

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



**“Propagación de Ondas Atrapadas en la Costa del
Pacífico Mexicano”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

OCEANÓLOGO

PRESENTA:

GIOVANNI DURANTE BARAJAS

Ensenada, Baja California, México. noviembre, 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

“Propagación de Ondas Atrapadas en la Costa del Pacífico
Mexicano”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

OCEANÓLOGO

PRESENTA:

Giovanni Durante Barajas

APROBADA POR:

Comité de tesis

Dr. José Antonio Martínez Alcalá
Director

Dra. Sorayda Aime Tanahara Romero
Sinodal

Dra. Ana Laura Flores Morales
Secretaria

Resumen

Con el fin de determinar el efecto de la forma de la línea de costa sobre la propagación de ondas de Kelvin costeras (OKC), se llevó a cabo un conjunto de experimentos numéricos, en los cuales se utilizó un modelo numérico no lineal, de gravedad reducida, con una resolución espacial relativamente alta ($\Delta x = \Delta y = 1 \text{ km}$). Se hicieron incidir OKC a través de la frontera sur del dominio, y se analizó la energía presente en el dominio una vez que la OKC salía de éste (energía residual). Se determinó que las irregularidades de la línea de costa son capaces de extraer energía de las OKC en forma de remolinos, que poseen principalmente energía cinética. Las características de los remolinos (radio, amplitud, y velocidad en la periferia) varían en función de parámetros como la amplitud y la escala temporal de las OKC incidente, así como de las irregularidades de la costa y la latitud. Simulaciones realizadas en un dominio con la costa del Pacífico Mexicano, mostraron que sin importar la escala temporal de la OKC incidente, el Golfo de California concentra la mayor parte de la energía residual. De forma puntual, Punta Eugenia, Cabo San Lucas, Topolobampo, Cabo Corrientes y en menor medida el Golfo de Tehuantepec, fueron sitios donde se genera gran parte de la energía residual, debida en gran medida a la generación de remolinos en los vértices de las discontinuidades. Se observó que OKC de depresión producen porcentajes mayores de energía residual que OKC de elevación, es decir, OKC de depresión pierden más energía al interactuar con costas irregulares (entre 10 y 17 % más) que las OKC de elevación.

Dedicatoria

Este trabajo es (temporalmente) la culminación del conjunto de esfuerzos de mi familia, maestros y amigos, quienes han confiado en que mis pasiones me llevarán por el camino de la felicidad y quienes han dejado parte de su persona en mi carácter y en mi criterio.

Me resulta difícil redactar este texto a manera de dedicatoria, dado que el único beneficiado por el esfuerzo y el tiempo necesarios para escribir esta tesis soy yo. Sin embargo, debo reconocer que este trabajo es un símbolo, una forma de valorar y corresponder al apoyo que he recibido de José Roberto Durante Barajas, Thelma Barajas Ramírez, Claudia Susana Durante Barajas y mis hermanos Luis de Jesús Durante Barajas y Jamín Hazzel Durante Barajas.

Agradecimientos

El agradecimiento para mi familia no puede ser expresado en un texto, ya que es altamente probable que sin el apoyo que he recibido de ellos, no habría sido posible entender la vida de la forma en que hoy lo hago. Agradezco profundamente a José Roberto Durante Barajas, por jugar un papel crucial en mi formación como individuo. A Thelma Barajas Ramírez por cumplir el papel de madre de toda la familia. A mi mamá por creer en mí. A mis hermanos por aguantarme. A Yessenia I. Morelos Sepúlveda por compartir gran parte de su vida conmigo y acompañarme en los momentos importantes. Agradezco de forma especial a los profesores: José Antonio Martínez Alcalá, Sorayda Aimé Tanahara Romero, Rafael Hernández Walls, Francisco Javier Aranda Manteca, Beatriz Martín Atienza, Rubén Castro Valdez, por participar de forma activa en la formación de jóvenes científicos; oceanólogos íntegros, con visión y pensamiento crítico. A mis amigos: Eduardo Ashida Hernández, Eliot Eduardo De La Cruz González, Mariana Ana Laura Sáenz Ávalos, Albert Stephen Salazar Corrales y Elias Meneses Quiroz, por compartir conmigo las experiencias de la licenciatura sin condiciones.

Entre todas las cosas que conforman mi percepción de la realidad, hay algo de ustedes y lo considero muy importante.

Índice

Dedicatoria	III
Agradecimientos	IV
1. Introducción	1
1.1. Área de estudio	2
1.2. Antecedentes	3
1.3. Hipótesis y objetivos	6
2. Metodología	7
2.1. Modelo	7
2.2. Forzamiento: Ondas de Kelvin costeras	9
3. Resultados y discusiones	11
3.1. Propagación de OKC en un dominio de costa recta	13
3.2. Propagación de una OKC a lo largo de costas irregulares	18
3.2.1. Propagación de una OKC de elevación a lo largo de costas irregulares	20
3.2.2. Propagación de una OKC de depresión a lo largo de costas irregulares	25
3.2.3. Energía residual producida por OKC a lo largo de costas irregulares	31
3.3. Efecto del ancho de una discontinuidad en la línea de costa sobre la propagación de una OKC	34
3.4. Propagación de una OKC de diferentes amplitudes a lo largo de una costa irregular	40
3.5. Propagación de OKC de diferentes escalas temporales a lo largo de una costa irregular	44
3.6. Propagación de una OKC a lo largo de una costa discontinua en distintas latitudes	50
3.7. Propagación de OKC a lo largo de la costa del Pacífico Mexicano . . .	56
4. Conclusiones	72
Referencias	74

Índice de figuras

1.	Área de estudio. Se señalan en las principales discontinuidades presentes en la costa del Pacífico Mexicano. PE: Punta Eugenia, CSL: Cabo San Lucas, GC: Golfo de California, Top: Topolobampo, CC: Cabo Corrientes, GTh: Golfo de Tehuantepec.	3
2.	Componente de velocidad v en la frontera sur en diferentes tiempos de simulación. La amplitud de la velocidad en función del tiempo tiene una forma Gaussiana.	10
3.	Ejemplo ilustrativo de la evolución de la energía integrada en todo el dominio en función del tiempo. La región sombreada muestra el tiempo a partir del cual la energía que permanece en el dominio (pero la OKC ha salido) es la E residual.	13
4.	Diagrama de dispersión lineal de ondas de Kelvin y de Rossby. El eje vertical representa la frecuencia $\omega(s^{-1})$. El eje horizontal representa la componente $k(m^{-1})$ del vector número de onda. Se utilizan escalas distintas en el eje horizontal con fines ilustrativos. Se señala con un punto color rojo la frecuencia máxima para ondas de Rossby.	15
5.	Elevación de la interfase η . El color representa el desplazamiento de la interfase en metros. Además se muestran en líneas negras los contornos de 10, 15, 20 y 60 m de elevación de la interfase, para diferentes días de simulación.	16
6.	a) Elevación de la interfase (η) en el día 30 de simulación. Las líneas negras representan los contornos de 10, 15, y 20 m de elevación. b) Diagrama de Hovmöller de η en un transecto horizontal del dominio, a lo largo de la línea punteada en la Figura 6a	17
7.	Tipos de línea de costa implementadas en esta sección. En gris se muestra la costa. a) Ensanchamiento y. b) Angostamiento del canal. Las flechas indican la trayectoria de la onda incidente. D (señalado con rojo) representa el ancho de la discontinuidad, definido como $D = c/f = Rd_{15} = 75$ km, donde Rd_{15} es el radio de deformación a los 15° N de latitud para ondas con celeridad $c = 2.8 \text{ ms}^{-1}$	19

8. Desplazamiento de la interfase η en los días 9,12,y 15 La OKC incidente es de elevación ($\eta_0 > 0$) en ambos casos. En los paneles superiores el canal se ensancha. En el renglón inferior el canal se angosta. las líneas negras muestran los contornos de elevación de la interfase de 5, 30 y 60 m. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km. 21

9. Acercamiento a la zona de generación de remolinos. La escala de color se muestra el desplazamiento de la interfase (η) y en flechas negras muestran las corrientes (se muestra 1 de cada 5 flechas), correspondientes a los días 9 (a y c) y 10 (b y d) de simulación. Para un canal que se ensancha (panel superior) y un canal que se angosta (panel inferior). Las unidades en ambos ejes son de distancia en km. 22

10. Energía cinética (color) y desplazamiento de la interfase (contornos) en el día 23 de simulación para un canal que se ensancha (a) y uno que se angosta (b). Las flechas indican el sentido de rotación. Las escalas de los ejes tienen unidades de km. La línea en rojo representa la trayectoria del máximo de energía cinética, tomando como punto de partida el lugar donde se forma el primer remolino, señalado con un punto negro. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km. 24

11. **Similar a la Figura 8 pero para una onda incidente de depresión** ($\eta_0 < 0$). Desplazamiento de la interfase η , en distintos días de simulación. En los paneles superiores el canal se ensancha. En el renglón inferior el canal se angosta. Además se resaltan los contornos de -10, -20 y -40 m (líneas en negro). Las unidades en ambos ejes son de distancia en km. 26

12. 12. Similar a la Figura 9 pero para una onda incidente de depresión. Acercamiento a la zona de generación de remolinos. La escala de color se muestra el desplazamiento de la interfase (η) y en flechas negras muestran las corrientes (se muestra 1 de cada 5 flechas), correspondientes a los días 9 (a y c) y 10 (b y d) de simulación. Para un canal que se ensancha (panel superior) y un canal que se angosta (panel inferior). Las unidades en ambos ejes son de distancia en km. 27

13. **Similar a la Figura 10 pero para una onda incidente de depresión.** Energía cinética (color) y desplazamiento de la interfase (contornos) en el día 23 de simulación para un canal que se ensancha (a) y uno que se angosta (b). Las flechas indican el sentido de rotación. Las escalas de los ejes tienen unidades de km. La línea en rojo representa la trayectoria del máximo de energía cinética, tomando como punto de partida el lugar donde se forma el primer remolino, señalado con un punto negro. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km. 28
14. Diagrama de interacción de las corrientes de la OKC con las distintas discontinuidades. a) Discontinuidad de ensanchamiento del canal. b) Discontinuidad de angostamiento del canal. Las flechas color rojo representan la dirección de las corrientes de una OKC de elevación, y las azules las una de depresión. 29
15. Desplazamiento de la interfase (escala de color). Las flechas indican los vectores de velocidad (mostrando 1 de cada 5 flechas), en el día 15 de simulación. OKC de elevación ante: a) Ensanchamiento del canal. b) Angostamiento del canal. Y OKC de depresión donde el canal: c) Se ensancha y d) Se angosta. 30
16. Porcentaje de la energía total que permanece dentro del dominio una vez que la onda incidente ha salido de éste (Energía residual). Las líneas continuas representan la energía de OKC de elevación ($\eta_0 > 0$), mientras las líneas discontinuas corresponden a la energía residual de OKC de depresión ($\eta_0 < 0$). Los colores de las líneas indican la energía mecánica (negro), cinética (azul) y potencial (rojo). Las líneas verticales señalan los valores de D que coinciden con Rd y con $2Rd$, a $15^\circ N$ de latitud, para ondas con celeridad $c = 2.8 \text{ ms}^{-1}$. Los diagramas del panel inferior muestran la forma de la línea de costa según el signo de D . El ancho cero ($D = 0$) corresponde a una costa recta. 35
17. Desplazamiento de la interfase η (color) y vectores de velocidad (flechas negras, se muestran 1 de cada 5 flechas) en el día 15 de simulación para un canal que se angosta ($D < 0$). Los paneles superiores corresponden a OKC de elevación para D : a) -200 km , b) $-Rd = -75 \text{ km}$ y c) -33 km . Los paneles inferiores corresponden a OKC de depresión para D : d) -200 km , e) $-Rd = -75 \text{ km}$ y f) -33 km . Las unidades en ambos ejes son de distancia en km. 37

18. **Similar a la Figura 17, pero para canales que se ensanchan.**
Desplazamiento de la interfase η (color), y vectores de velocidad (flechas negras, se muestran 1 de cada 5 flechas) en el día 15 de simulación en un dominio cuyo canal se angosta ($D < 0$). Los paneles superiores corresponden a OKC de elevación para D : a) 200 km, b) $D = Rd = 75$ km y c) 33 km. Los paneles inferiores corresponden a OKC de depresión en los casos donde D es: d) 200 km, e) $D = Rd = 75$ km y f) 33 km. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km. 38
19. Energía residual en función de la amplitud de la OKC incidente. En el eje horizontal inferior, se muestran las amplitudes de la OKC incidente (η_0), mientras el eje horizontal superior muestra la amplitud que la OKC produciría en la superficie. Los colores de las líneas indican la energía mecánica (negro), cinética (azul) y potencial (rojo). 41
20. Acercamiento a la zona de generación de remolinos. El mapa de color muestra el desplazamiento de la interfase y las flechas representan las corrientes observadas en el día 16.67 de simulación (se muestran 1 de cada 5 flechas). Los paneles superiores corresponden a OKC de depresión con η_0 de: a) -43 m, b) -71 m, y c) -128 m. Los paneles inferiores corresponden a OKC de elevación con η_0 de: d) 43 m, e) 71 m, y c) 128 m. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km. 42
21. Desplazamiento de la interfase en diferentes tiempos de simulación. Simulación de una OKC de amplitud negativa, con un escala temporal de 1 día. Se muestran con línea negra, los contornos de η de -20 , -40 , -60 , 5 y 20 m. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km. . . 45
22. Desplazamiento de la interfase (η) 8.5 días después de que la OKC ha salido del dominio, para OKC incidentes de elevación con escala temporal de a) 6 d., b) 9 d., c) 12 d. paneles superiores. Los paneles inferiores muestran simulaciones de OKC de depresión con escala temporal de: d) 6 d., e) 9 d., y f) 12 d. La línea negra representa los contornos de η con un intervalo de contorno de 10 m. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km. 47

23.	Energía residual en función de la escala temporal de las OKC. Las líneas discontinuas corresponden a OKC de depresión. Las líneas sólidas corresponden a OKC de elevación. Los colores de las líneas indican la energía mecánica residual (negro), energía cinética residual (azul) y la energía potencial residual (rojo). La línea gris vertical denota el periodo inercial máximo del dominio (2.41 días).	48
24.	Radio de deformación Rd (km) en función de la latitud. Los puntos rojos señalan la latitud de algunos de los principales rasgos en la línea de costa en el Pacífico mexicano. GTh (Golfo de Tehuantepec), CC (Cabo Corrientes) y PE (Punta Eugenia).	51
25.	Acercamiento a los remolinos generados en algunas de las simulaciones de OKC de elevación. En color se muestra el desplazamiento de la interfase y los vectores de velocidad de las corrientes se muestran con flechas negras, en el día 16.67 de simulación. La latitud de la discontinuidad es a) 15° N, b) 25° N, c) 40° N y d) 60° N. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km.	52
26.	Similar a la Figura 25 pero para OKC de depresión. Acercamiento a los remolinos generados en algunas de las simulaciones. En color se muestra el desplazamiento de la interfase y los vectores de velocidad de las corrientes se muestran con flechas negras, en el día 16.67 de simulación. La latitud de la discontinuidad es a) 15° N, b) 25° N, c) 40° N y d) 60° N. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km.	53
27.	Porcentaje de la energía total que permanece dentro del dominio una vez que la onda incidente ha salido de éste (Energía residual). Las líneas continuas representan la energía residual de OKC de elevación ($\eta_0 > 0$), mientras las líneas discontinuas corresponden a la energía residual de OKC de depresión ($\eta_0 < 0$). Los colores de las líneas indican la energía mecánica (negro), cinética (azul) y la potencial (rojo).	54
28.	e) Dominio numérico (1003 x 3820 <i>pts</i>), costa del Pacífico Mexicano. Las líneas punteadas delimitan las zonas: a) Pacífico de Baja California (<i>PBC</i>). b) <i>GC</i> . c) <i>CC</i> . d) <i>GTh</i> . Las zonas grises representan puntos en tierra y, la zona blanca representa el océano. <i>SQ</i> : San Quintín, <i>PSC</i> : Puerto San Carlos, <i>CSL</i> : Cabo San Lucas, <i>Top</i> : Topolobampo.	57

29. Desplazamiento de la interfase (η) para diferentes días de simulación. En esta Figura la onda incidente es de depresión y su escala temporal es de 10 días. Las unidades de ambos ejes son de longitud en km. 59
30. Porcentaje de energía residual integrada horizontalmente en cada zona y desplazamiento de la interfase (η). Las líneas representan la energía residual total (negro), cinética (azul) y potencial (rojo), para las zonas de a) PBC, b) GC, c) CC, y d) GT. La onda incidente es de depresión. 64
31. **Similar a la Figura 30 pero para OKC de elevación.** Porcentaje de energía residual integrada horizontalmente en cada zona y desplazamiento de la interfase. Las líneas representan la energía residual total (negro), cinética (azul) y potencial (rojo), para las zonas de a) PBC, b) GC, c) CC, y d) GT. 65
32. a) Vorticidad relativa residual integrada horizontalmente, dividida por la vorticidad planetaria (f) En el litoral del Pacífico (línea continua) y en el GC (línea punteada). b) Porcentaje de energía mecánica (línea negra continua), cinética (azul) y potencial (roja), integradas en x . Tanto en a) como en b), la línea continua corresponde al litoral del Pacífico, mientras la línea discontinua corresponde a la energía residual en el GC. c) Desplazamiento de la interfase una vez que la OKC ha salido del dominio. 68
33. **Similar a la Figura 32 pero para OKC de elevación.** a) Vorticidad relativa residual integrada horizontalmente, dividida por la vorticidad planetaria (f) En el litoral del Pacífico (línea continua) y en el GC (línea punteada). b) Porcentaje de energía mecánica (línea negra continua), cinética (azul) y potencial (roja), integradas en x . Tanto en a) como en b), la línea continua corresponde al litoral del Pacífico, mientras la línea discontinua corresponde a la energía residual en el GC. c) Desplazamiento de la interfase una vez que la OKC ha salido del dominio. 69
34. Número de remolinos (color) observados cada $1/2^\circ$, provenientes de la base de datos de Shelton y AVISO (www.aviso.altimetry.fr/). Se muestran sólo remolinos a 500 km de la costa. 71

Índice de tablas

I.	Porcentaje de energía mecánica total que se convierte en energía residual para una OKC que se propaga a lo largo de una costa recta.	14
II.	Porcentaje de energía mecánica total que permanece en el dominio (residual) una vez que la onda incidente ha salido del mismo. Para costas de: A : Angostamiento del canal (Figura 5b). E : Ensanchamiento del canal (Figura 5a).	32
III.	Porcentajes de la energía incidente (total) que queda en el dominio una vez que la OKC incidente ha salido de éste (energía residual), integrada en todo el dominio. E. temp. es la escala temporal en días de la OKC.	60
IV.	Porcentaje de energía mecánica total presente en el dominio una vez que la OKC ha salido de éste (Energía residual %), integrado por zona. PBC : Pacífico de Baja California. CC : Cabo Corrientes. GTh : Golfo de Tehuantepec. GC : Golfo de California. E. temp. es la escala temporal en días de la OKC incidente. <i>D</i> y <i>E</i> corresponden a OKC de depresión y elevación respectivamente.	61

1. Introducción

La circulación oceánica cerca de la costa constituye un sistema altamente energético y variable. El estudio de este ambiente marino representa un reto para la oceanografía moderna, debido en parte a la interacción entre algunos procesos oceánicos y las estructuras geomorfológicas costeras, que añaden complejidad al sistema, además de la alta variabilidad, que presenta un rango bastante amplio de escalas temporales (Huthnance *et al.*, 1986; Tomczak, 2000). Existen diversas estructuras geológicas que pueden tener un impacto considerable en la circulación de las regiones costeras. Por ejemplo la plataforma continental, el quiebre de la plataforma hacia el talud (pendiente continental), cabos, puntas, golfos, bahías, e islas, así como algunas estructuras sumergidas. Todas estas estructuras interactúan con los procesos característicos de esta zona, como por ejemplo, corrientes costeras, surgencias inducidas por viento, variabilidad del nivel del mar debido a mareas o a ondas atrapadas a la costa, por mencionar algunos (Huthnance *et al.*, 1986; Yankovsky y Chapman, 1995).

