., Marinone, S. G., y Beier, E. (2010). 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.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., y Flannery, B. P. (1992). *Numerical Recipes in FORTRAN (2nd Ed.): The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press. New York, NY, USA.
- Qiu, Z. F., Doglioli, A. M., Hu, Z. Y., Marsaleix, P., y Carlotti, F. (2010). The influence of hydrodynamic processes on zooplankton transport and distributions in the North Western Mediterranean Estimates from a Lagrangian model. *Ecological Modelling*, **221**: 2816–2827.
- Rasmussen, L. L., Cornuelle, B. D., Levin, L. A., Largier, J. L., y Di Lorenzo, E. (2009). Effects of small-scale features and local wind forcing on tracer dispersion and estimates of population connectivity in a regional scale circulation model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **114**(C1): 1–18.
- Rossi, V., Van Sebille, E., Sen Gupta, A., Garçon, V., y England, M. H. (2013). Multi-decadal projections of surface and interior pathways of the Fukushima Cesium-137 radioactive plume. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **80**: 37–46.
- Roughan, M., Macdonald, H. S., Baird, M. E., y Glasby, T. M. (2011). Modelling coastal connectivity in a Western Boundary Current: Seasonal and inter-annual variability. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **58**(5): 628–644.
- Sala, E., Aburto-Oropeza, O., Paredes, G., Parra, I., Barrera, J. C., y Dayton, P. K. (2002). A general model for designing networks of marine reserves. *Science (New York, N.Y.)*, **298**(5600): 1991–3.
- Sánchez-Paz, Arturo (2010). White spot syndrome virus: an overview on an emergent concern. *Journal of Veterinary Research*, **41**(6): 43.
- Santiago-García, M., Marinone, S., y Velasco-Fuentes, O. (2014). Three-dimensional connectivity in the Gulf of California based on a numerical model. *Progress in Oceanography*, **123**: 64–73.
- Shchepetkin, A. F. y McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, **9**(4): 347–404.
- Siegel, D., Kinlan, B., Gaylord, B., y Gaines, S. (2003). Lagrangian descriptions of marine larval dispersion. *Marine Ecology Progress Series*, **260**: 83–96.
- Siegel, D. a., Mitarai, S., Costello, C. J., Gaines, S. D., Kendall, B. E., Warner, R. R., y Winters, K. B. (2008). The stochastic nature of larval connectivity among nearshore marine populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**(26): 8974–9.

- Soto-Mardones, L., Parés-Sierra, A., Garcia, J., Durazo, R., y Hormazabal, S. (2004). Analysis of the mesoscale structure in the imecocal region (off baja california) from hydrographic, adcp and altimetry data. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **51**(6–9): 785–798.
- Strub, P. y James, C. (2000). Altimeter-derived variability of surface velocities in the California Current System: 2. Seasonal circulation and eddy statistics. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **47**(5-6): 831–870.
- Strub, P. T. y James, C. (2002). Altimeter-derived surface circulation in the large-scale NE pacific gyres. *Progress in Oceanography*, **53**(2-4): 163–183.
- Watson, J., Mitarai, S., Siegel, D., Caselle, J., Dong, C., y McWilliams, J. (2010). Realized and potential larval connectivity in the Southern California Bight. *Marine Ecology Progress Series*, **401**: 31–48.
- Wood, S., Paris, C. B., Ridgwell, a., y Hendy, E. J. (2013). Modelling dispersal and connectivity of broadcast spawning corals at the global scale. *Global Ecology and Biogeography*, pp. n/a–n/a.
- Wyrтки, K. (1965). Surface currents of the eastern tropical pacific ocean. *Inter-A. Trop. Tuna Comm. Bull.*, **9**(5): 63–97.
- Xue, H., Incze, L., Xu, D., Wolff, N., y Pettigrew, N. (2008). Connectivity of lobster populations in the coastal Gulf of Maine. *Ecological Modelling*, **210**(1-2): 193–211.

Apéndice A. Modelo lagrangiano

Para simular la trayectoria lagrangiana de las partículas se utilizó un modelo *offline*. Las trayectorias se calculan a partir de un campo Euleriano de velocidad previamente calculado (en este caso por el modelo ROMS). La posición de cada partícula p un tiempo t ($\vec{x}_p(t)$) se obtiene de resolver la ecuación diferencial de primer orden:

$$\frac{d\vec{x}_p}{dt} = \vec{u}(\vec{x}, t) , \quad (14)$$

al integrar obtenemos:

$$\vec{x}_p(t) = \vec{x}_p(t=0) + \int_0^t \vec{u}(\vec{x}, \tau) d\tau . \quad (15)$$

Aunque el modelo lagrangiano está construido para obtener la posición de la partícula en un campo espacial tridimensional, en este trabajo la componente de la velocidad vertical w se hace cero, para tener solamente trayectorias en la horizontal y de ahora en adelante se omite de las ecuaciones.

El modelo resuelve la ecuación de movimiento (15) en las coordenadas del modelo (coordenadas curvilíneas) y utiliza un método predictor de Milne de cuarto orden y un método corrector de Hamming de cuarto orden (Press *et al.*, 1992; Milne, 1926; Hamming, 1959).

El método predictor-corrector de Milne–Hamming utiliza un polinomio de grado n utilizando los n pasos de tiempo anteriores para extrapolar el valor de la función en el paso de tiempo siguiente. El modelo utiliza el método de Milne cuarto orden que utiliza los pasos de tiempo $n-3$, $n-2$, $n-1$ y n para calcular la posición de la partícula en el tiempo $n+1$ (ecuación (17)). Posteriormente utiliza el método corrector de Hamming de cuarto orden para corregir la posición de la partícula en el tiempo $n+1$ incluyendo el valor de la función calculado en el punto extrapolado por calculado por el método predictor, es decir utilizando los pasos de tiempo $n-3$, $n-2$, $n-1$, n , y $n+1$ (ecuación (18)).

El método de Milne de cuarto orden para la ecuación diferencial

$$\frac{dx}{dy} = f(x, y) , \quad (16)$$

encuentra \tilde{y} en el tiempo $t+1$:

$$\tilde{y}^{t+1} = y^{t-3} + \frac{4h}{3} (2f^{t-2} - f^{t-1} + 2f^t) + \mathcal{O}(h^5) ; \quad (17)$$

y el método de Hamming utiliza el valor de la función f evaluada en \tilde{y} para encontrar y en el tiempo $t+1$:

$$y^{t+1} = \frac{1}{8} (9y^t - y^{t-2}) + \frac{3h}{8} (-f^{t-1} + 2f^t + 2\tilde{f}^{t+1}) , \quad (18)$$

donde

$$\tilde{f}^{t+1} = f(\tilde{y}^{t+1}) .$$

Entonces el modelo calcula la posición de una partícula lagrangiana i para el paso de tiempo $t+1$ (x_i^{t+1}) utilizando las velocidades u y v eulerianas, de la siguiente forma:

$$\tilde{x}_i^{t+1} = x_i^{t-3} + \frac{4h}{3} (2u(x_i^{t-2}, y_i^{t-2}) - u(x_i^{t-1}, y_i^{t-1}) + 2u(x_i^t, y_i^t)) , \quad (19)$$

$$\tilde{y}_i^{t+1} = y_i^{t-3} + \frac{4h}{3} (2v(x_i^{t-2}, y_i^{t-2}) - v(x_i^{t-1}, y_i^{t-1}) + 2v(x_i^t, y_i^t)) , \quad (20)$$

$$x_i^{t+1} = \frac{1}{8} (9x_i^t - x_i^{t-2}) + \frac{3h}{8} (-u(x_i^{t-1}, y_i^{t-1}) + 2u(x_i^t, y_i^t) + 2u(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)) , \quad (21)$$

$$y_i^{t+1} = \frac{1}{8} (9y_i^t - y_i^{t-2}) + \frac{3h}{8} (-v(x_i^{t-1}, y_i^{t-1}) + 2v(x_i^t, y_i^t) + 2v(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)) , \quad (22)$$