Las ondas atrapadas a la costa (**OAC**) son perturbaciones que se propagan a lo largo de la costa. En general, su periodo es mayor que el inercial (Enfield y Allen, 1983; Wilkin y Chapman, 1990; Brink, 1991; Tomczak, 2000). La amplitud y velocidad de corrientes son máximas en la costa y disminuyen de forma exponencial mar adentro, viajando con la costa a la derecha (izquierda) de la dirección de propagación en el hemisferio norte

(sur), por lo que se propagan en sentido ciclónico alrededor de las grandes cuencas oceánicas (Wilkin y Chapman, 1990; Brink, 1991; Tomczak, 2000). Las ondas de Kelvin costeras (**OKC**) son un caso particular de OAC. Este tipo de ondas se propaga empleando las costas como guía, a diferencia de las OAC, las OKC requieren que el fondo sea constante (fondo plano), para que no existan corrientes perpendiculares a la propagación (Mejía-Trejo, 1985). Se encuentran en balance geostrófico en la dirección perpendicular a la de propagación y son no dispersivas (Huthnance *et al.*, 1986; Brink, 1991; Tomczak, 2000; Cushman-Roisin y Beckers, 2011).

1.1. Área de estudio

A lo largo de la costa del Pacífico Mexicano, existen múltiples irregularidades en la línea de costa, y es bien sabido que al propagarse sobre una costa irregular las OAC pueden transferir energía hacia el flujo medio, remolinos u otro tipo de ondas (Wilkin y Chapman, 1990; Martínez y Allen, 2004a; Zamudio *et al.*, 2007 y 2008; Flores-Morales, 2012). Algunas de las discontinuidades más remarcables en la costa del Pacífico Mexicano son: El Golfo de Tehuantepec (**GTh**), Punta Eugenia (**PE**), Cabo Corrientes (**CC**) y, el Golfo de California (**GC**) dentro del cual la costa es altamente irregular (Figura 1).

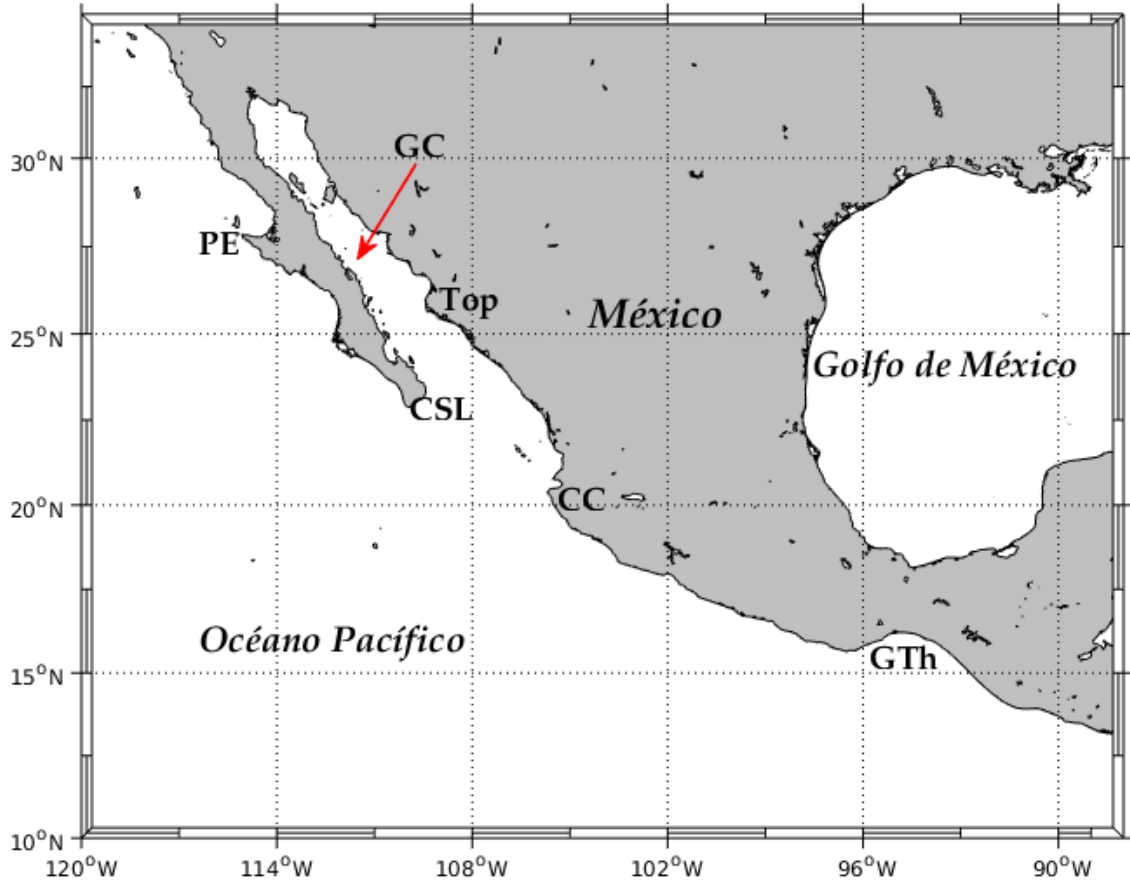


Figura 1: Área de estudio. Se señalan en las principales discontinuidades presentes en la costa del Pacífico Mexicano. PE: Punta Eugenia, CSL: Cabo San Lucas, GC: Golfo de California, Top: Topolobampo, CC: Cabo Corrientes, GTh: Golfo de Tehuantepec.

1.2. Antecedentes

En la costa del Pacífico Mexicano las OAC han sido detectadas como anomalías del nivel del mar coherentes en estaciones a lo largo de la costa. Se han reportado OAC con periodos de 2.7 a 20 días, amplitudes de 10 a 30 cm en superficie y celeridades de 1.62 a 5.79 ms^{-1} (Enfield y Allen, 1983; Grimshaw y Allen, 1988). Estas ondas se asocian principalmente a vientos intensos producidos por los ciclones tropicales, y son observadas principalmente de mayo a noviembre (Christensen *et al.*, 1983; Enfield y Allen, 1983;

Gutiérrez *et al.*, 2014). Así mismo se han observado OAC con periodos de 30 a 90 días, asociadas a fluctuaciones atmosféricas en el Pacífico ecuatorial central (Enfield y Allen, 1983; Gutiérrez *et al.*, 2014). Por su parte (Flores-Morales *et al.*, 2012), observó a través de datos de altimetría satelital una señal de OAC con periodos de escala semianual, y celeridad de alrededor de 1.8 ms^{-1} . Estas ondas también se asocian a fluctuaciones atmosféricas en el Pacífico ecuatorial, relacionadas con El niño y la oscilación del sur (**ENOS**) (Kessler *et al.*, 1995; Yuan, 2005).

A través de modelos numéricos de ecuaciones primitivas tridimensionales, se ha mostrado que la interacción entre las OAC y las irregularidades de la zona costera es un mecanismo importante en la formación de remolinos de mesoescala y submesoescala (Martínez y Allen, 2004b; Zamudio *et al.*, 2007 y 2008; Flores-Morales *et al.*, 2012).

El impacto de la topografía sobre OAC que se propagan en el GC ha sido estudiado por (Martínez y Allen, 2004a y 2004b), quienes usando el modelo tridimensional Princeton Ocean Model (Blumberg y Mellor, 1987), con una resolución espacial de $\Delta x = \Delta y = 3 \text{ km}$, observaron que las OAC que se propagaban hacia el norte del GC, cambiaban su trayectoria hacia el sur al llegar a la zona de los umbrales de las Grandes Islas y que la amplitud de las ondas disminuía en un 50 %, mostrando que parte de la energía de ondas incidentes permanece dentro del golfo. Así mismo, determinaron que los cambios en las propiedades de las OAC mostraron alta sensibilidad

a la amplitud y a la escala temporal (periodo) de la onda incidente, sin embargo, no se esclarece la relevancia de la línea de costa en la propagación de OAC en la región del GC.

En 2012, Flores-Morales utilizó una adaptación del modelo tridimensional ROMS (Regional Ocean Modeling System), con una resolución espacial de $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ km}$, para estudiar la propagación de OKC en una cuenca idealizada de dimensiones similares al GC, pero con costas rectas y fondo plano. Encontró que las OAC son capaces de generar remolinos aún sobre una costa recta debido a inestabilidades barotrópicas. También observó que se producen en los vértices de la línea de costa.

Otras zonas cercanas a discontinuidades de la línea de costa han sido reportadas por mostrar actividad de remolinos de mesoescala. En el GC, se han detectado remolinos a través de observaciones satelitales del color del océano (Pegau *et al.*, 2002), así como por medio de modelos numéricos (Martínez y Allen, 2004b; Zamudio *et al.*, 2007). En estos trabajos, se describe un tren de remolinos asociado a una corriente costera hacia el norte, que interactúa con un cabo que se ubica cerca de Topolobampo, Sinaloa.

Por otro lado, en un estudio estadístico de remolinos basado en observaciones satelitales de altimetría (Kurczyn *et al.*, 2010), se mostró que PE, Cabo San Lucas (CSL) y CC son zonas importantes para la generación de remolinos “costeros” en la costa Pacífico. La generación de estos remolinos

también se asocia a cambios abruptos de la morfología costera.

El GTh también es conocido por su intensa actividad de remolinos de mesoescala. Por ejemplo, a través de datos de altimetría satelital desde 1992 hasta 2004, (Palacios y Bograd, 2005) realizaron un censo de remolinos en la región del GTh. En su trabajo mencionan que los remolinos se producen principalmente en una franja latitudinal que va de los 8 a los 15° *N*. Los remolinos que se producen en esta franja son predominantemente anticiclones, con radios entre 50 y 200 *km* y con un tiempo de vida medio de 143 días. Otros autores relacionan la actividad de remolinos con intensos vientos intermitentes provenientes del Golfo de México (conocidos como vientos del norte, nortes o tehuanos), que se intensifican al pasar a través del Paso de Chivela (Stumpf, 1975; Clarke, 1988; Álvarez *et al.*, 1989; Trasviña *et al.*, 1995).

1.3. Hipótesis y objetivos

El objetivo de este proyecto es estudiar el efecto que tiene la línea de costa en la propagación de OKC a lo largo del Pacífico Mexicano. Nuestra hipótesis es que una discontinuidad en la línea de costa puede extraer energía de las OKC, y que la eficiencia de extracción está relacionada de alguna manera con la geometría de las discontinuidades, así como con algunas características de la onda incidente. Para ello se implementó un modelo numérico sencillo (modelo de ecuaciones de aguas someras, de gravedad reducida. Véase sección 2), de relativamente alta resolución. El modelo no

contiene disipación y es completamente no lineal. Se diseñó una serie de experimentos numéricos con el fin de determinar el efecto que tiene la línea de costa en la propagación libre de OAC.

2. Metodología

2.1. Modelo

Para estudiar la evolución que tienen ondas atrapadas a la costa al propagarse a lo largo de la costa del Pacífico Mexicano, se utiliza un modelo numérico, que resuelve el siguiente sistema de ecuaciones, también conocido como ecuaciones de aguas someras o modelo de capa y media.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g' \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g' \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [hu]}{\partial x} + \frac{\partial [hv]}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Este sistema de ecuaciones no lineales describe un océano de dos capas inmiscibles de agua: la superior es una capa activa de densidad ρ_1 y la inferior de densidad ρ_2 donde la velocidad es cero. El grosor de la capa activa está dado en cualquier instante por $h = H_0 + \eta(x, y, t)$, donde H_0 es la pro-

fundidad de la interfase en reposo y η es el desplazamiento de la interfase alrededor de esta posición (Ho). El valor de η es definido negativo si la interfase se desplaza por encima de la profundidad de reposo, por lo que tiene el mismo signo que tendría el desplazamiento de la superficie del mar para un flujo baroclínico. $u(x, y, t)$ y $v(x, y, t)$ son las componentes de la velocidad horizontal en la capa superior integradas verticalmente. El sistema de referencia está definido de tal forma que $u > 0$ es hacia el este, y $v > 0$ es hacia el norte, g' es la gravedad reducida definida como $g' = g(\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$, f es el parámetro de Coriolis, (definido como $f = 2\Omega \sin(\lambda)$, donde λ es la latitud, y $\Omega = 2\pi/86400s$, es la velocidad angular de la Tierra.

Para resolver el sistema de ecuaciones de forma numérica, las ecuaciones 1, 2 y 3 se discretizaron utilizando diferencias finitas centradas espacialmente, sobre una malla tipo “C” (Arakawa *et al.*, 1988), con una resolución de $\Delta x = \Delta y = 1 \text{ km}$. Para la discretización en tiempo, se utilizó el esquema explícito de salto de rana. El paso de tiempo Δt fue definido bajo la condición CFL, modificada con un factor obtenido experimentalmente para satisfacer estabilidad en sistemas no lineales: $\Delta t = 0.2\Delta x/c$.

Como condiciones de frontera, al norte se utiliza una capa absorbente no radiativa, aplicada sobre el 10% de los puntos de la malla en la dirección norte-sur (Lavelle y Thacker, 2007). Sobre las fronteras este y oeste, la condición de frontera es cerrada con deslizamiento (slip condition). En la frontera sur se implementa el forzamiento de OKC, especificando la ve-

locidad perpendicular a la frontera sur como una función de la coordenada perpendicular a la costa (que es una función exponencial) y una función gaussiana determina la estructura temporal de la onda. La frontera sur se transforma gradualmente en una frontera cerrada una vez que se introduce la OKC. Las condiciones iniciales son de reposo, es decir $u = v = \eta = 0$ en todo el dominio.

2.2. Forzamiento: Ondas de Kelvin costeras

El modelo es forzado con una onda de kelvin costera (**OKC**), cuya forma analítica es obtenida resolviendo las ecuaciones 1, 2 y 3 en su forma lineal.

La OKC se introduce en el dominio numérico especificando la velocidad meridional (v) en la frontera sur, es decir:

$$v_f = v_0 e^{(-(t-t_0)/A)^2} e^{(f(x-L)/c)}$$

Donde v_f es la velocidad en la frontera sur, y v_0 representa la velocidad en la costa, t es el tiempo, y t_0 es un corrimiento temporal para asegurar que la OKC entre al dominio de forma gradual. A es la escala temporal de la onda, x es la distancia en km en la dirección zonal, L es el ancho del canal, en la frontera sur $L = nx = 425 \text{ km}$, y c la velocidad de fase para una onda baroclínica. La Figura 2 muestra la componente de velocidad v_f en la frontera sur para diferentes tiempos de simulación.

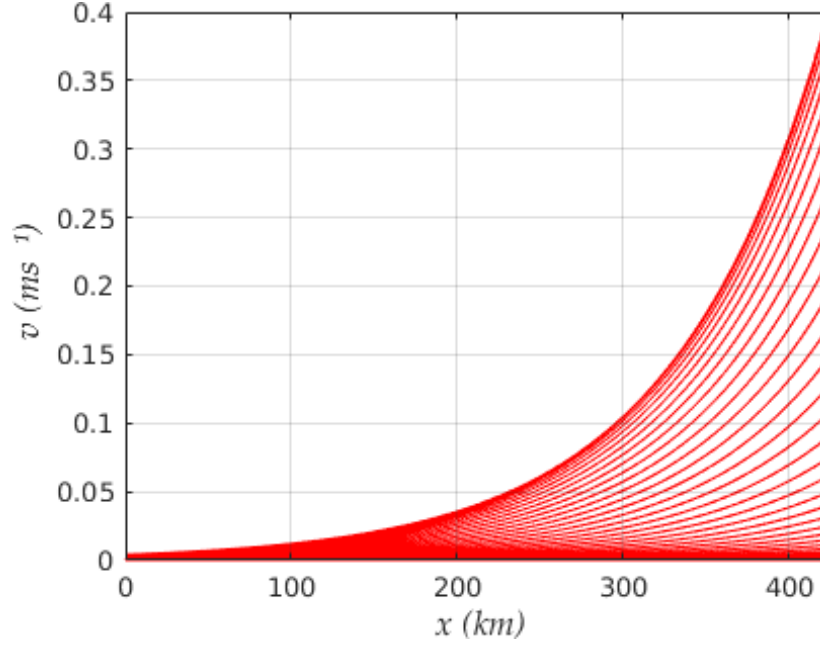


Figura 2: Componente de velocidad v en la frontera sur en diferentes tiempos de simulación. La amplitud de la velocidad en función del tiempo tiene una forma Gaussiana.