Para resolver la ecuación ecuación (14) se utilizó un intervalo temporal de $h = 0.01$ días. Dado que las salidas del modelo son cada 2 días la velocidad en cada paso temporal del modlo lagrangiano se calcula con una interpolación lineal (ecuación (24)) en el tiempo para el campo de velocidad (u y v). Para un tiempo t tal que $t_1 < t < t_2$, donde t_1 y t_2 son dos tiempos consecutivos en las salidas del modelo euleriano:

$$\vec{u}(t, x, y) = (1 - H)\vec{u}(t_1, x, y) + H\vec{u}(t_2, x, y) , \quad (23)$$

$$\vec{v}(t, x, y) = (1 - H)\vec{v}(t_1, x, y) + H\vec{v}(t_2, x, y) , \quad (24)$$

donde

$$H = \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} .$$

La trayectoria de una partícula no pasa exactamente todo el tiempo por un punto de la malla del campo de velocidad euleriano, para poder resolver la ecuación de movimiento en cada paso de tiempo es necesario obtener el campo de velocidad en cada punto de la trayectoria de la partícula $\vec{u}(x_p, y_p)$. Para esto se hace una interpolación bilineal (ecuación (26)) de los cuatro puntos más cercanos de la malla del modelo euleriano $(u_{i,j}, v_{i,j})$ a la posición de la partícula (x_p, y_p) , donde el subíndice i,j indica el punto de malla del modelo. Entonces para un tiempo determinado el campo de velocidad euleriano en la posición de la partícula (x_p, y_p) es:

$$u(x_p, y_p) = (1 - h_x)(1 - h_y) u_{i,j} + h(1 - h_y) u_{i+1,j} + h_x q_y u_{i+1,j+1} + h_y(1 - h_x) u_{i,j+1} , \quad (25)$$

$$v(x_p, y_p) = (1 - h_x)(1 - h_y) v_{i,j} + h(1 - h_y) v_{i+1,j} + h_x q_y v_{i+1,j+1} + h_y(1 - h_x) v_{i,j+1} , \quad (26)$$

donde x_j y x_{j+1} son los puntos de malla del modelo más cercanos por la izquierda y la derecha de la posición de la partícula (similar para y_j y y_{j+1}); y h_x y h_y las distancias al punto de malla inmediato inferior en x y y respectivamente:

$$h_x = x_p - x_j ,$$

$$h_y = y_p - y_k ;$$

esto se ilustra en la figura A.1.

Además de advectar las partículas con el campo euleriano de velocidad, en cada paso de tiempo se da una perturbación aleatoria a la posición de la partícula, de manera que la posición final de una partícula lagrangiana para un tiempo $t+1$ está determinada por la ecuación:

$$\vec{x}(t + 1) = \Delta^m(\vec{x}(t)) + \sigma \vec{dw} , \quad (27)$$

donde Δ^m representa la advección del esquema Milne–Hamming (ecuaciones 20 a 22), σ es la magnitud de la perturbación aleatoria y \vec{dw} es un vector de dos dimensiones

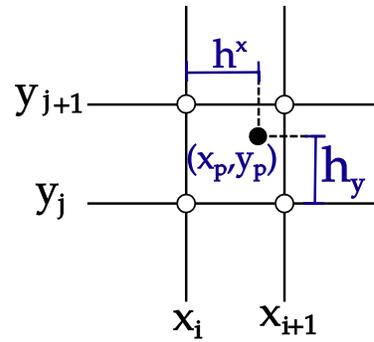


Figura A.1: Esquema gráfico interpolación bilineal espacial del campo de velocidad.

con componentes aleatorias de media 0 y varianza 1. El objetivo de incluir un efecto aleatorio es repetir el experimento numerosas veces, y así obtener validez estadística en los resultados del modelo lagrangiano. Se encontró que el valor $\sigma = 0.001$ funciona bien para nuestra zona de estudio, integrando la ecuación (15) con un paso temporal de $\Delta t = 0.01$ días.

El modelo calcula para cada partícula la posición en la malla del modelo (horizontal y vertical), longitud, latitud y profundidad y escribe las salidas en formato NetCDF.

Apéndice B. Matrices de conectividad promedio

En este apéndice se muestran las matrices de conectividad promedio para el periodo de 1980-2006. En cada figura se muestran las matrices para partículas liberadas en cada mes del año e integradas durante 1, 2, 3 y 4 meses (paneles a),b),c) y d) respectivamente). Se calculó también la conectividad para tiempos mayores a 4 meses, sin embargo se encontró que el grado de conectividad alcanza su máximo en 3 meses, en algunos casos en 4, y para tiempos mayores disminuye.