En las secciones posteriores se hará referencia a los parámetros de las OKC, principalmente a la escala temporal de la onda y su amplitud η_0 (desplazamiento de la interfase en la costa), donde $\eta_0 = cv_0/g'$. La distancia de la costa en la cual la amplitud de la onda es significativa o distancia de atrapamiento de las OKC es el radio de deformación baroclínico de Rossby, definido como $Rd = c/f$. Así mismo, en todas las simulaciones se mantienen los siguientes parámetros: $g' = 0.0098 \text{ s}^{-2}$, $Ho = 800 \text{ m}$ y $c = 2.8 \text{ ms}^{-1}$.

3. Resultados y discusiones

Para entender mejor el efecto de la línea de costa sobre ondas que se propagan atrapadas a lo largo de esta, se realizó un conjunto de simulaciones sistemáticas, en las cuales se usaron diferentes características de la línea de costa, para ondas de diferentes escalas temporales y amplitudes.

En esta sección se presentan los resultados derivados de las simulaciones realizadas. Los resultados se distribuyen en 7 secciones (secc. 3.1 a 3.7), comenzando por el estudio de la propagación de OKC con diferentes amplitudes y escalas temporales, a lo largo de costas idealizadas, (secc. 3.1 a 3.6). Por último presentaremos los resultados obtenidos para la propagación de una OKC sobre la costa real del Pacífico Mexicano (secc. 3.7).

En este trabajo se busca evaluar la energía que se desprende de las OKC al propagarse a lo largo de la costa. Para ello, se obtuvo la ley de conservación de energía mecánica para las ecuaciones 1, 2 y 3. Para este sistema, la ley de conservación de energía mecánica (E) está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{v}(g'\eta + \frac{1}{2}(u^2 + v^2))h = 0$$

Donde E es la energía mecánica total, dada por $E = Ec + Ep$. Ec y Ep representan la energía cinética y la energía potencial respectivamente, definidas como:

$$Ec = \frac{1}{2}(u^2 + v^2)h$$

y

$$Ep = \frac{1}{2}(g'\eta^2)$$

En cada simulación se evalúa la energía mecánica residual. Como en algunos casos la OKC incidente presenta una longitud de onda mayor que la longitud del dominio, la energía incidente total, se estimó a partir de los flujos a través de la frontera sur. El flujo se obtuvo a partir de la ecuación (4), aplicando el teorema de la divergencia e integrando solo sobre la frontera:

$$Fx = \iint \nabla \cdot v(g'\eta + \frac{1}{2}(u^2 + v^2))h dxdt$$

donde Fx es el flujo perpendicular a la frontera sur que entra en el dominio.

La energía mecánica residual se definió como la energía que queda en el dominio una vez que la onda incidente ha salido del dominio. La energía residual se presenta como el porcentaje de energía total que queda en el dominio, es decir, es el porcentaje de energía que la OKC pierde. En la Figura 3 se ilustra el comportamiento de la energía integrada espacialmente en un dominio idealizado.

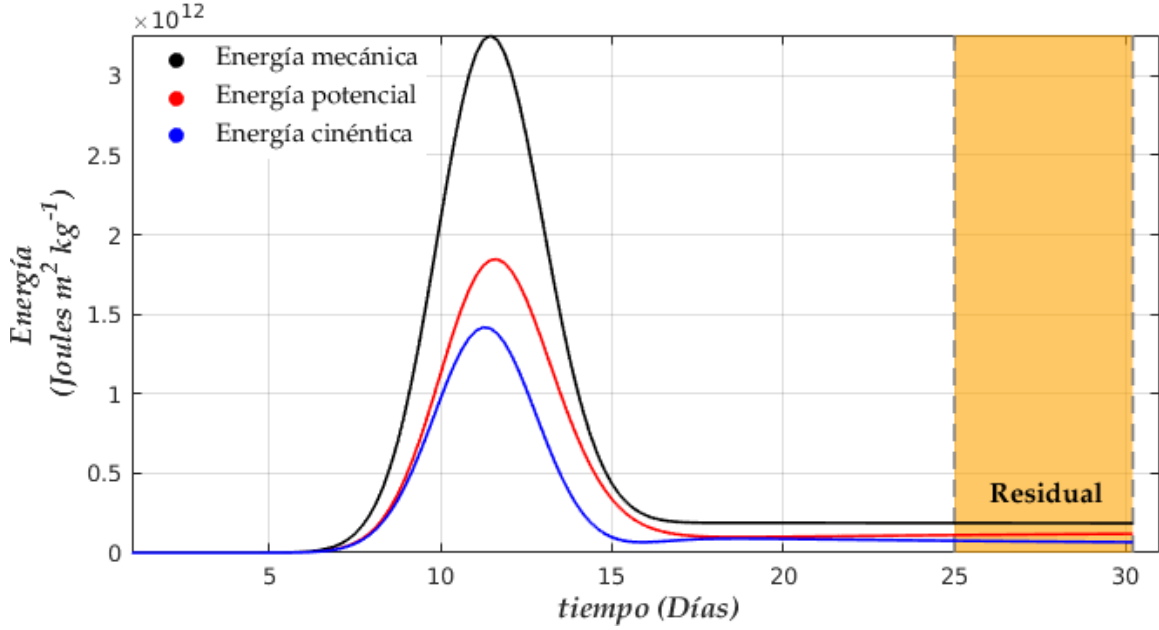


Figura 3: Ejemplo ilustrativo de la evolución de la energía integrada en todo el dominio en función del tiempo. La región sombreada muestra el tiempo a partir del cual la energía que permanece en el dominio (pero la OKC ha salido) es la E residual.

3.1. Propagación de OKC en un dominio de costa recta

Con el fin de entender mejor la propagación de OKC, se realizaron simulaciones haciendo incidir una sola OKC, en un dominio donde no existen cambios en la línea de costa (costa recta). El conjunto de simulaciones con línea de costa recta consiste en las siguientes combinaciones: 1) Modelo de ecuaciones lineales con $f = cte.$, 2) Modelo de ecuaciones lineales con f variable, 3) Modelo de ecuaciones no lineales con $f = cte.$, y 4) Modelo de ecuaciones no lineales con f variable. Para los casos donde f es variable, f se calcula a partir de una malla donde Δx y Δy son constantes, y la latitud se calcula sobre cada punto de la malla, la cual se extiende desde los 12 hasta los 18°N.

El forzamiento consistió en una onda de Kelvin de elevación ($\eta_0 > 0$), con una escala temporal de 5 días, y 120 m de amplitud ($\eta_0 = 120$ m). La profundidad de la capa activa de la cuenca fue de $Ho = 800$ m, y la gravedad reducida fue $g' = 0.0098$ ms^{-2} . Los parámetros g' y Ho determinan la velocidad de fase para OKC, y en todas las simulaciones se empleó $c = 2.8$ ms^{-1} , valor similar al observado (Enfield y Allen, 1983; Grimshaw y Allen, 1988).

Las simulaciones en el dominio de costa recta mostraron que si $f = cte$, los porcentajes de energía residual son despreciables, es decir, la energía incidente asociada a la OKC sale del dominio, y no se observan estructuras residuales. Por otro lado, si f varía con la latitud, la onda incidente es capaz de transferir parte de su energía a ondas Rossby, que permanecen en la dominio aún después de que la OKC ha salido de éste.

Tabla I: Porcentaje de energía mecánica total que se convierte en energía residual para una OKC que se propaga a lo largo de una costa recta.

	Energía mecánica (%)	Energía cinética (%)	Energía potencial (%)
Lineal, plano f	0.0013	0.0012	0.0001
Lineal, f variable	3.50	1.60	1.90
No lineal, plano f	0.0013	0.0012	0.0001
No lineal, f variable	3.60	1.60	2.00

Cuando f se definió variable la energía mecánica residual fue de 3.5 % en el caso lineal, y de 3.6 % en el caso no lineal (Tabla I). Así mismo, en los casos de f variable la proporción entre energía cinética y potencial mostró pequeños cambios, siendo ligeramente mayor la energía potencial en ambos casos (lineal y no lineal). También se observó (en simulaciones no mostradas) que si la escala temporal de la OKC es lo suficientemente corta, no se produce energía residual en ninguno de los casos.

La Figura 4 muestra el diagrama de dispersión lineal para ondas de Rossby y de Kelvin baroclínicas a los 12° N de latitud. La frecuencia crítica o frecuencia máxima a la cual una onda de Rossby puede existir se obtuvo a partir de esta relación de dispersión. En este caso, dada la latitud del dominio y la velocidad de fase de la onda OKC, la frecuencia máxima obtenida corresponde a un periodo de 15.9 días a 12° N, y 24.31 días a 18° N.

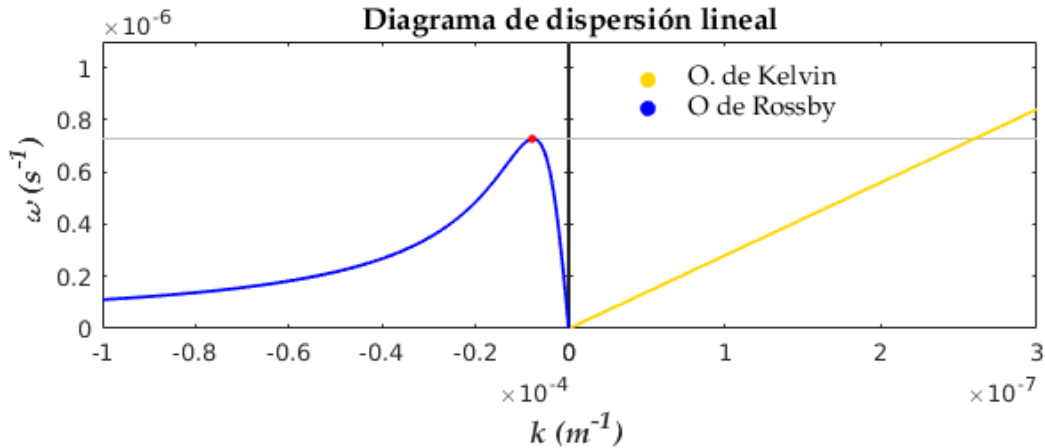


Figura 4: Diagrama de dispersión lineal de ondas de Kelvin y de Rossby. El eje vertical representa la frecuencia $\omega(s^{-1})$. El eje horizontal representa la componente $k(m^{-1})$ del vector número de onda. Se utilizan escalas distintas en el eje horizontal con fines ilustrativos. Se señala con un punto color rojo la frecuencia máxima para ondas de Rossby.

En la Figura 5 se muestra la elevación de la interfase (η) en diferentes tiempos de simulación, del caso no lineal con f variable. Se puede observar la onda incidente entrar al dominio y propagarse a lo largo del mismo. En el día 7 la onda comienza a entrar al dominio numérico. Para el día 15, la onda incidente casi ha salido del dominio, y se observa la formación de una estructura con amplitudes del orden de 10 a 15 m de elevación, que permanece visible hasta el día 30.

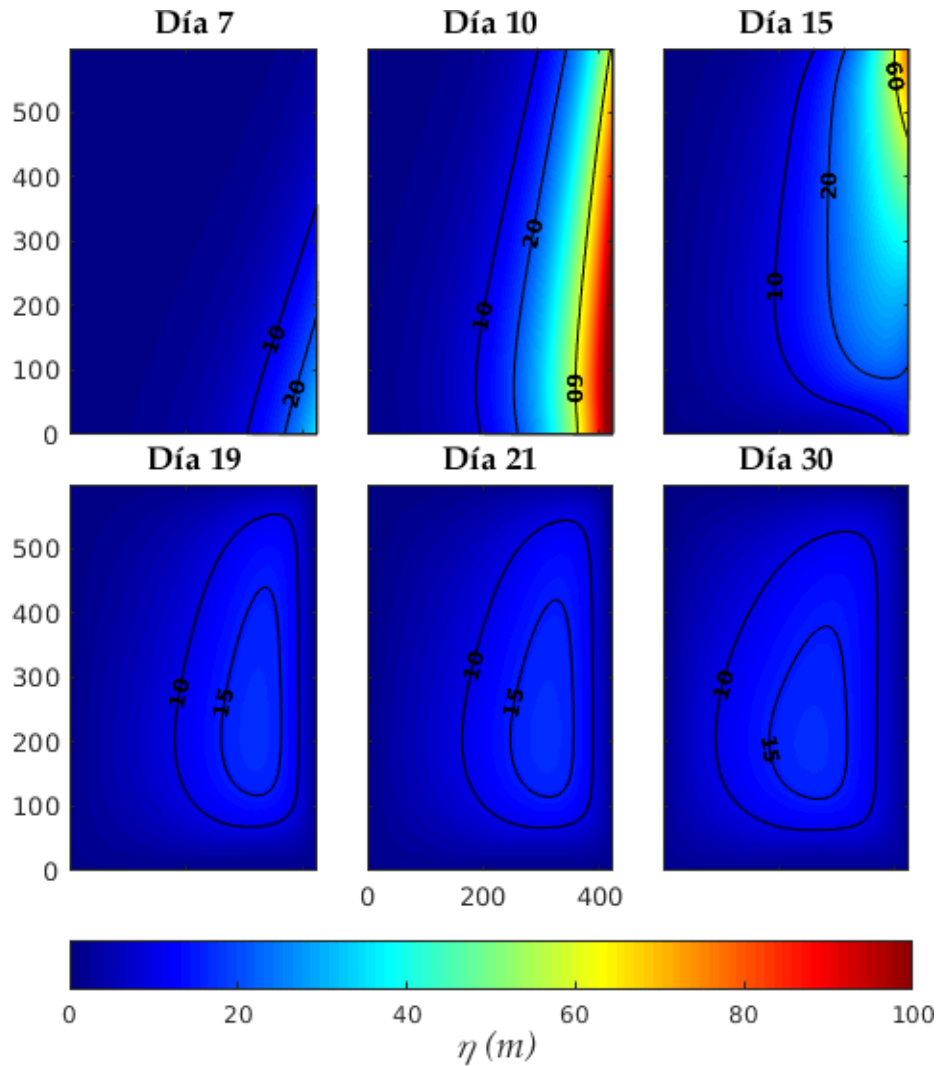


Figura 5: Elevación de la interfase η . El color representa el desplazamiento de la interfase en metros. Además se muestran en líneas negras los contornos de 10, 15, 20 y 60 m de elevación de la interfase, para diferentes días de simulación.

Las dimensiones horizontales de la estructura residual se aproximan a las del dominio, y existen contornos cerrados de desplazamiento de la interfase. En las subfiguras del panel inferior (Figura 5), se observa que los contornos de 10 y 15 m, se encuentran cada vez más separados de la costa, lo cual indica una propagación de la estructura residual hacia el oeste. El diagrama de Hovmöller para η en un transecto horizontal del dominio, muestra que existe una propagación de la estructura hacia el oeste.

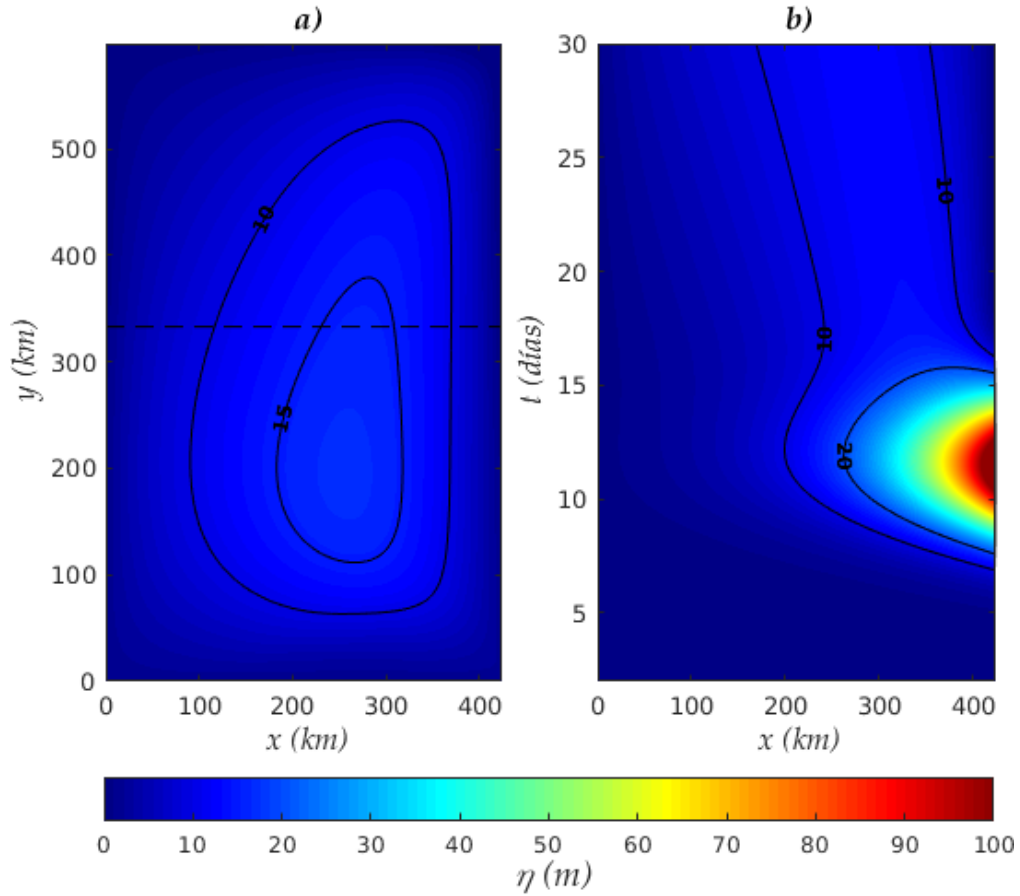


Figura 6: a) Elevación de la interfase (η) en el día 30 de simulación. Las líneas negras representan los contornos de 10, 15, y 20 m de elevación. b) Diagrama de Hovmöller de η en un transecto horizontal del dominio, a lo largo de la línea punteada en la Figura 6a

La velocidad de propagación estimada del diagrama (Figura 6b) es de -0.0724 m s^{-1} , que es comparable con la velocidad de propagación de una

onda de Rossby. La onda de Rossby generada en cada simulación contiene un porcentaje ligeramente mayor de Ep que de Ec (Tabla I).