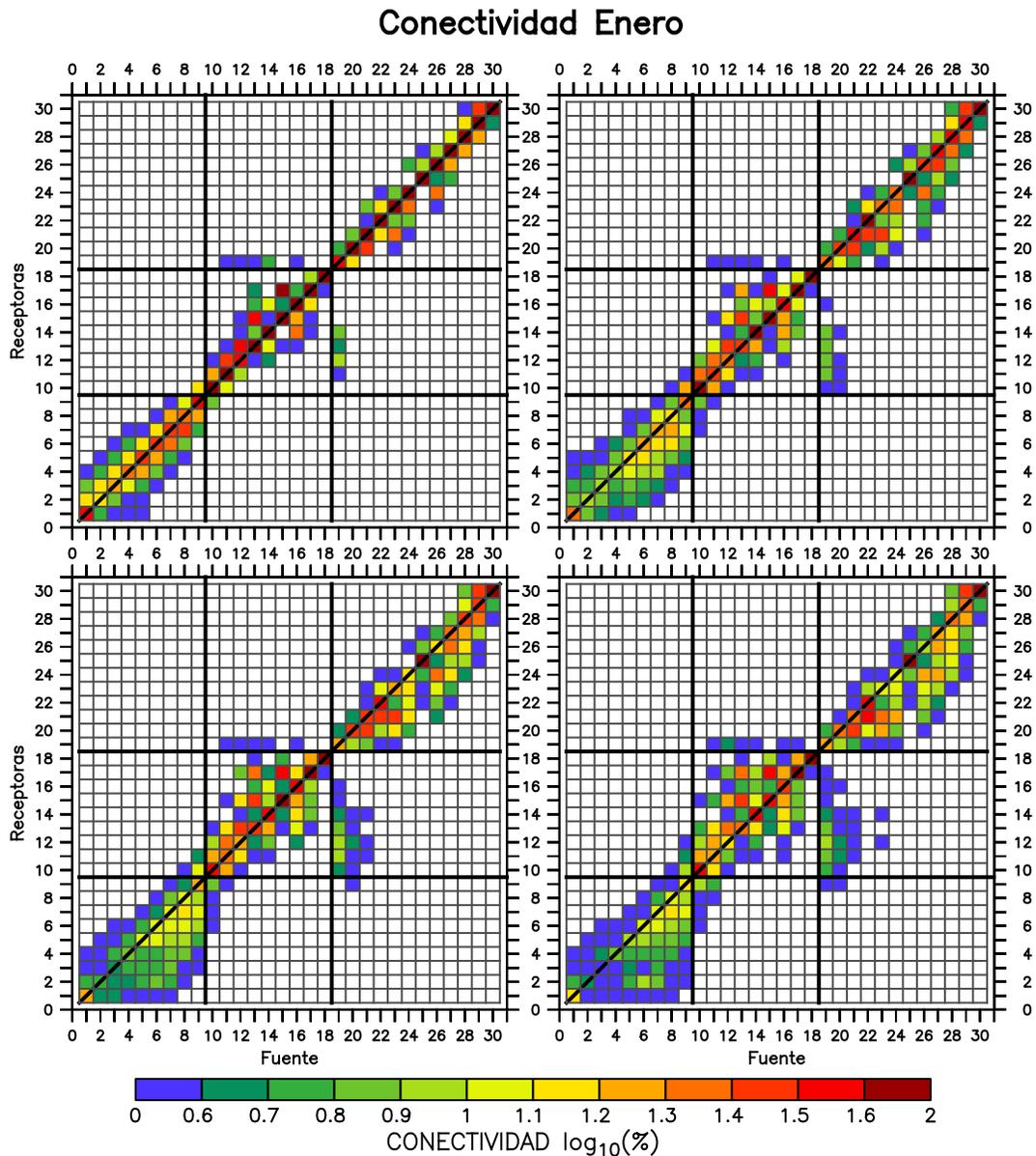


Figura B.1: Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en enero. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.

Conectividad Febrero

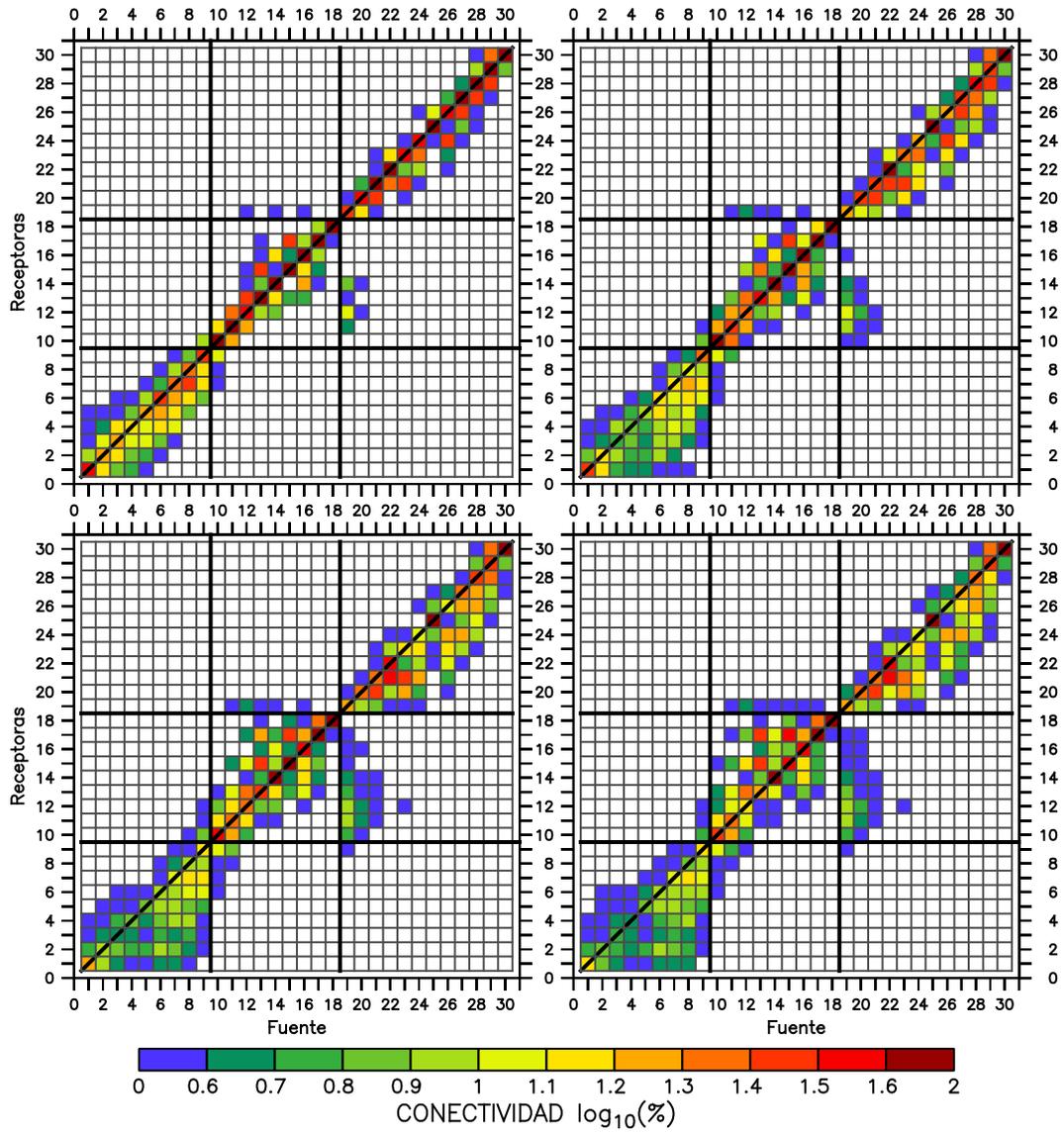


Figura B.2: Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en febrero. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.