De esta sección podemos concluir que si $f = cte$, como era de esperarse, no se generan ondas de Rossby, por lo que la energía mecánica residual es despreciable, ya que la energía introducida por la onda incidente sale del dominio junto con la onda. Si f es variable, se genera una onda de Rossby con amplitudes de entre 15 y 20 m (Figura 6a), con el mismo signo de la onda incidente, y de dimensiones horizontales cercanas a las del dominio numérico. La estructura residual mostró una propagación hacia el oeste, a una velocidad comparable con la calculada para una onda de Rossby (Figura 6b).

3.2. Propagación de una OKC a lo largo de costas irregulares

La hipótesis central de nuestro trabajo es que las irregularidades de la costa pueden extraer energía de las OAC. Para estudiar el efecto de la forma de la línea de costa sobre la propagación de una OKC se realizaron simulaciones utilizando líneas de costa idealizadas que presentan discontinuidades a lo largo de la frontera este. Se definieron dos tipos de discontinuidades: *Ensanchamiento*, donde la costa tuerce hacia el este, y se incrementa el ancho del canal (Figura 7a), y *Angostamiento*, donde la costa dobla hacia el oeste, y el canal disminuye su ancho (Figura 7b).

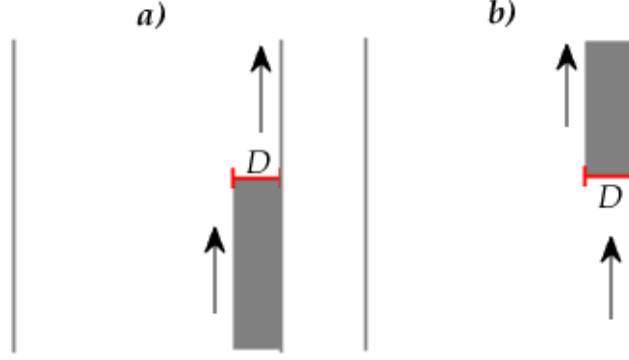


Figura 7: Tipos de línea de costa implementadas en esta sección. En gris se muestra la costa. a) Ensanchamiento y. b) Angostamiento del canal. Las flechas indican la trayectoria de la onda incidente. D (señalado con rojo) representa el ancho de la discontinuidad, definido como $D = c/f = Rd_{15} = 75$ km, donde Rd_{15} es el radio de deformación a los 15° N de latitud para ondas con celeridad $c = 2.8 \text{ ms}^{-1}$.

Se hace incidir una OKC de elevación ($\eta_0 > 0$) y de depresión ($\eta_0 < 0$), con amplitud de $\eta_0 = \pm 120 \text{ m}$, y escala temporal de 5 días. Los parámetros del modelo son los mismos utilizados con anterioridad: $c = 2.8 \text{ ms}^{-1}$, $Ho = 800 \text{ m}$, $g' = 0.0089 \text{ ms}^{-2}$. La latitud en el dominio va de los 12 a 18° N, permitiendo que el parámetro de Coriolis sea variable. El modelo de aquí en adelante es no lineal (secc. 2).

Los resultados obtenidos de las simulaciones se distribuyen en tres secciones: En las secciones 3.2.1 y 3.2.2, se describe la propagación de OKC de elevación y de depresión respectivamente, a lo largo de costas que se ensanchan o angostan (Figura 7), y se identifican las estructuras presentes en el dominio una vez que la onda incidente han salido de éste. Mientras, en la sección 3.2.3, se analiza la energía residual obtenida de los experimentos numéricos referidos.

3.2.1. Propagación de una OKC de elevación a lo largo de costas irregulares

Ya sea que el canal se ensanchara o angostara, se observó que se genera una onda de Rossby de forma similar a lo que ocurre sobre una costa recta (secc. 3.1). Sin embargo, en presencia de una discontinuidad en la línea de costa, destaca la generación de pequeños remolinos con diámetros de alrededor de 10 km. Estos remolinos son excitados cerca del vértice de la discontinuidad. En la sección 3.1 se observó que sobre una costa recta no se generan remolinos, por lo que los remolinos deben ser producto de la interacción de la OKC con la discontinuidad.

En la Figura 8 se puede observar que para el día 9 de simulación, la onda incidente comienza a interactuar con la discontinuidad, y se deforma ligeramente siguiendo la línea de costa. En el día 15, la onda incidente casi ha salido del dominio numérico, y se puede apreciar que comienzan a aparecer pequeñas estructuras cerca de las discontinuidades, que corresponden a remolinos que se mantienen relativamente cerca de la discontinuidad. Para el día 21 la OKC ha salido del dominio y en ambos tipos de canal se puede apreciar estructuras residuales presentes en el dominio. Como se mencionó anteriormente, destaca la presencia de remolinos producidos cerca del vértice de la discontinuidad. Los remolinos fueron generados en posiciones distintas de la línea de costa, dependiendo del tipo de discontinuidad (Figura 9).

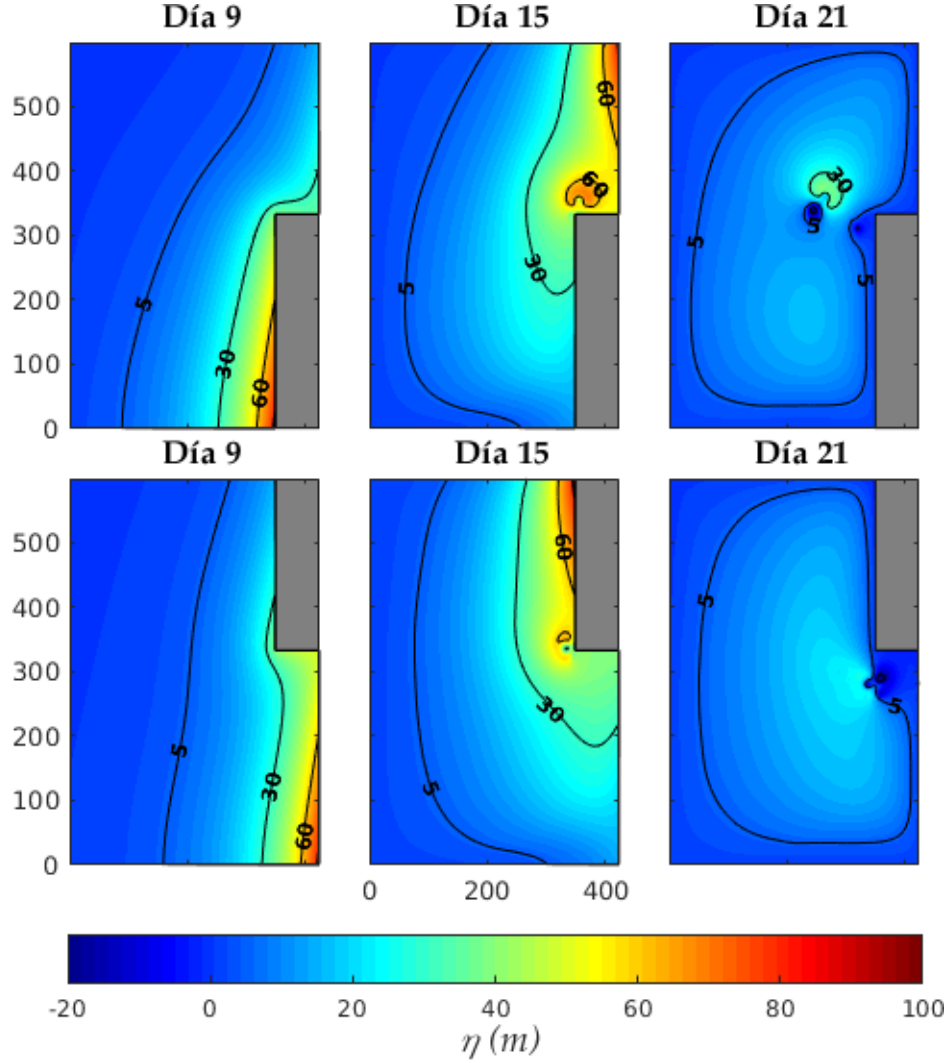


Figura 8: Desplazamiento de la interfase η en los días 9,12,y 15 La OKC incidente es de elevación ($\eta_0 > 0$) en ambos casos. En los paneles superiores el canal se ensancha. En el renglón inferior el canal se angosta. las líneas negras muestran los contornos de elevación de la interfase de 5, 30 y 60 m. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km.

Si el canal se ensancha, las corrientes costeras que están en balance geostrófico, eventualmente se encuentran con la ausencia de la costa y se rompe el balance geostrófico momentáneamente, por lo que la onda incidente sufre difracción en la dirección de “sombra” (que es la esquina oculta en dirección de la corriente), desviándose hacia la derecha y siguiendo la línea de costa. La intensificación de las corrientes en esa zona se manifiesta como un chorro

que sale del vértice de la discontinuidad. Este flujo, al doblar hacia la zona de “sombra”, gradualmente se organiza como un remolino anticiclónico, con un desplazamiento negativo de la interfase (Figura 9b).

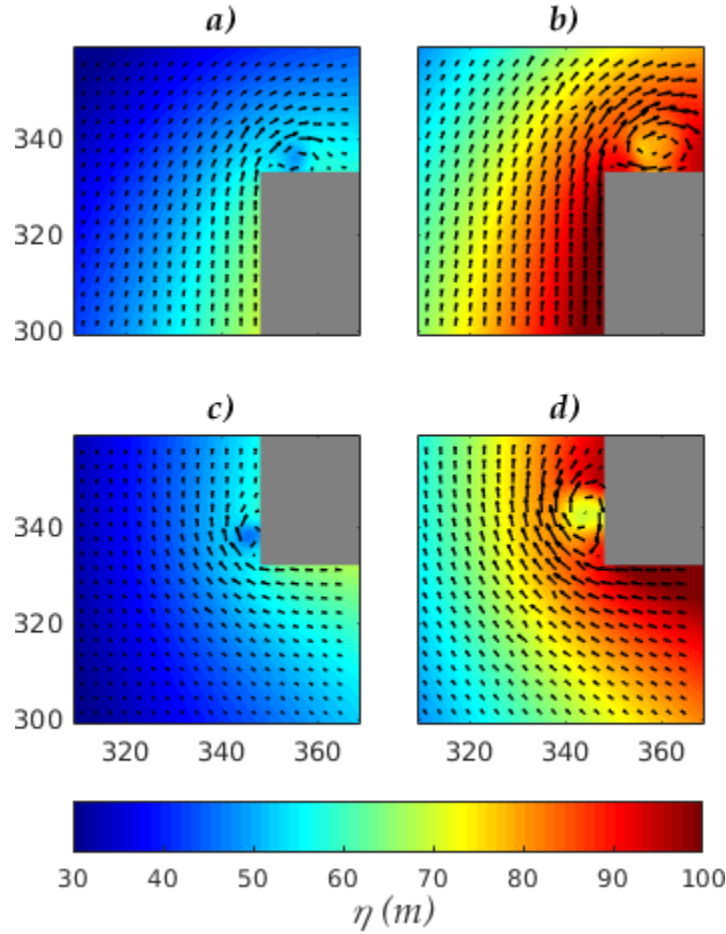


Figura 9: Acercamiento a la zona de generación de remolinos. La escala de color se muestra el desplazamiento de la interfase (η) y en flechas negras muestran las corrientes (se muestra 1 de cada 5 flechas), correspondientes a los días 9 (a y c) y 10 (b y d) de simulación. Para un canal que se ensancha (panel superior) y un canal que se angosta (panel inferior). Las unidades en ambos ejes son de distancia en km.

Por otro lado, si el canal se angosta, las corrientes de una OKC de amplitud positiva son hacia el norte ($v > 0$, $u = 0$), hasta que encuentran un cambio abrupto en la línea de costa, donde la condición de frontera zonal no permite corrientes perpendiculares ($v = 0$), por lo tanto, las corrientes

deben girar hacia la izquierda, sin embargo, a pocos kilómetros (75km) de haber cambiado de dirección, la onda encuentra una nueva discontinuidad en ausencia de costa, la onda se difracta y las corrientes giran a la derecha (Figura 9c). Al igual que cuando el canal se angosta (Figura 9a y b), se produce un remolino anticiclónico, caracterizado por presentar un desplazamiento negativo de la interfase (Figura 9d).

Como se puede observar en la Figura 9, los remolinos generados producen que la interfase se hunda en relación a su alrededor, es decir, un desplazamiento “negativo”, mientras las corrientes de la periferia de los remolinos muestran un sentido de giro anticiclónico. Estas características no son consistentes con geostrofia, por ello se infiere que los remolinos descritos son ciclostrofos.

Una vez que la onda incidente ha salido del dominio, la energía cinética que permanece en el dominio se encuentra en forma de remolinos, y frecuentemente se forman dipolos. La energía es mayor en la zona de “contacto” entre los remolinos, donde las corrientes coinciden en signo (Figura 10). En ambos tipos de discontinuidad se generaron estructuras muy similares. La trayectoria del centro del dipolo, revela el movimiento de traslación del par. Se observa que la trayectoria del dipolo tiende a formar “lazos ” a medida que se traslada.

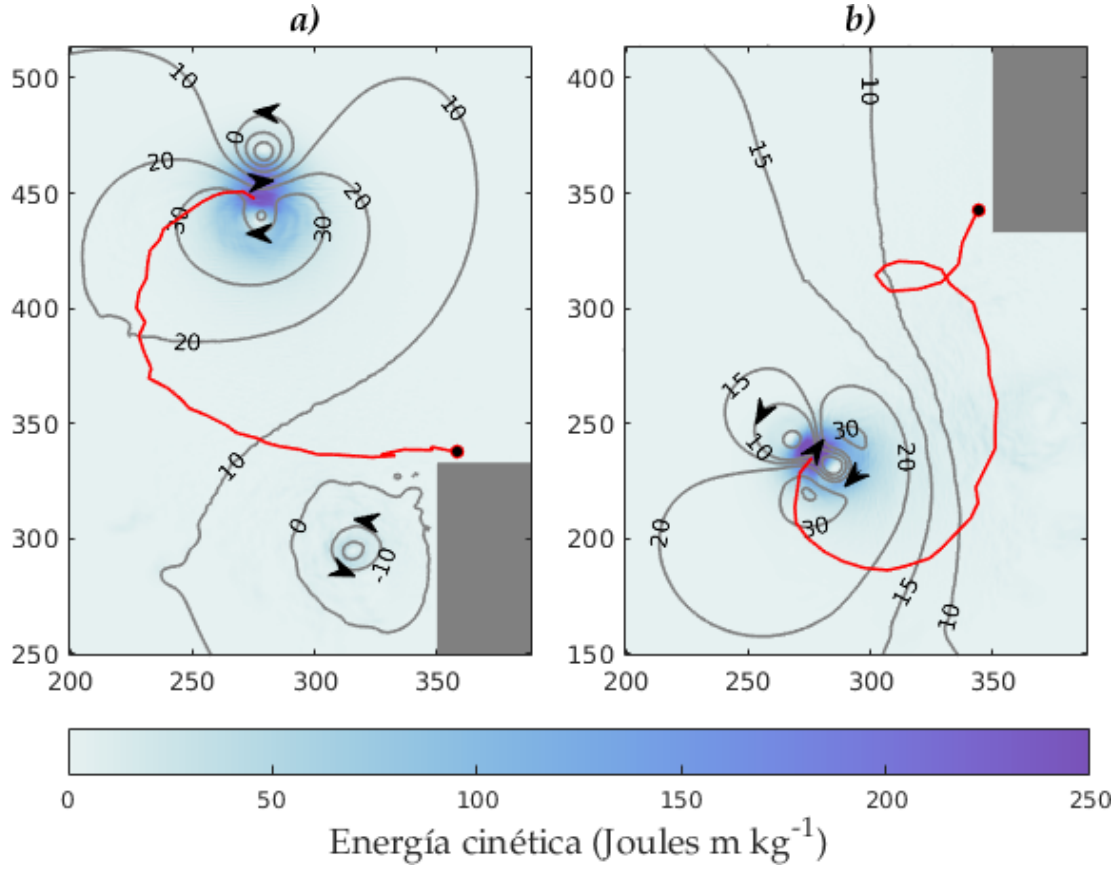


Figura 10: Energía cinética (color) y desplazamiento de la interfase (contornos) en el día 23 de simulación para un canal que se ensancha (a) y uno que se angosta (b). Las flechas indican el sentido de rotación. Las escalas de los ejes tienen unidades de km. La línea en rojo representa la trayectoria del máximo de energía cinética, tomando como punto de partida el lugar donde se forma el primer remolino, señalado con un punto negro. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km.

Cuando el canal se ensancha, el dipolo tiende a desplazarse hacia el norte (Figura 10a). Mientras que en el caso de angostamiento del canal, el dipolo parece tender a moverse al sur (Figura 10b). En ambos casos (Figura 10a y 10b), los dipolos muestran un desplazamiento neto hacia el oeste de alrededor de 70 km.

3.2.2. Propagación de una OKC de depresión a lo largo de costas irregulares

De manera similar a lo observado en la sección 3.2.1, al incidir una OKC de depresión se genera una onda de Rossby. También se observó la generación de remolinos, con radios considerablemente mayores que los observados para ondas de elevación.

En la Figura 11 se presenta una secuencia del desplazamiento de la interfase en distintos tiempos de simulación, para una OKC de depresión en canales que se ensanchan y se angostan. Se puede apreciar que en el día 9 de simulación, la onda comienza a entrar en el dominio numérico y sufre una ligera deformación debido a la presencia de la discontinuidad en el canal. Para el día 15 de simulación, ya es visible un remolino que se manifiesta como una depresión de la interfase. Cuando la onda incidente ha salido del dominio (en el día 21), los remolinos formados ya se han desprendido de la costa y comienzan a interactuar con la onda de Rossby, de tal manera que parecen dirigirse hacia la máxima amplitud (negativa en este caso) de la onda de Rossby.