Conectividad Marzo

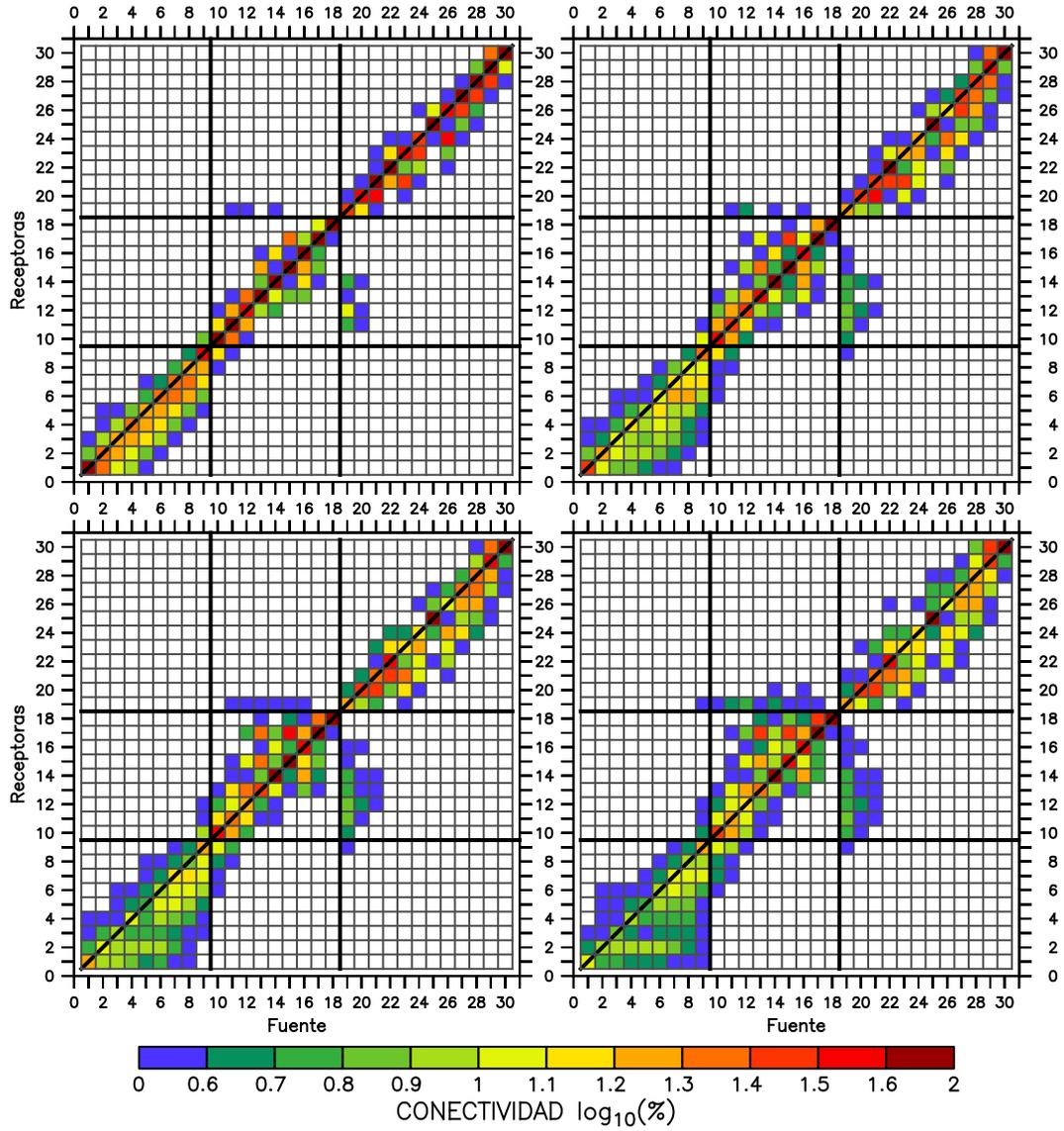


Figura B.3: Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en marzo. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.

Conectividad Abril

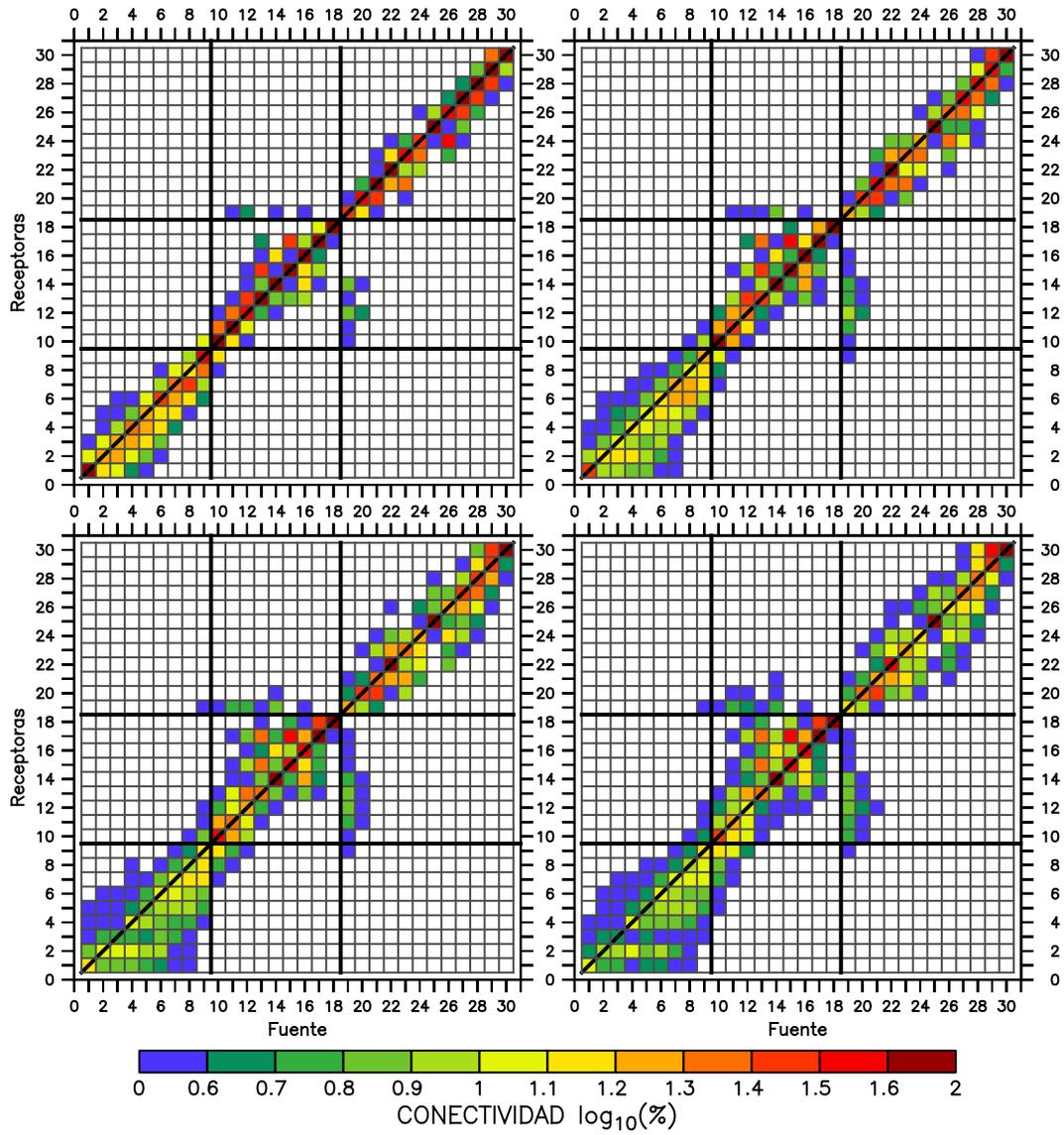


Figura B.4: Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en abril. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.

Conectividad Mayo

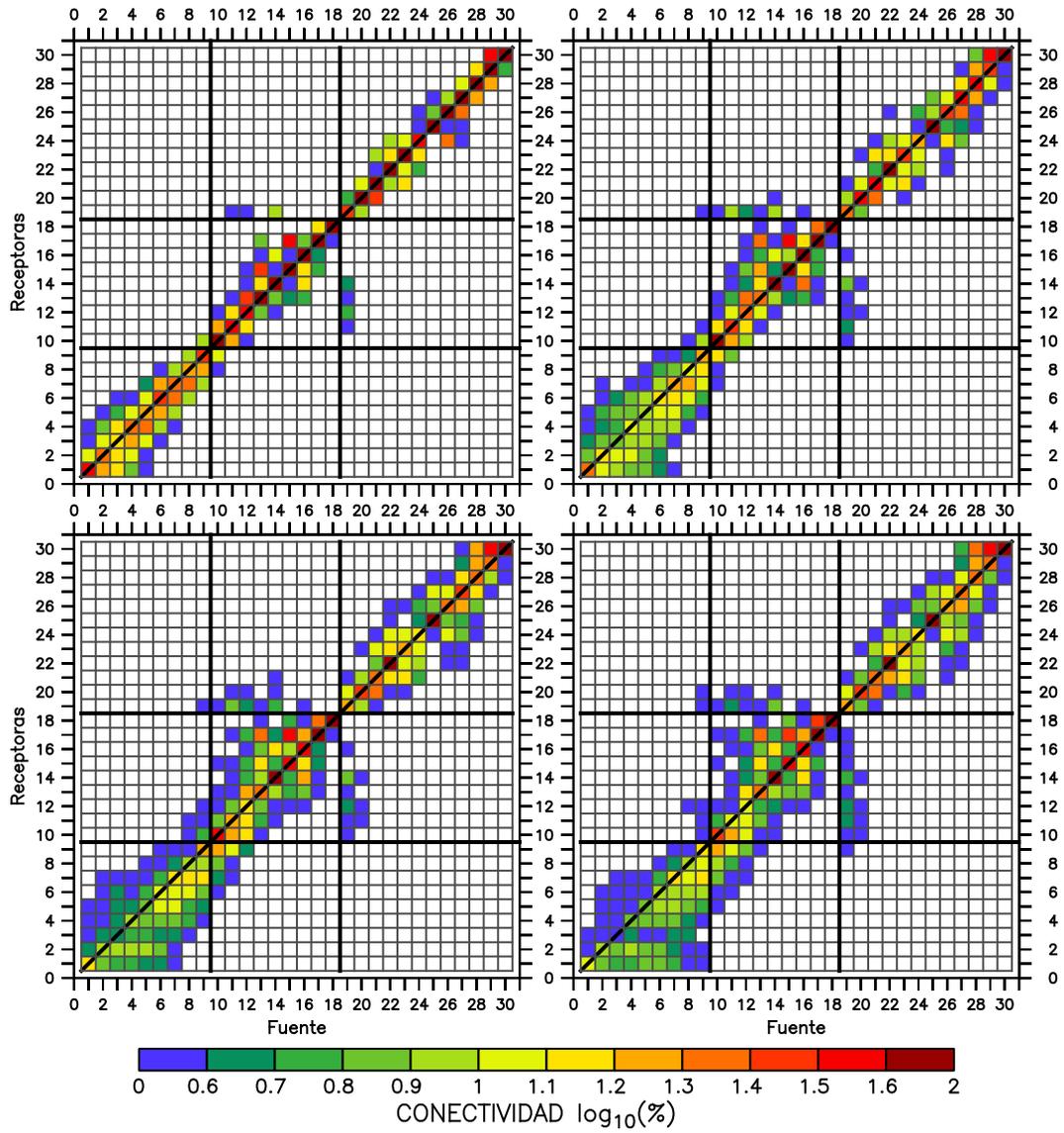


Figura B.5: Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en mayo. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.