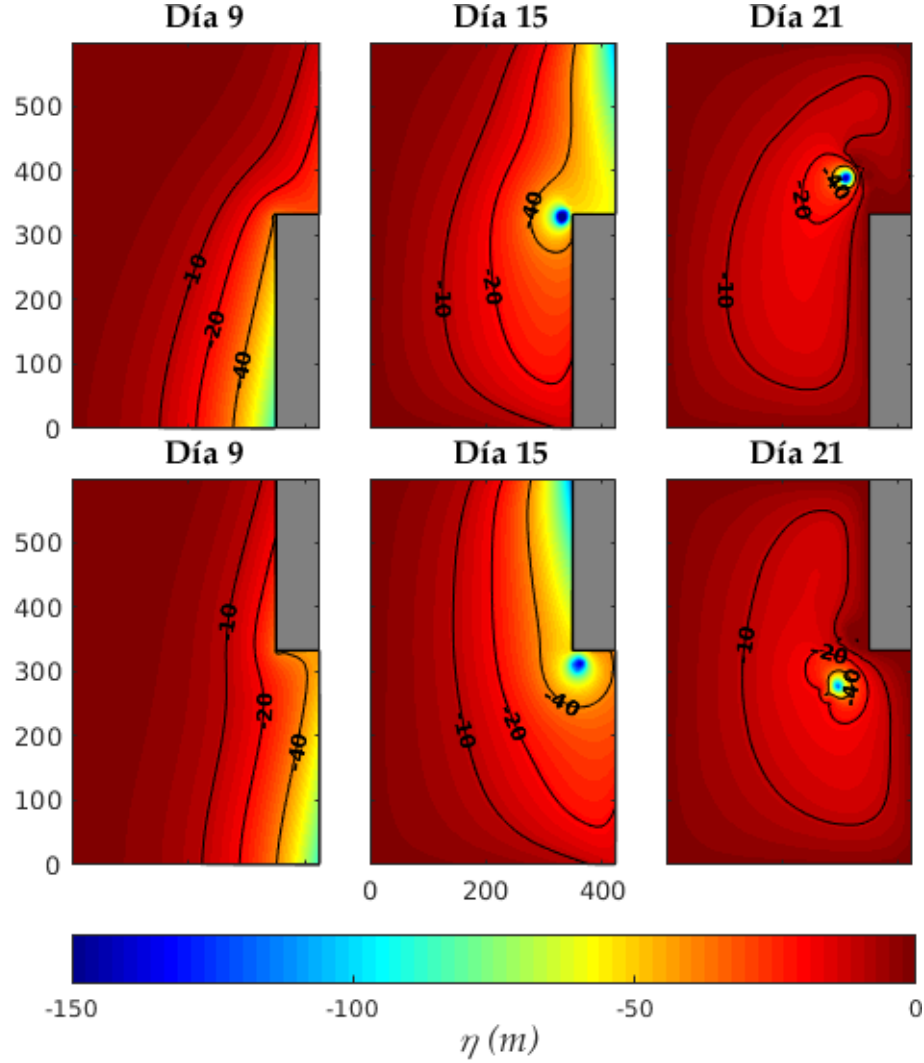


Figura 11: Similar a la Figura 8 pero para una onda incidente de depresión ($\eta_0 < 0$). Desplazamiento de la interfase η , en distintos días de simulación. En los paneles superiores el canal se ensancha. En el renglón inferior el canal se angosta. Además se resaltan los contornos de -10, -20 y -40 m (líneas en negro). Las unidades en ambos ejes son de distancia en km.

La Figura 12 muestra la zona del dominio donde ocurre la formación del primer remolino generado al incidir una OKC de depresión. La formación de remolinos ocurre en ambos tipos de discontinuidad. Al igual que los remolinos descritos en la Figura 9 se produce un desplazamiento negativo de la interfase (Figura 12). Sin embargo, las corrientes en la periferia de estos remolinos presentan sentido de giro ciclónico.

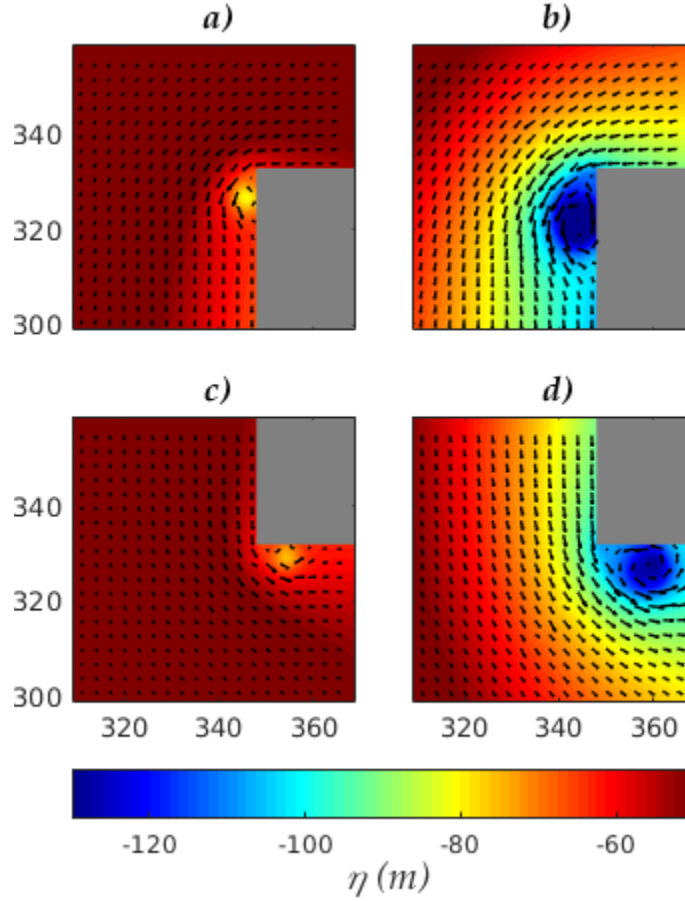


Figura 12: 12. Similar a la Figura 9 pero para una onda incidente de depresión. Acercamiento a la zona de generación de remolinos. La escala de color se muestra el desplazamiento de la interfase (η) y en flechas negras muestran las corrientes (se muestra 1 de cada 5 flechas), correspondientes a los días 9 (a y c) y 10 (b y d) de simulación. Para un canal que se ensancha (panel superior) y un canal que se angosta (panel inferior). Las unidades en ambos ejes son de distancia en km.

Al igual que en la sección 3.2.1 los remolinos parecen formar dipolos. En este caso el remolino de la Figura 12 (b y d) evoluciona en un remolino principal y otro de mucho menor radio y amplitud (Figura 13 a y b). La trayectoria del centro del dipolo revela un comportamiento de traslación que tiende a formar lazos de manera similar a lo observado en la Figura 10. En ambos casos se observa un ligero desplazamiento (neto) hacia el oeste de unos 70 km, similar a lo observado en la Figura 10. Los remolinos agru-

pados en dipolos son las estructuras residuales más energéticas, y poseen principalmente energía cinética, tal como se observó en la sección 3.2.1.

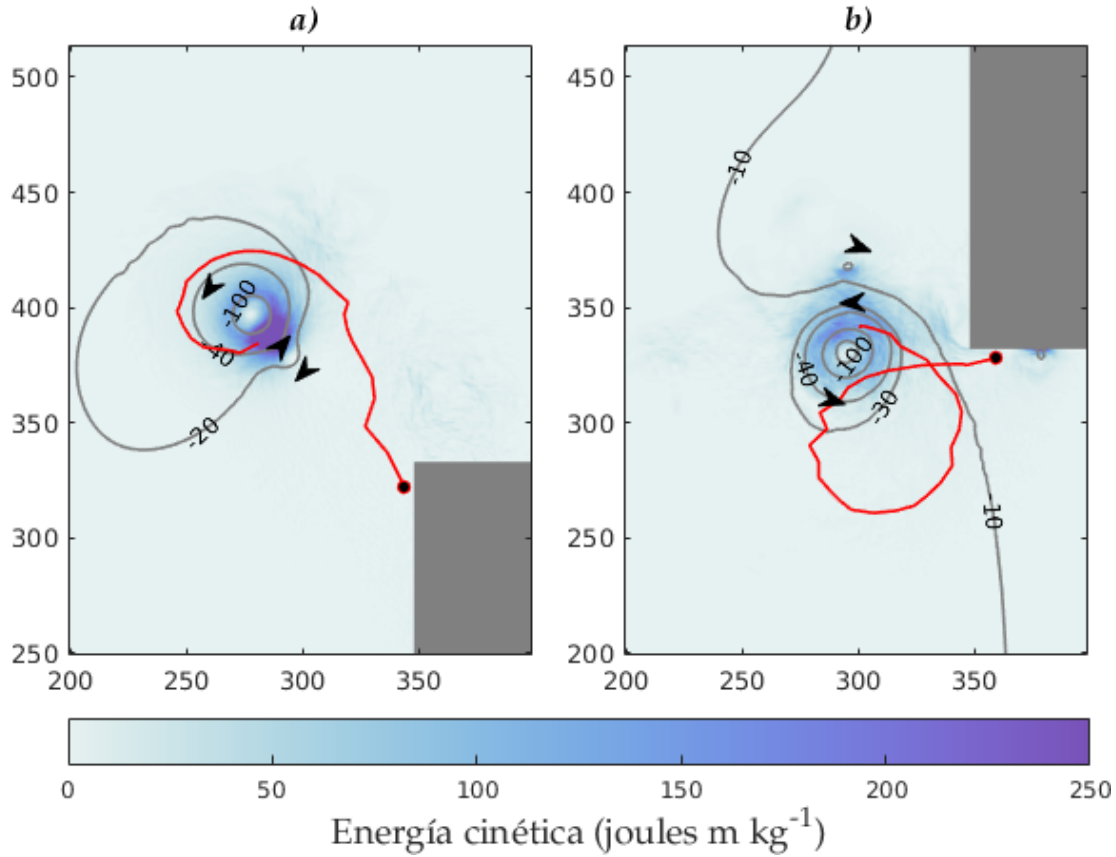


Figura 13: Similar a la Figura 10 pero para una onda incidente de depresión. Energía cinética (color) y desplazamiento de la interfase (contornos) en el día 23 de simulación para un canal que se ensancha (a) y uno que se angosta (b). Las flechas indican el sentido de rotación. Las escalas de los ejes tienen unidades de km. La línea en rojo representa la trayectoria del máximo de energía cinética, tomando como punto de partida el lugar donde se forma el primer remolino, señalado con un punto negro. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km.

Como se observó en las secciones 3.2.1 y 3.2.2. Los remolinos se producen en posiciones que dependen del tipo de discontinuidad y del signo de la amplitud de la onda. En el siguiente diagrama (Figura 14) se señala la zona de “sombra”, que es justo el lugar donde comienza a generarse el remolino producido por a la OKC. Para OKC de depresión, la zona de “sombra” queda a la izquierda de la dirección de las corrientes (Figura 14a y b,

flechas azules), mientras que para ondas de elevación, la zona de “sombra” queda a la derecha de la dirección de las corrientes (Figura 14a y b, flechas rojas).

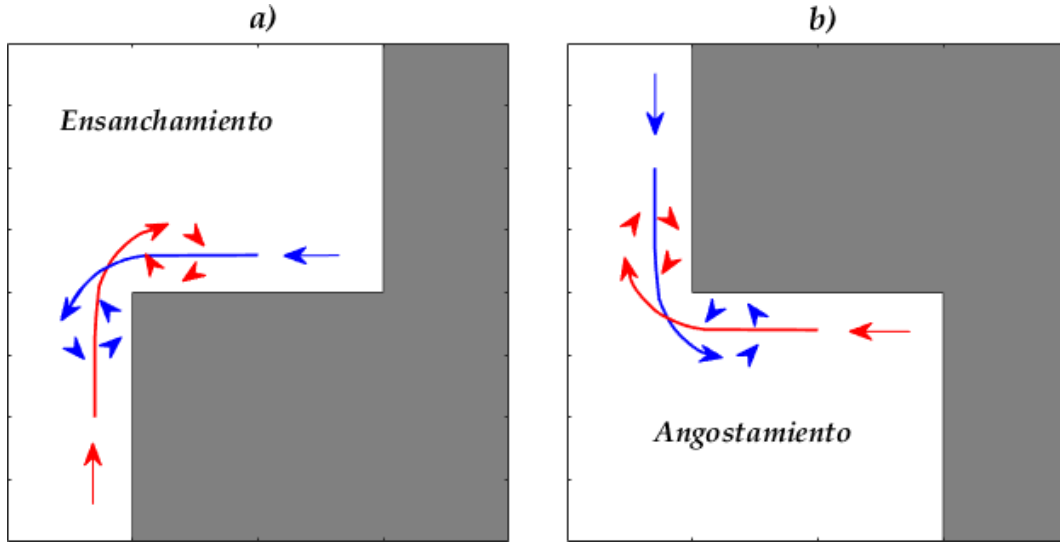


Figura 14: Diagrama de interacción de las corrientes de la OKC con las distintas discontinuidades. a) Discontinuidad de ensanchamiento del canal. b) Discontinuidad de angostamiento del canal. Las flechas color rojo representan la dirección de las corrientes de una OKC de elevación, y las azules las de una de depresión.

Para OKC de depresión, la zona de “sombra” queda a la izquierda de la dirección de las corrientes (Figura 14a y b, flechas azules), mientras que para ondas de elevación, la zona de “sombra” queda a la derecha de la dirección de las corrientes (Figura 14a y b, flechas rojas).

Los remolinos observados mostraron diferencias considerables con respecto al signo de la amplitud de la OKC incidente. La Figura 15 muestra un acercamiento a los remolinos principales de los cuatro casos estudiados (OKC de depresión y de elevación en ambos tipos de discontinuidades).

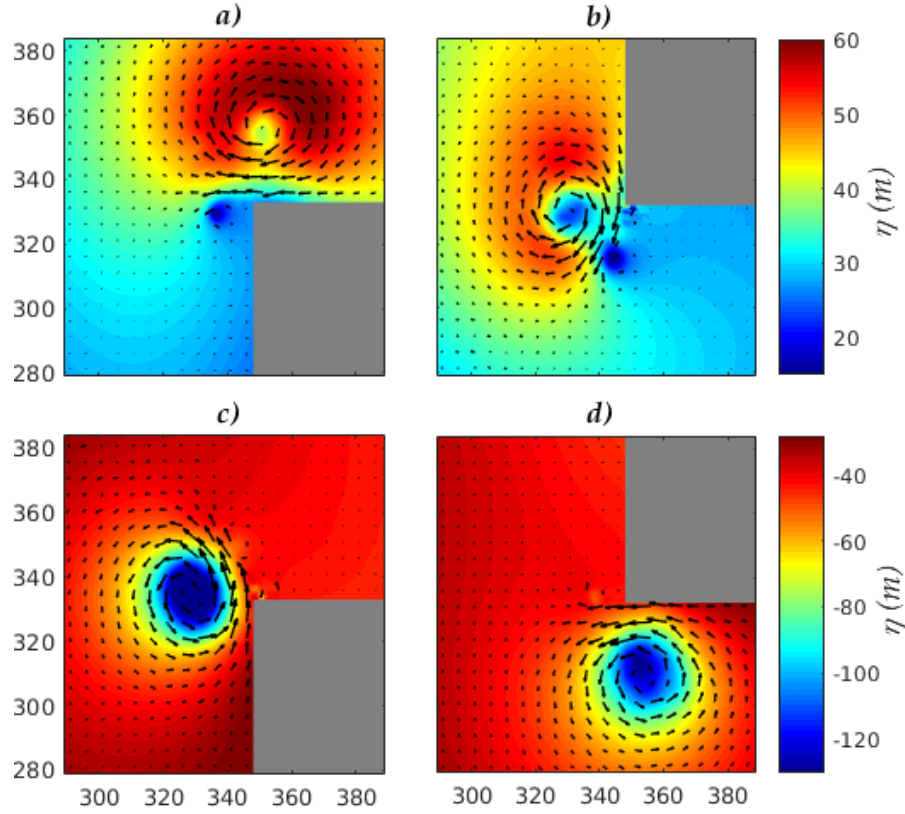


Figura 15: Desplazamiento de la interfase (escala de color). Las flechas indican los vectores de velocidad (mostrando 1 de cada 5 flechas), en el día 15 de simulación. OKC de elevación ante: a) Ensanchamiento del canal. b) Angostamiento del canal. Y OKC de depresión donde el canal: c) Se ensancha y d) Se angosta.

Se puede apreciar que los remolinos (principales) producidos por OKC de depresión son más grandes que los producidos por OKC de elevación, tanto en radio como en amplitud (Figura 15), con amplitudes de poco más de -80 m, y diámetros de 30 km aprox. Mientras los remolinos generados por OKC de elevación, muestran amplitudes de entre -20 y -30 m, y alrededor de 13 km de radio. Como se mencionó en la sección 3.2.1, los remolinos producidos por OKC de elevación, presentan sentido anticiclónico y un desplazamiento negativo de la interfase (Figura 15a y b). Dado que esto es inconsistente con el balance geostrófico, se infiere que estos remolinos se encuentran en

balance ciclostrófico. Otro hecho que solo ocurre cuando inciden OKC de elevación es que, alrededor del remolino principal se produce una elevación que lo envuelve por completo, y se mantiene ligado al remolino durante el resto de la simulación. Por otro lado, los remolinos producidos por ondas incidentes de depresión, muestran desplazamientos negativos y sentido de giro ciclónico, lo cual es consistente con balance geostrófico (Figura 15c y d), sin embargo su diámetro es menor que Rd , por lo que ambos balances (ciclostrófico y geostrófico) pueden estar presentes.

3.2.3. Energía residual producida por OKC a lo largo de costas irregulares

La energía residual de los experimentos referidos mostró una respuesta moderada, tanto al signo de la amplitud como al tipo de discontinuidad. Las diferencias son pequeñas, aunque podrían ser relevantes (Tabla II). Los porcentajes de energía mecánica residual (Tabla II) son mayores a los observados en la Tabla I (secc. 3.1). Las características de la OKC incidente (escala temporal y amplitud) son las mismas que en la sección 3.1, por lo que la diferencia entre los porcentajes de energía residual para una costa recta (Tabla I) en el caso no lineal y de f variable, y una línea de costa irregular (Tabla II) se deben precisamente a la presencia de la discontinuidad.