Conectividad Junio

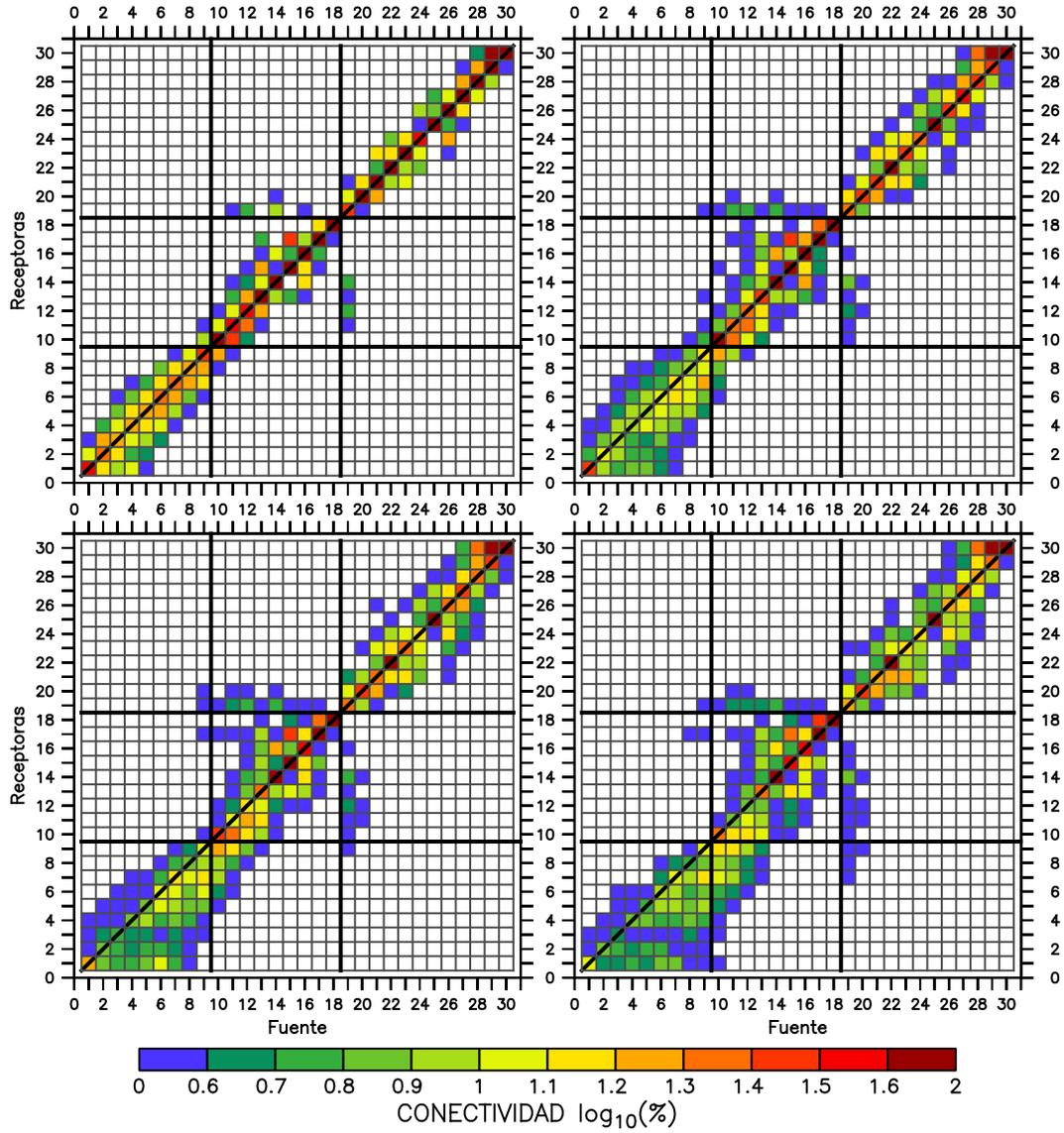


Figura B.6: Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en junio. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.

Conectividad Julio

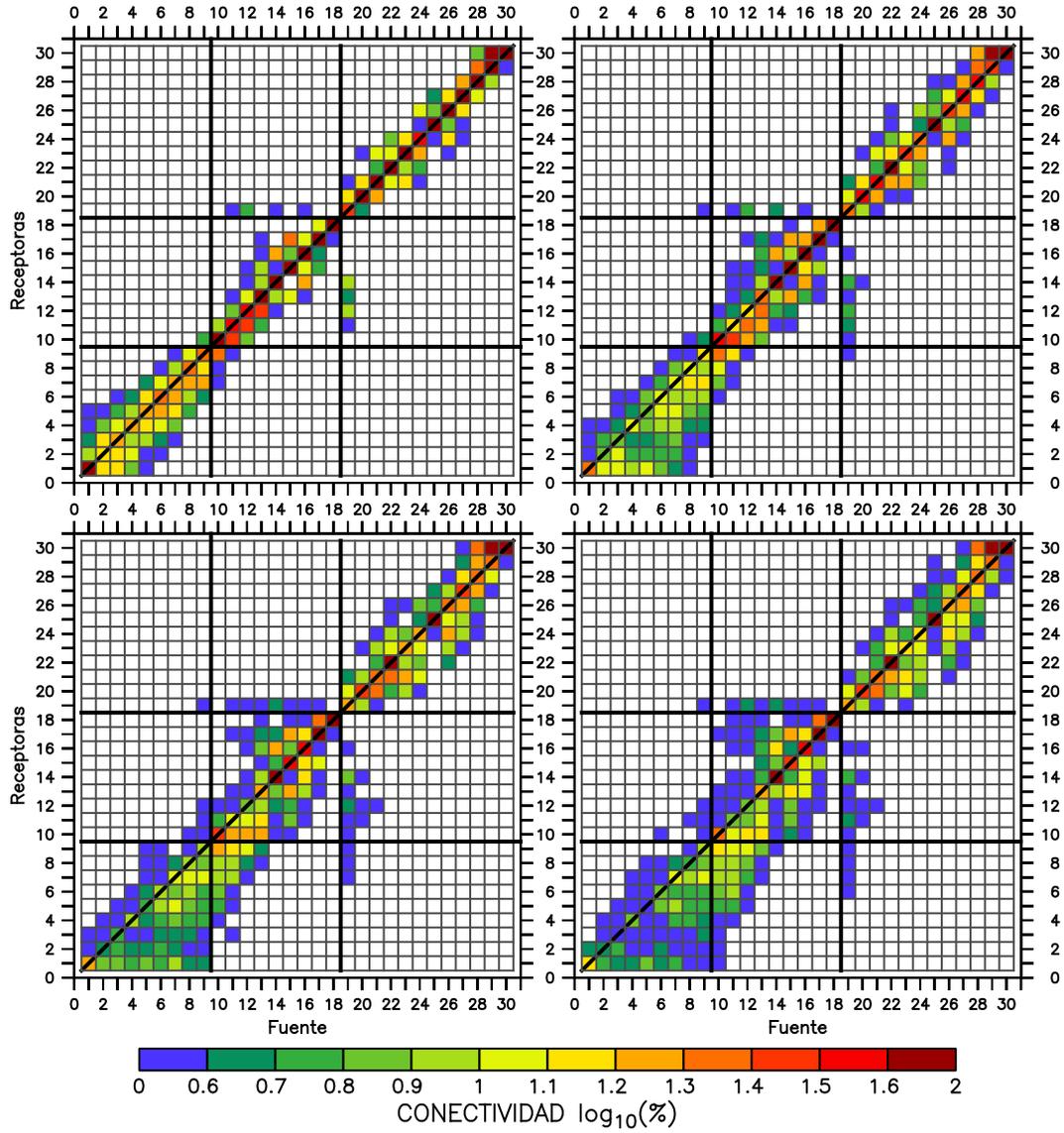


Figura B.7: Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en julio. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.

Conectividad Agosto

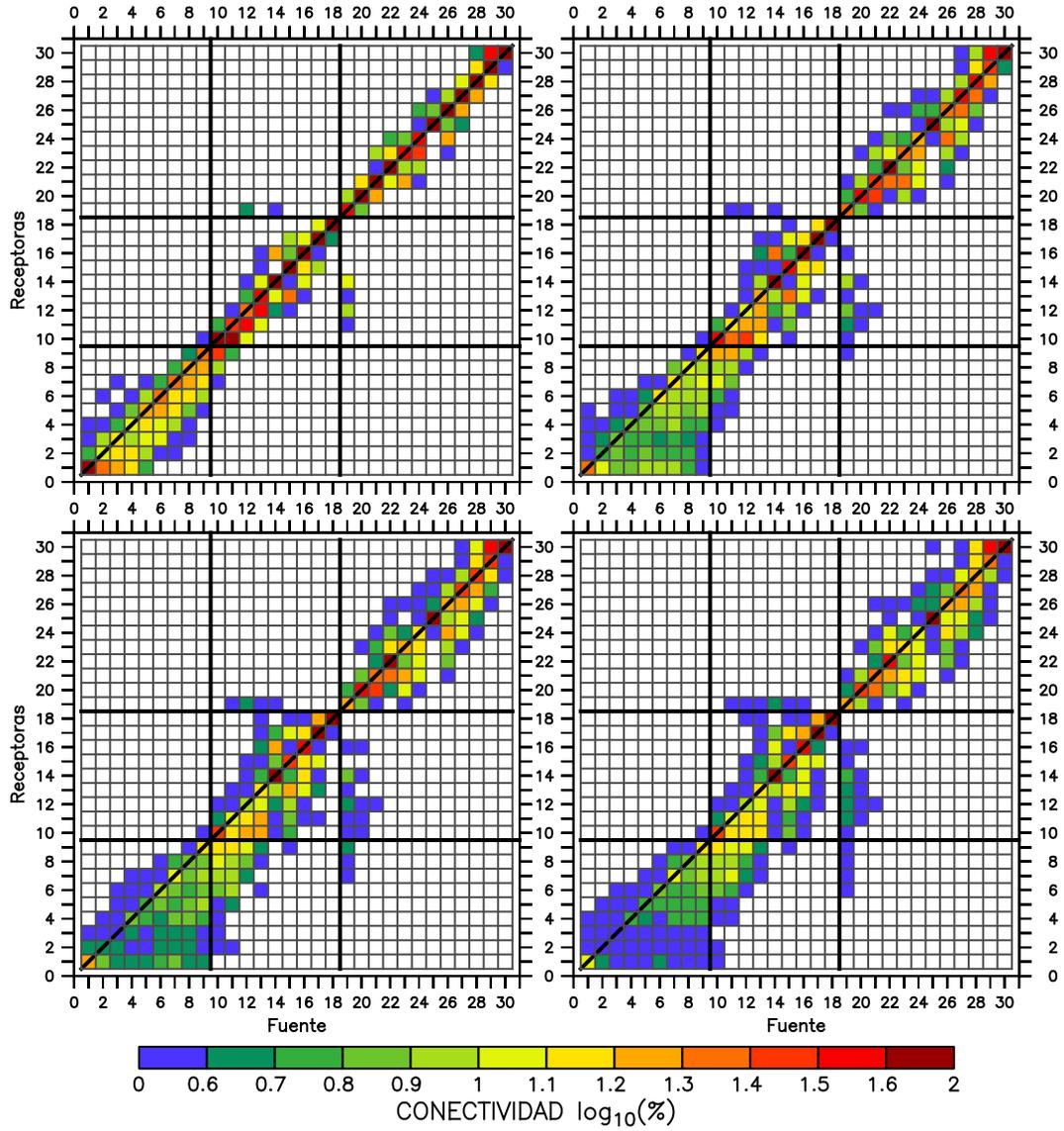


Figura B.8: Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en agosto. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.

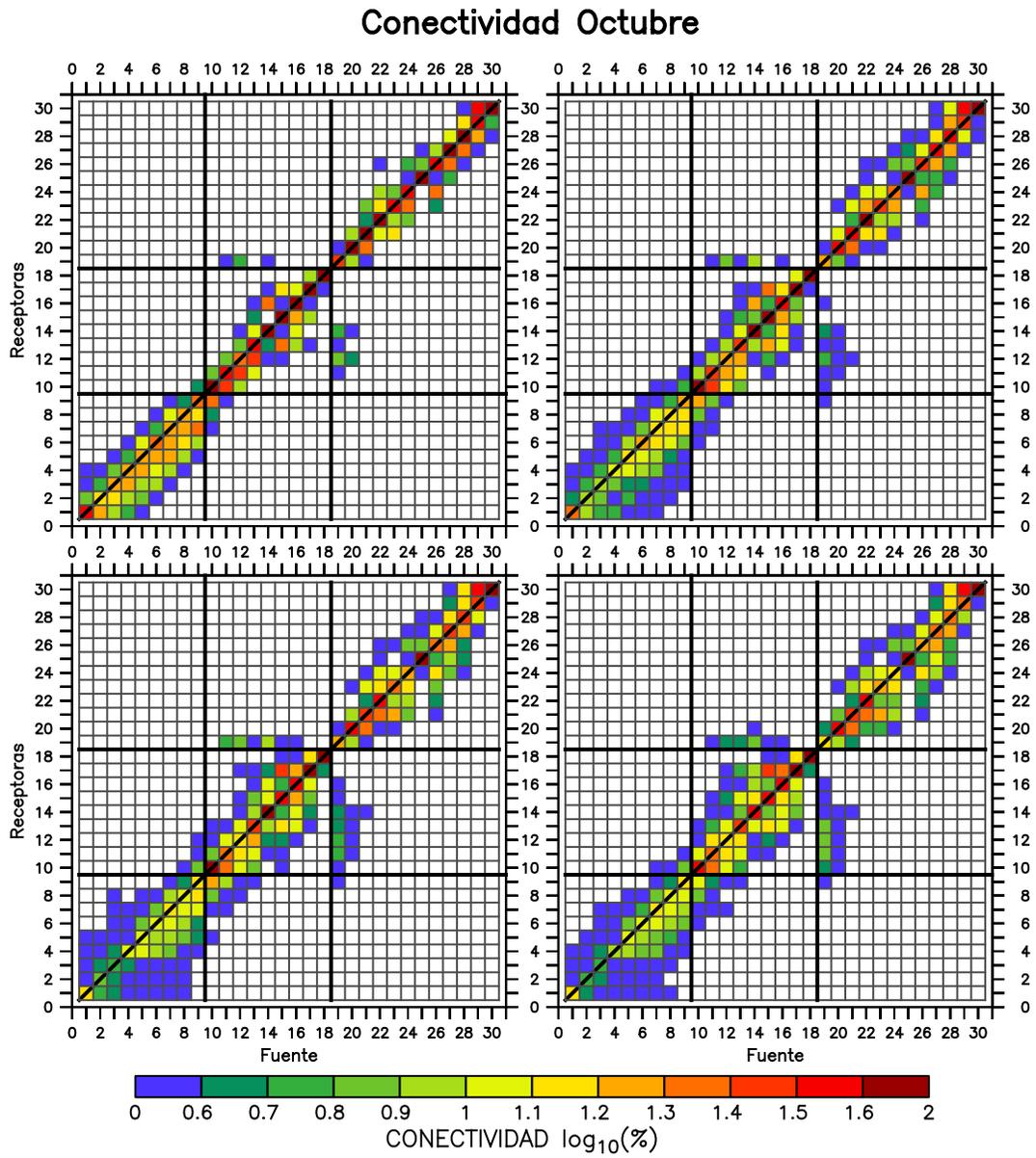


Figura B.10: Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en octubre. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.