Tabla II: Porcentaje de energía mecánica total que permanece en el dominio (residual) una vez que la onda incidente ha salido del mismo. Para costas de: **A:** Angostamiento del canal (Figura 5b). **E:** Ensanchamiento del canal (Figura 5a).

	Energía mecánica (%)	Energía cinética (%)	Energía potencial (%)
<i>Elevación, E</i>	9.1	6.7	2.4
<i>Elevación, A</i>	8.5	6.0	2.5
<i>Depresión, E</i>	10.1	8.2	1.9
<i>Depresión, A</i>	9.4	6.7	2.7

En la Tabla II se puede observar que tanto para ondas de depresión como de elevación, las discontinuidades donde el canal se ensancha mostraron un porcentaje mayor de energía residual que cuando el canal se angosta. Así mismo, las OKC de depresión mostraron un porcentaje un poco mayor de energía residual, (alrededor de 1 % más) que las OKC de elevación. La energía residual se compone principalmente de energía cinética, lo que sugiere que es principalmente debida a la formación de remolinos generados en las discontinuidades. El mayor porcentaje de energía mecánica residual (y cinética residual) se observó en el caso de OKC de depresión para un canal que se ensancha. Además, el remolino formado también presentó la mayor amplitud (Figura 15c). La energía potencial se mantuvo en valores menores al 3 %, valores similares a los observados en la sección 3.1 donde f es variable. La energía potencial residual mostró un valor máximo de 2.7 % en el caso de una OKC de depresión para un canal que se angosta.

En resumen, de los resultados discutidos en esta sección podemos decir que, las discontinuidades de la línea de costa extraen energía de las OKC y

la transfieren hacia el residual, principalmente en forma de remolinos. Los remolinos se generan en las zonas de “sombra” relativo a la dirección de las corrientes. De tal forma que para OKC de elevación, la zona de sombra queda siempre a la derecha de la dirección de las corrientes, mientras que para las OKC de depresión, la zona de “sombra” se ubica a la izquierda de la dirección de propagación de la onda. El sentido de rotación del remolino está determinado por el signo de la vorticidad de la OKC. De forma que el sentido de los remolinos generados poseen vorticidad de signo contrario al de la vorticidad de la OKC. Las OKC de depresión producen remolinos más grandes, tanto en radio como en amplitud, y producen porcentajes ligeramente mayores de energía residual.

3.3. Efecto del ancho de una discontinuidad en la línea de costa sobre la propagación de una OKC

A lo largo de la costa del Pacífico Mexicano, existen irregularidades costeras con diversas escalas espaciales. Destacan algunos cambios dramáticos en la línea de costa como el GTh (Angostamiento), CC (Ensanchamiento), y PE (Ensanchamiento), solo por mencionar algunos (Figura 1). Para estudiar el efecto que tiene el ancho de una irregularidad en la línea de costa sobre la propagación de una OKC, se realizaron simulaciones sistemáticas variando el ancho de la discontinuidad. Se utilizaron dos tipos de discontinuidades, definidas previamente en la sección 3.2 (Figura 7). Nos referimos a ancho positivo ($D > 0$) cuando el canal se ensancha (Figura 7a), y anchos negativos ($D < 0$) en los casos donde el canal se angosta (Figura 7b). El parámetro D varía desde -200 hasta 200 km, pasando por 0 km, donde $D = 0$ corresponde a una costa recta. En esta sección se analiza la energía mecánica residual y la variación de ésta en respuesta al parámetro D .

Las características de la onda incidente, y los parámetros del modelo, son los mismos que se utilizan en la sección 3.2, es decir: Ondas incidentes de $\eta_0 = \pm 120m$ de amplitud, y una escala temporal de 5 días, que se propagan a lo largo de un dominio donde $c = 2.8 \text{ ms}^{-1}$, $H_0 = 800 \text{ m}$, $g' = 0.0089 \text{ ms}^{-2}$. La latitud en el dominio va de los 12 a 18° N.

En la Figura 16 se presenta la energía residual de las simulaciones, graficada contra el ancho de la discontinuidad (D). Las líneas sólidas representan la energía residual de OKC de elevación ($\eta_0 > 0$), mientras las líneas discontinuas corresponden a la energía residual de OKC de depresión ($\eta_0 < 0$).

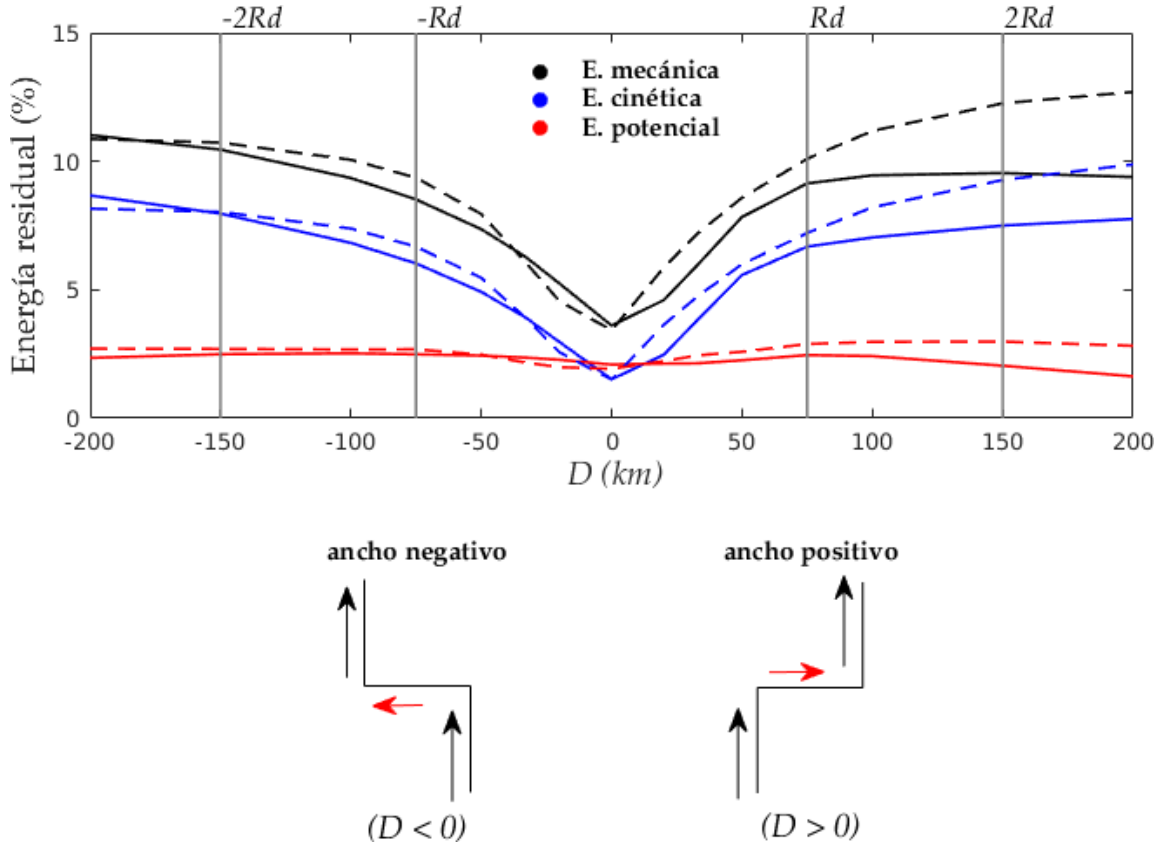


Figura 16: Porcentaje de la energía total que permanece dentro del dominio una vez que la onda incidente ha salido de éste (Energía residual). Las líneas continuas representan la energía de OKC de elevación ($\eta_0 > 0$), mientras las líneas discontinuas corresponden a la energía residual de OKC de depresión ($\eta_0 < 0$). Los colores de las líneas indican la energía mecánica (negro), cinética (azul) y potencial (rojo). Las líneas verticales señalan los valores de D que coinciden con Rd y con $2Rd$, a $15^\circ N$ de latitud, para ondas con celeridad $c = 2.8 \text{ ms}^{-1}$. Los diagramas del panel inferior muestran la forma de la línea de costa según el signo de D . El ancho cero ($D = 0$) corresponde a una costa recta.

Se observó que tanto para ondas incidentes de depresión y de elevación, la energía mecánica residual mostró una respuesta considerable cuando $D < |Rd|$ (Figura 16), incrementando conforme aumentó $|Rd|$. Cuando $D \geq Rd$, el crecimiento de la energía residual es en algunos casos asintótico. de tal manera que si la onda incidente es de elevación y el canal se ensancha ($D > 0$), o si la onda incidente es de depresión y el canal se angosta ($D < 0$), la energía residual alcanza (converge a) un valor máximo (aprox. 10 % y 12 % respectivamente). Para ondas incidentes de elevación y $D > 0$, la energía residual se mantiene prácticamente constante cuando $D \geq Rd$. En este caso la energía cinética sigue incrementándose ligeramente, mientras la potencial disminuye, lo que sugiere que existe una conversión de energía potencial a cinética. Si inciden OKC de depresión y $D < 0$, la energía mecánica residual, cinética y potencial, se mantienen constantes si $D \geq 2Rd$. Algunos casos no mostraron una tendencia de convergencia a un valor máximo. Esto sucedió para OKC de depresión y $D > 0$, y para OKC de elevación y $D < 0$, de tal forma que la energía residual continúa incrementándose lentamente para $D > 2.5Rd$, principalmente debido a un incremento en la energía cinética residual. Lo anterior sugiere que el número o tamaño de los remolinos generados aumenta con el ancho del escalón, ya que la energía potencial en ningún caso parece depender del ancho de la discontinuidad. La energía cinética domina la energía residual, mientras la energía potencial residual es en general, considerablemente menor, excepto cuando D es muy pequeño.

En la Figura 17 se muestra un acercamiento a la zona de generación de remolinos para OKC de elevación (paneles superiores) y depresión (fila inferior), de algunas de las simulaciones donde el dominio se angosta ($D < 0$). Los remolinos producidos por OKC de elevación mostraron una ligera respuesta en la amplitud con respecto a D , mientras el radio de estos remolinos no muestra cambios significativos (Figura 17a - c). Por su parte, los remolinos producidos por OKC de depresión mostraron un evidente incremento del radio conforme $|D|$ aumentó. El remolino de mayor radio de todos los experimentos se presentó en el caso mostrado en la Figura 17d, que corresponde a una onda incidente de depresión, en un canal que se angosta con $D = -200$ km.

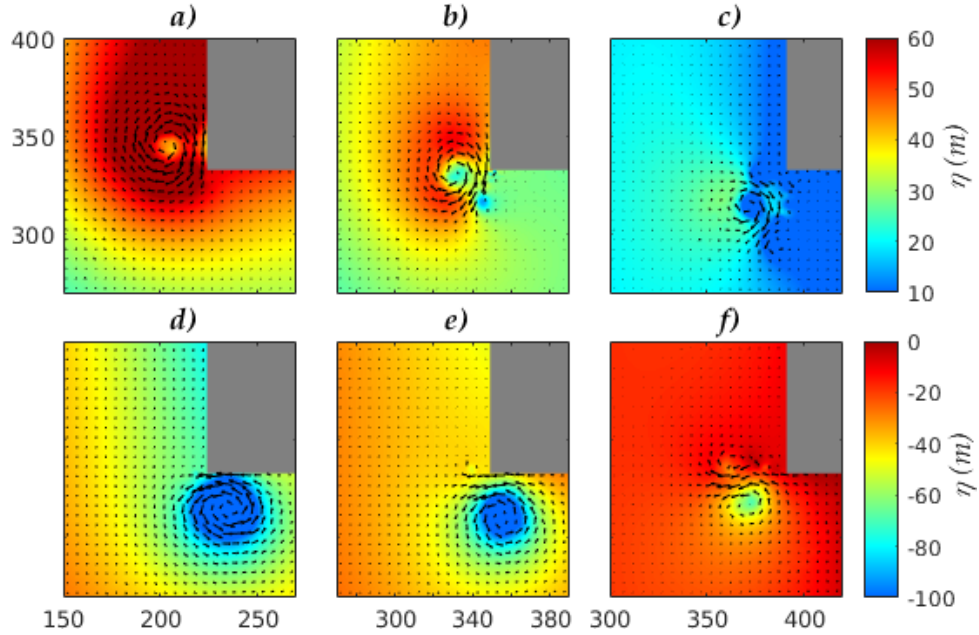


Figura 17: Desplazamiento de la interfase η (color) y vectores de velocidad (flechas negras, se muestran 1 de cada 5 flechas) en el día 15 de simulación para un canal que se angosta ($D < 0$). Los paneles superiores corresponden a OKC de elevación para D : a) -200 km, b) -75 km y c) -33 km. Los paneles inferiores corresponden a OKC de depresión para D : d) -200 km, e) -75 km y f) -33 km. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km.

Para las simulaciones donde el canal se ensancha, los remolinos formados por OKC de elevación también mostraron un ligero cambio en la amplitud con respecto a D (Figura 18a - c), al igual que en la Figura 17. La intensidad de las corrientes en la periferia de los remolinos, también presentan un incremento significativo conforme D aumentó (Figura 18a - c). Por su parte, los remolinos producidos por OKC de depresión (Figura 18d - f), similar a lo descrito en la Figura 17, presentan un aumento en su radio. Por su parte, las corrientes alrededor del remolino muestran un ligero incremento conforme aumenta el parámetro D . En este caso no se observó un cambio considerable de la amplitud con respecto a D , contrario a lo observado en la Figura 17d - f.

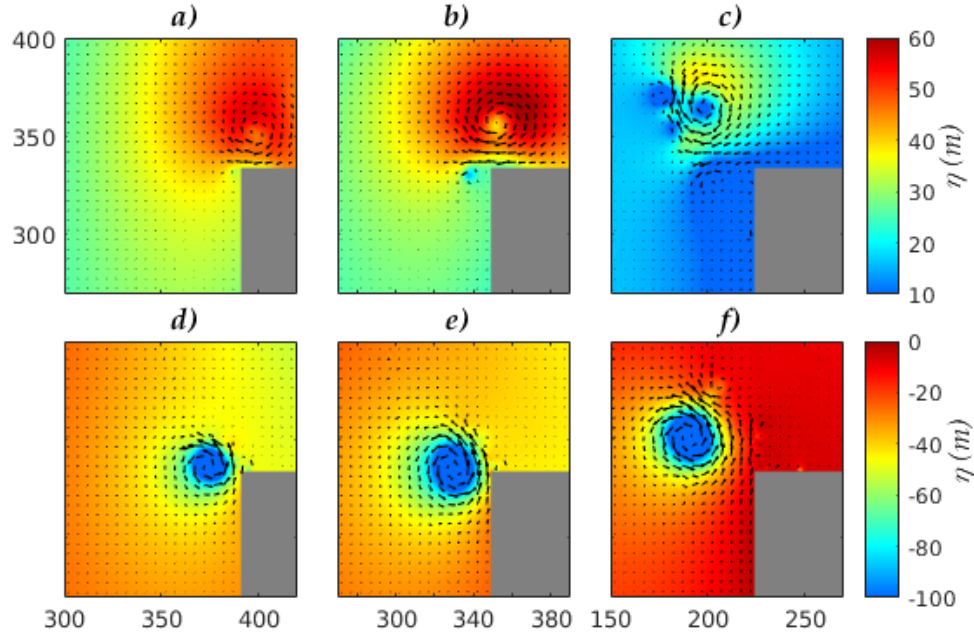


Figura 18: Similar a la Figura 17, pero para canales que se ensanchan. Desplazamiento de la interfase η (color), y vectores de velocidad (flechas negras, se muestran 1 de cada 5 flechas) en el día 15 de simulación en un dominio cuyo canal se angosta ($D < 0$). Los paneles superiores corresponden a OKC de elevación para D : a) 200 km, b) $D = Rd = 75$ km y c) 33 km. Los paneles inferiores corresponden a OKC de depresión en los casos donde D es: d) 200 km, e) $D = Rd = 75$ km y f) 33 km. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km.

En resumen, podemos decir que la energía residual fue más sensible al parámetro D cuando $D < |Rd|$, con cambios de alrededor de 4 %. También se observó que tanto para OKC de depresión como de elevación, la energía mecánica residual está dominada por la energía cinética. La energía potencial residual responde débilmente tanto al parámetro D como al signo de la amplitud de la OKC incidente. Como se mostró en la sección 3.2, la mayor parte de la energía residual se asociada a remolinos remanentes, producidos por la interacción de las corrientes de la OKC con los vértices de las discontinuidades. Por lo tanto, se infiere que los cambios de en la energía residual, están ligados a cambios en las características de los remolinos producidos. Las características de los remolinos dependen fuertemente del signo de la amplitud de la onda incidente, y (en menor medida), dependen del parámetro D . Aunque las respuestas más significativas se deben a cambios en el parámetro D .

3.4. Propagación de una OKC de diferentes amplitudes a lo largo de una costa irregular

Las OAC observadas en la región del Pacífico Mexicano presentan un rango vasto de amplitudes (Enfield y Allen, 1983), por ello se considera relevante estudiar el efecto de la amplitud de una OKC sobre su propagación a lo largo de una costa discontinua. Para estudiar la propagación de una OKC de diferentes amplitudes a lo largo de una costa irregular, se diseñó un conjunto de experimentos numéricos sistemáticos, implementando un canal que se angosta (Figura 7b). Se analiza la respuesta de la energía mecánica residual en función de la amplitud de la OKC incidente.

Al igual que en las secciones 3.2 y 3.3, se introduce una OKC con escala temporal de 5 días, pero en este caso se varía la amplitud en un rango de $\eta = \pm 140$ m. Las características y parámetros del modelo son los mismos que han sido implementados anteriormente (secc. 3.2 - 3.3), definidos en la sección 3.2.

En la Figura 19 se puede apreciar que tanto para ondas de elevación como de depresión, la energía mecánica residual aumenta casi linealmente con la amplitud, al menos dentro del rango de amplitudes estudiado. Ondas incidentes con amplitudes negativas ($\eta_0 < 0$) generan un porcentaje de energía residual ligeramente mayor que las OKC de amplitud positiva ($\eta_0 > 0$).