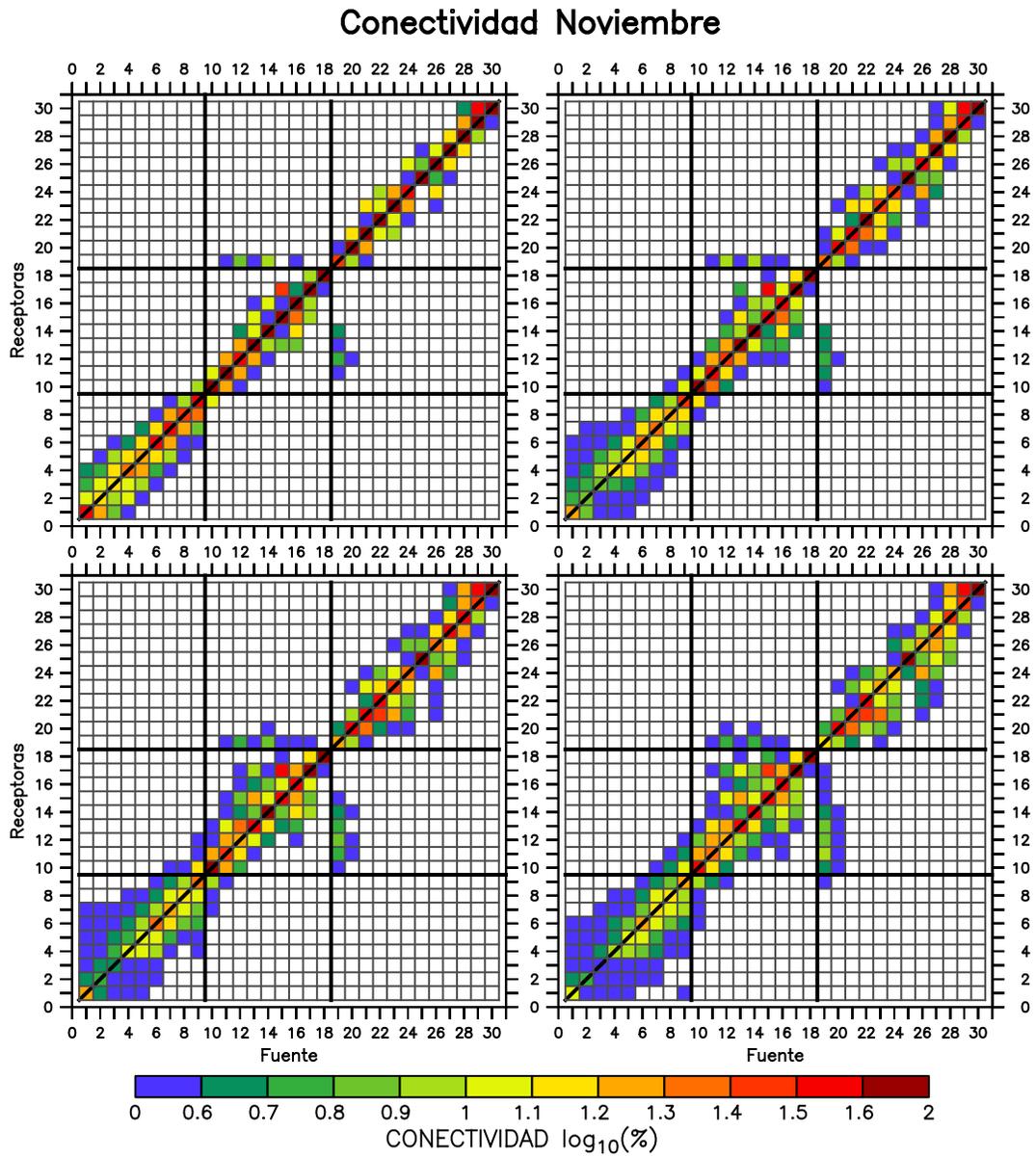


Figura B.11: Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en noviembre. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.

Conectividad Diciembre

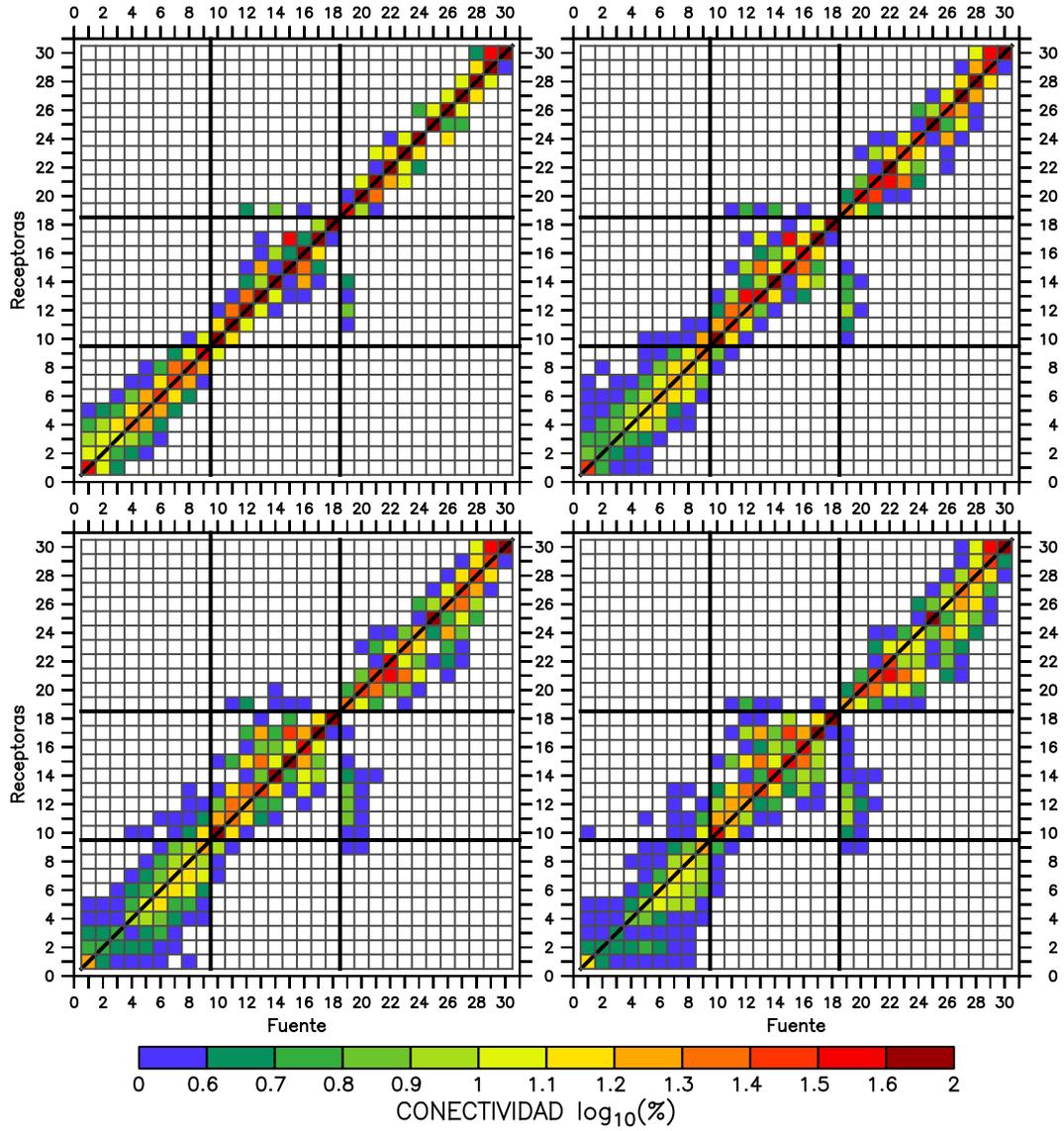


Figura B.12: Conectividad promedio y desviación estándar para partículas liberadas en diciembre. Al cabo de a) 1 mes, b) 2 meses, c) 3 meses y d) 4 meses.