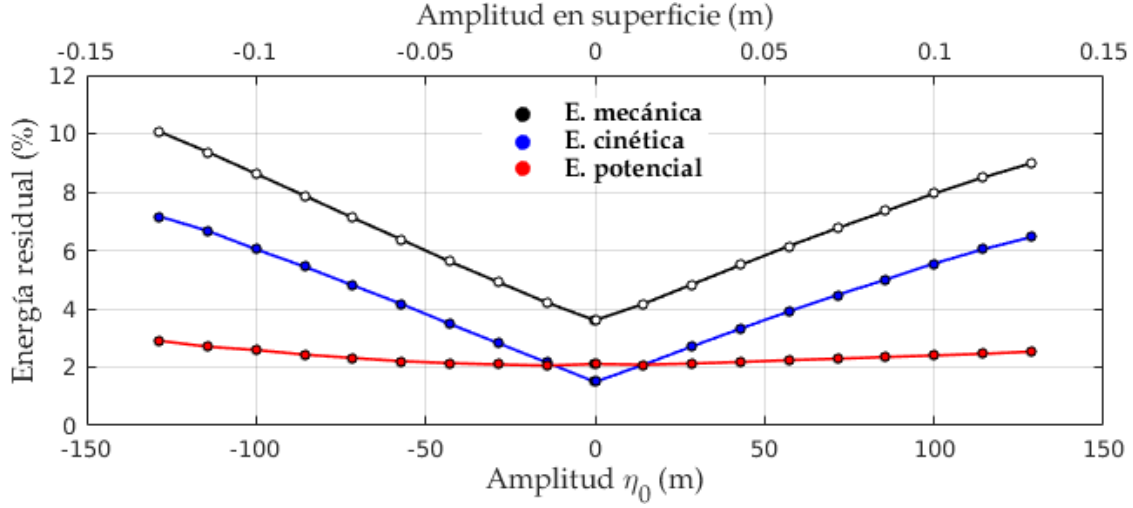


Figura 19: Energía residual en función de la amplitud de la OKC incidente. En el eje horizontal inferior, se muestran las amplitudes de la OKC incidente (η_0), mientras el eje horizontal superior muestra la amplitud que la OKC produciría en la superficie. Los colores de las líneas indican la energía mecánica (negro), cinética (azul) y potencial (rojo).

Al igual que en la sección 3.3, se observó que la energía cinética (Figura 19, línea azul) domina la energía residual, excepto cuando la amplitud es muy pequeña ($\eta_0 = 0.1m$). La energía potencial residual no presenta grandes cambios con respecto a la amplitud. Los valores máximos de energía potencial se manifestaron en simulaciones de ondas de depresión con las amplitudes de mayor magnitud (Figura 19, línea roja).

En lo referente a las estructuras residuales, tal como se observó en secciones anteriores (3.1 - 3.3), las estructuras más energéticas fueron los remolinos producidos por la interacción de la OKC incidente con la discontinuidad. Además, tanto el radio como la amplitud de los remolinos principales, responde significativamente al signo de la amplitud de la OKC incidente (Figura 20). Los remolinos producidos tanto por OKC de elevación como de depresión, mostraron un aumento de las corrientes en la periferia conforme

aumentó $|\eta_0|$. También es evidente que tanto por OKC de elevación como de depresión, el radio y la amplitud de los remolinos principales, también aumentaron conforme aumentó $|\eta_0|$ (Figura 20).

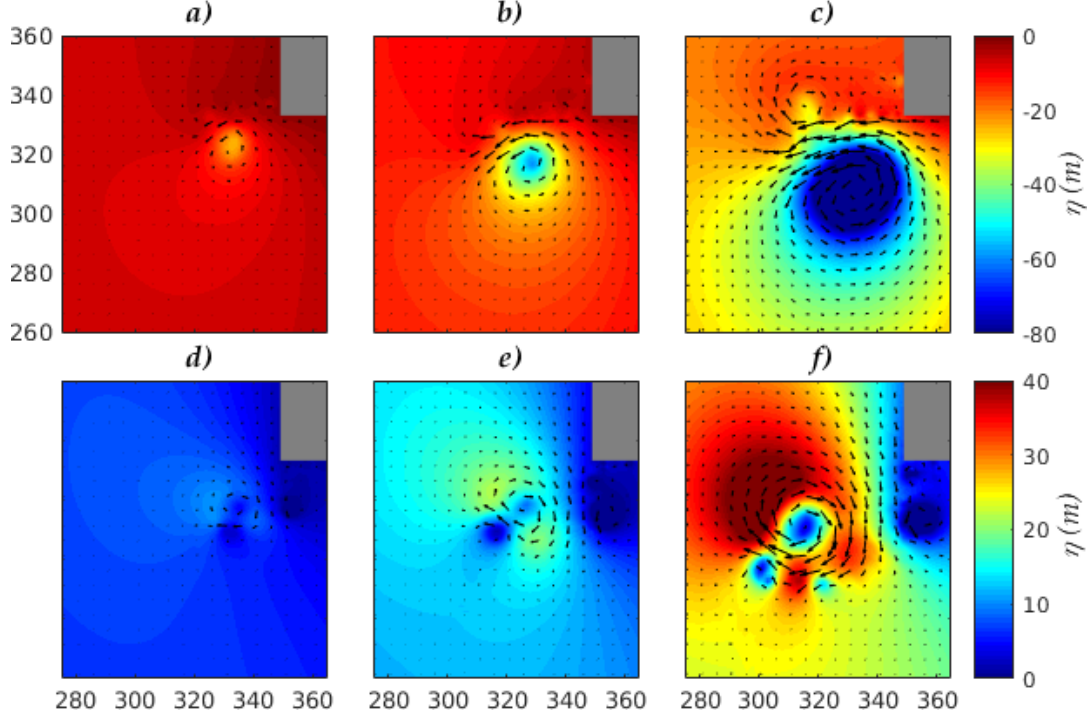


Figura 20: Acercamiento a la zona de generación de remolinos. El mapa de color muestra el desplazamiento de la interfase y las flechas representan las corrientes observadas en el día 16.67 de simulación (se muestran 1 de cada 5 flechas). Los paneles superiores corresponden a OKC de depresión con η_0 de: a) -43 m, b) -71 m, y c) -128 m. Los paneles inferiores corresponden a OKC de elevación con η_0 de: d) 43 m, e) 71 m, y f) 128 m. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km.

Con base en lo observado en esta sección, podemos concluir que dentro del rango de amplitudes estudiadas, la energía mecánica residual se comporta de forma casi lineal con respecto a la amplitud de las OKC incidentes, sin mostrar indicios de convergencia a un valor máximo.

El comportamiento de la energía mecánica residual está controlado por la energía cinética, por ello, se infiere que la energía mecánica residual res-

ponde a cambios en los remolinos observados en el dominio. Tanto para OKC de elevación como de depresión, las características de los remolinos principales (radio, amplitud y velocidad en la periferia) aumentan conforme η_0 se incrementa.

Las ondas de depresión tendieron a dejar porcentajes mayores de energía mecánica residual. Lo anterior podría estar asociado a que los remolinos producidos por OKC de depresión en general son más grandes en la escala horizontal y en amplitud que los remolinos producidos por OKC de elevación (Figura 20), hecho que también fue observado en las secciones 3.2 y 3.3.

3.5. Propagación de OKC de diferentes escalas temporales a lo largo de una costa irregular

Las OAC que se han observado en las costas occidentales mexicanas, presentan una diversidad considerable en sus parámetros. Se han reportado OAC con periodos de 2.7 a 90 días (Enfield y Allen, 1983; Gutiérrez *et al.*, 2014). En esta sección se proponen simulaciones de una OKC incidente de diferentes escalas temporales, a lo largo de una costa discontinua. Los parámetros del modelo son los mismos definidos en la sección. 3.2, pero en este caso, la escala temporal de la onda incidente varía en un rango de 0.5 hasta 12 días. Se utiliza un dominio cuyo canal se angosta (Figura 7b).

Se observó que si la escala temporal de la onda incidente es menor al periodo inercial local es posible que cuando la OKC llegue a la discontinuidad, se excite una onda de Poincaré “viajera” (con número de onda real) (Figura 21), que puede propagarse en cualquier dirección. Por otro lado, si la escala temporal de la onda incidente es menor al periodo inercial, la onda de Poincaré excitada sería evanescente (tendría un número de onda complejo), es decir, no se propagaría.

En la Figura 21, se observa como el frente de una OKC con una escala temporal de 0.5 días, alcanza la discontinuidad en el día 2.5 de simulación. Debido a que el periodo inercial en la latitud de la discontinuidad es de 1.93 días lo que permite la existencia de ondas de Poincaré no evanescentes,

y a que la condición de frontera en la costa requiere que las velocidades perpendiculares a la costa ($v = 0$), la onda debe desviar su trayectoria, por lo que parte de su energía se transfiere a ondas de Poincaré “viajeras”. Entre los días 3.13 y 3.38 de simulación la OKC se encuentra cruzando la discontinuidad, y comienza a aparecer una estructura de amplitud positiva.

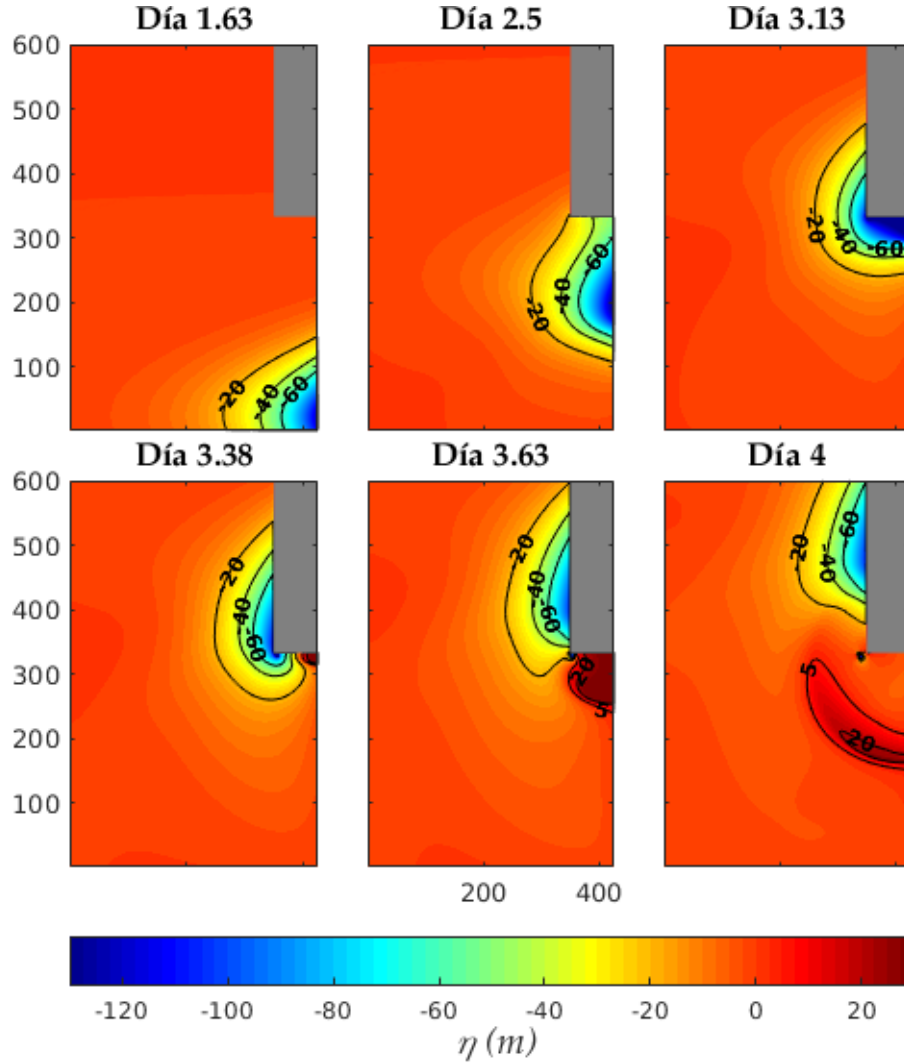


Figura 21: Desplazamiento de la interfase en diferentes tiempos de simulación. Simulación de una OKC de amplitud negativa, con un escala temporal de 1 día. Se muestran con línea negra, los contornos de η de -20 , -40 , -60 , 5 y 20 m. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km.

En el día 3.63 de simulación, la estructura que se ha formado en la discontinuidad ha aumentado sus dimensiones horizontales, y comienza a desprenderse de la línea de costa (Figura 21). Para el día 4 de simulación la estructura se comporta como una onda de Poincaré que viaja hacia el sur, mientras la OKC continúa propagándose hacia el norte.

En algunas simulaciones se observó que OKC con escala temporal superior al periodo inercial, se produjeron ondas de Rossby (Figura 22), y como se ha observado en secciones anteriores, el signo de la amplitud de las ondas de Rossby es el mismo que el de la OKC incidente. Se observa además que las dimensiones horizontales (en la dirección x) de las ondas de Rossby aumentan notoriamente conforme aumenta la escala temporal de la OKC. Esto sucede tanto para OKC de depresión como de elevación (Figura 22, paneles superiores e inferiores respectivamente). Este aumento de las dimensiones de las ondas de Rossby se manifiesta como un incremento en la distancia que separa las isolíneas de $\eta = 10$ m en la dirección x . Así mismo, se puede apreciar que la amplitud de las ondas de Rossby también se incrementa a medida que la escala temporal crece.

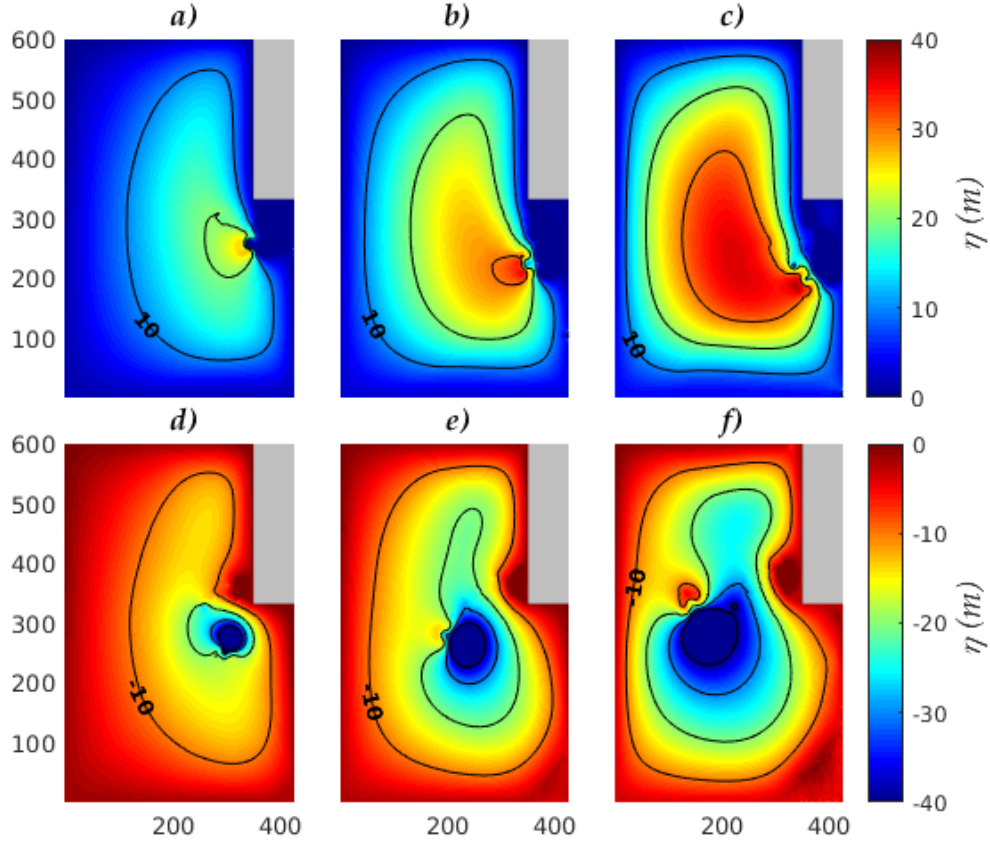


Figura 22: Desplazamiento de la interfase (η) 8.5 días después de que la OKC ha salido del dominio, para OKC incidentes de elevación con escala temporal de a) 6 d., b) 9 d., c) 12 d. paneles superiores. Los paneles inferiores muestran simulaciones de OKC de depresión con escala temporal de: d) 6 d., e) 9 d., y f) 12 d. La línea negra representa los contornos de η con un intervalo de contorno de 10 m. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km.

En la Figura 23 se muestra la energía residual en función de la escala temporal de la onda incidente, obtenida cuando la OKC ha salido del dominio numérico. Se observa que la energía residual mostró una respuesta moderada para escalas temporales mayores a un día, y una respuesta fuerte ante escalas temporales menores a un día (Figura 23), sin embargo, es pertinente mencionar que las OAC reportadas, presentan en general periodos mayores al inercial.

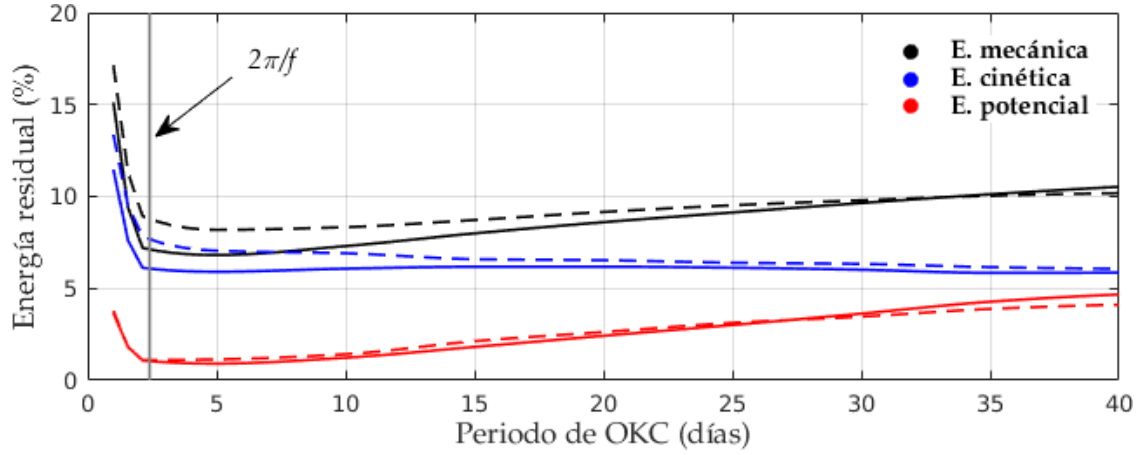


Figura 23: Energía residual en función de la escala temporal de las OKC. Las líneas discontinuas corresponden a OKC de depresión. Las líneas sólidas corresponden a OKC de elevación. Los colores de las líneas indican la energía mecánica residual (negro), energía cinética residual (azul) y la energía potencial residual (rojo). La línea gris vertical denota el periodo inercial máximo del dominio (2.41 días).

Se observa que tanto para OKC de elevación como de depresión, la energía mecánica residual mostró sus cambios más intensos cuando la escala temporal es menor al periodo inercial máximo de la cuenca (2.40 días), donde la energía residual aumenta rápidamente al disminuir la escala temporal. Por otro lado, para escalas temporales mayores a 2 días, la energía residual mostró un incremento gradual conforme aumenta la escala temporal de las OKC y parece converger a un valor máximo cerca de los 12 días. Para escalas temporales menores a 10 días, la energía residual de las OKC de depresión es mayor a la de ondas de elevación. El porcentaje máximo de energía residual se encontró en el caso de una OKC de depresión con escala temporal de 0.5 días, y es del 17.1 % (Figura 23). Mientras el valor mínimo se encontró en el caso de OKC de elevación con escala temporal de 2 días, que mostró un 6.8 % de energía mecánica residual. Al igual que lo observado en las secciones anteriores, la mayor parte de la energía residual total

está en forma de energía cinética, la cual principalmente es debida a remolinos de escalas variables. En todos los casos estudiados en esta sección, la energía cinética residual de las ondas de depresión es ligeramente mayor que la de las ondas de elevación, aunque esta diferencia se minimiza para escalas temporales mayores a 4 días. Tanto para OKC de elevación como de depresión, la energía cinética residual mostró una respuesta casi nula a la escala temporal, para escalas temporales mayores al periodo inercial. Por otro lado, se observó que al igual que la energía cinética residual, la energía potencial mostró una respuesta más fuerte a la escala temporal en escalas temporales menores al periodo inercial. Por su parte, a diferencia de la energía cinética residual, la energía potencial continúa incrementándose ante escalas temporales mayores al periodo inercial, hasta converger a un valor máximo.

El radio de los remolinos observados también mostró un aumento conforme la escala temporal de la OKC incidente se incrementó, mientras la amplitud parece no responder a la escala temporal. Así mismo, como se mostró en las secciones anteriores, los remolinos producidos por OKC de depresión poseen radios más grandes que los producidos por las ondas de elevación (no mostrado).

A partir de lo observado en esta sección, podemos concluir que sin importar el signo de la amplitud, para OKC con escalas temporales menores al periodo inercial (Figura 23), la energía residual aumenta rápidamente

al disminuir la escala temporal. El aumento de energía residual puede ser debido a que se generan ondas de Poincaré viajeras, y además, al disminuir la escala temporal y mantener la amplitud, las ondas son cada vez más fuertemente no lineales. Por otro lado, si la escala temporal de la OKC incidente es mayor al periodo inercial, la energía mecánica residual aumenta lentamente al igual que la energía potencial, mientras la energía cinética se mantiene prácticamente constante.

3.6. Propagación de una OKC a lo largo de una costa discontinua en distintas latitudes

Las principales irregularidades de la costa mexicana del Pacífico se distribuyen en un amplio rango de latitudes ($11^\circ N$ a $32.5^\circ N$), por ello es relevante estudiar la propagación de OKC a diferentes latitudes. Para estudiar el efecto de la latitud sobre la propagación de una OKC (de elevación y depresión) a lo largo de una costa irregular, se diseñó una serie de experimentos numéricos variando la latitud del dominio. En todos los casos el dominio tiene 6 grados de latitud (600 puntos en y , 425 puntos en x). La línea de costa corresponde a un canal que se angosta (Figura 7b), y la discontinuidad se encuentra en la latitud central del dominio. El ancho de la discontinuidad (D) se definió como un radio de deformación ($D = Rd$), para OKC con celeridad $c = 2.8ms^{-1}$. El radio de deformación varía en función de la latitud, por ello el ancho de la discontinuidad tendrá un valor distinto para cada latitud implementada (Figura 24).

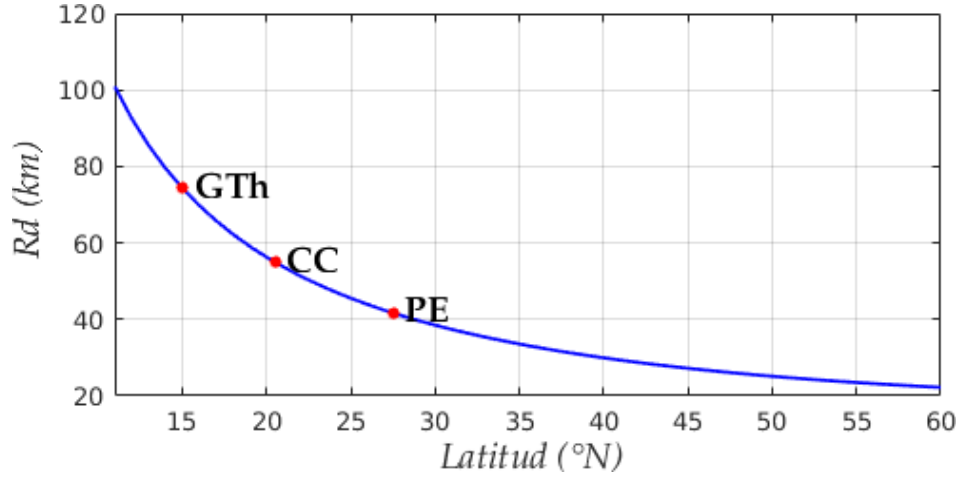


Figura 24: Radio de deformación R_d (km) en función de la latitud. Los puntos rojos señalan la latitud de algunos de los principales rasgos en la línea de costa en el Pacífico mexicano. **GTh** (Golfo de Tehuantepec), **CC** (Cabo Corrientes) y **PE** (Punta Eugenia).

A diferencia de lo mostrado en secciones anteriores (secc. 3.2 - 3.5), se observó que a latitudes mayores a 30° N, una OKC de elevación produce un remolino anticiclónico que presenta un desplazamiento positivo de la interfase (Figura 25c y d). Mientras que a latitudes menores a 30° N, los remolinos formados por OKC de elevación presentan un hundimiento de la interfase (Figura 25a y b), como se ha observado anteriormente. Por lo observado, se sugiere que los remolinos producidos por OKC de elevación, adquieren un balance más cercano al geostrófico cuando se generan en latitudes mayores.

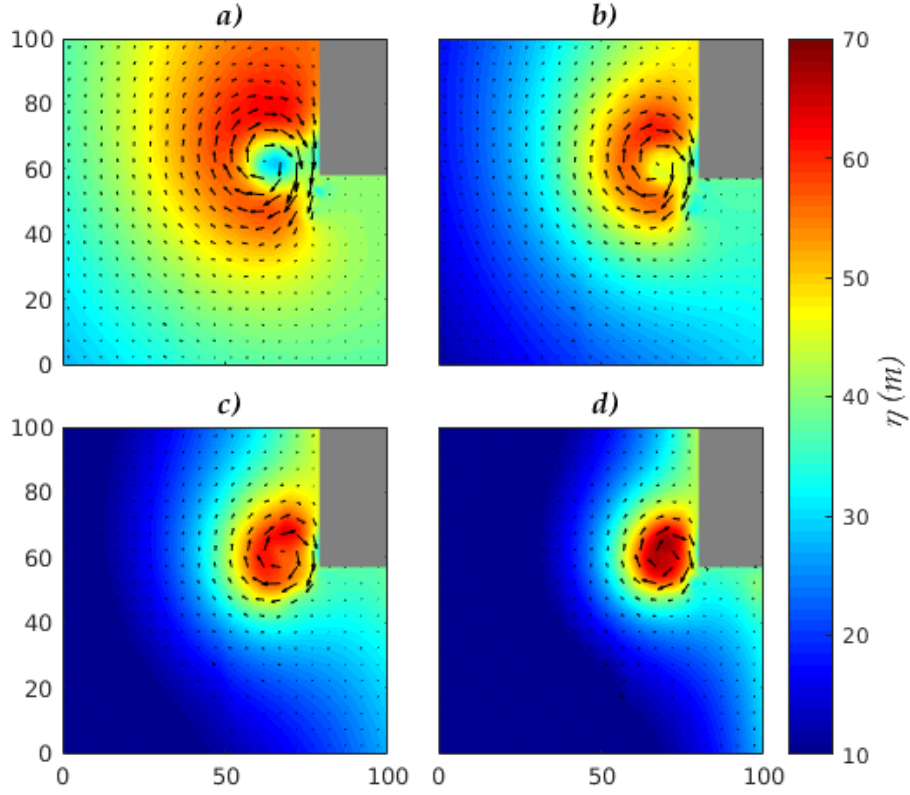


Figura 25: Acercamiento a los remolinos generados en algunas de las simulaciones de OKC de elevación. En color se muestra el desplazamiento de la interfase y los vectores de velocidad de las corrientes se muestran con flechas negras, en el día 16.67 de simulación. La latitud de la discontinuidad es a) 15° N, b) 25° N, c) 40° N y d) 60° N. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km.

Por otro lado, los remolinos producidos por OKC de depresión (Figura 26), mostraron una disminución en su radio y en la amplitud conforme aumentó la latitud. Estos remolinos presentan un hundimiento de la interfase a todas las latitudes, como se observó en secciones anteriores (secc. 3.2 - 3.5).

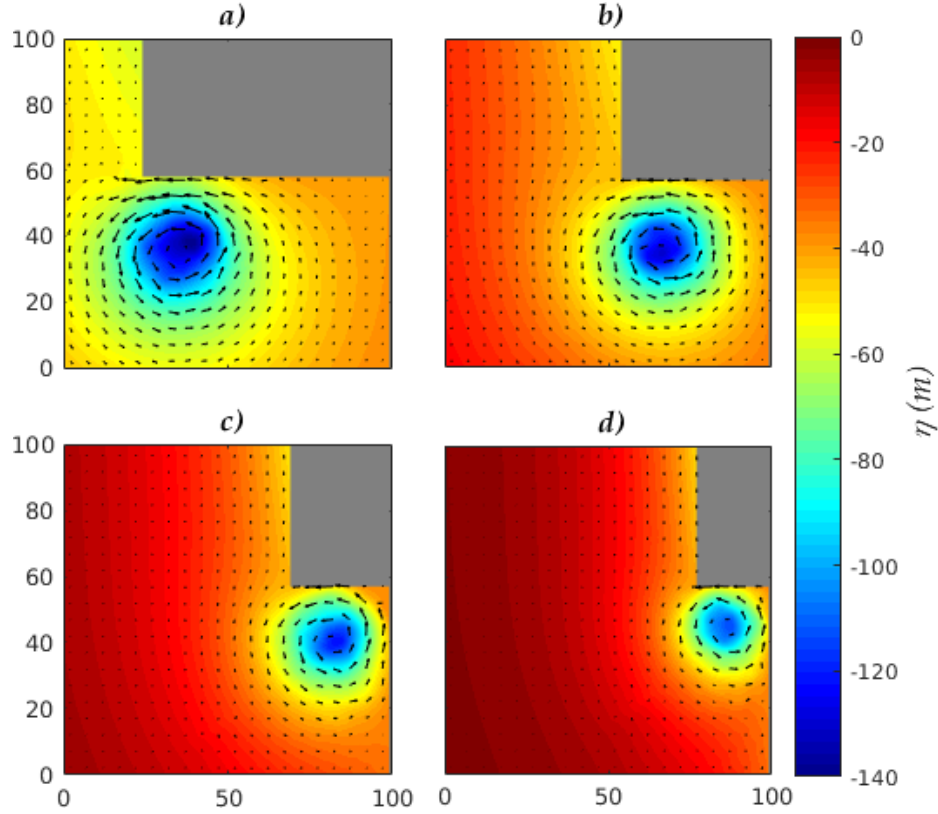


Figura 26: Similar a la Figura 25 pero para OKC de depresión. Acercamiento a los remolinos generados en algunas de las simulaciones. En color se muestra el desplazamiento de la interfase y los vectores de velocidad de las corrientes se muestran con flechas negras, en el día 16.67 de simulación. La latitud de la discontinuidad es a) 15° N, b) 25° N, c) 40° N y d) 60° N. Las unidades en ambos ejes son de distancia en km.

En la Figura 27 se puede apreciar que la energía residual disminuye conforme aumenta la latitud. A latitudes menores a 45° N, la energía residual de OKC de depresión es mayor que la de OKC de elevación (Figura 27, líneas negras). La energía cinética residual de OKC de depresión mostró una disminución prácticamente lineal con respecto a la latitud, y es mayor que la energía cinética residual de OKC de elevación cuando la latitud es menor a 37° N (Figura 27, línea azul punteada). En todos los casos, la energía potencial residual de las OKC de depresión es ligeramente mayor que la de OKC de elevación (Figura 27, líneas rojas).

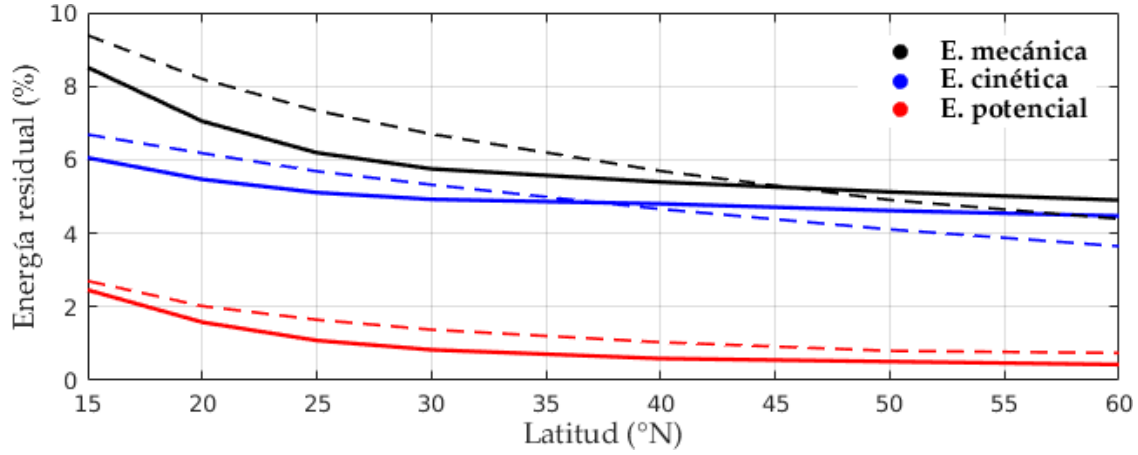


Figura 27: Porcentaje de la energía total que permanece dentro del dominio una vez que la onda incidente ha salido de éste (Energía residual). Las líneas continuas representan la energía residual de OKC de elevación ($\eta_0 > 0$), mientras las líneas discontinuas corresponden a la energía residual de OKC de depresión ($\eta_0 < 0$). Los colores de las líneas indican la energía mecánica (negro), cinética (azul) y la potencial (rojo).

Con base en los resultados de esta sección, podemos decir que tanto para OKC de depresión como de elevación la energía mecánica residual es mayor a menores latitudes. El decaimiento de la energía residual con la latitud parece tener un carácter exponencial. Se infiere que tanto para OKC de depresión como de elevación, la disminución de la energía cinética con la latitud puede estar asociada a la disminución del radio de los remolinos, aunque este cambio es más evidente en los remolinos producidos por ondas de depresión.

A diferencia de lo observado en las secciones anteriores (secc. 3.2 a 3.5), se observó que a latitudes mayores a $30^\circ N$, los remolinos producidos por OKC de elevación mostraron un desplazamiento positivo de la interfase (Figura 25c y d), y dado, que todos los remolinos producidos por OKC de elevación tienen un sentido de giro anticiclónico, las características de

estos remolinos son consistente con geostrofia, lo que podría sugiere que los remolinos producidos a latitudes mayores a $30^\circ N$, podrían alcanzar un balance más cercano al geostrófico a latitudes mayores, donde la escala horizontal de las estructuras geostróficas (y el radio de deformación baroclínico) es menor.

3.7. Propagación de OKC a lo largo de la costa del Pacífico Mexicano

La línea de costa del Pacífico Mexicano (Figura 1 y 28e) presenta una serie de discontinuidades con características diversas. En particular, destacan el Golfo de Tehuantepec (**GTh**), Cabo Corrientes (**CC**), Punta Eugenia (**PE**), y el Golfo de California (**GC**), además de otras irregularidades con escalas espaciales menores. En las secciones anteriores se mostró la capacidad que tienen las irregularidades de la línea de costa para extraer energía de las OKC. La energía extraída o residual, permanece relativamente cerca del lugar de generación por periodos de tiempo considerables, por lo que es probable que contribuya de forma significativa a la dinámica costera local.

Para estudiar el efecto de la línea de costa del Pacífico mexicano sobre la propagación de OKC, se implementó el mismo modelo usado previamente (secc. 3.2 - 3.6, secc. 2), pero en este caso se utilizó la línea de costa real. La línea de costa fue extraída del producto ETOPO1, y posteriormente rotada para disminuir el número de puntos en tierra. El dominio numérico se muestra en la Figura 28e (<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>). El modelo utilizado ha sido descrito anteriormente (secc. 3.1 y 3.2), pero ya que en esta sección se utiliza información realista, el parámetro de Coriolis f es calculado a partir de las coordenadas reales. La profundidad de la capa activa es de $H_o = 800$ m, y la gravedad reducida es de $g' = 0.0098 \text{ ms}^{-1}$, los cuales combinados resultan en una velocidad de fase de $c = 2.8 \text{ ms}^{-1}$

que es representativa de observaciones (Enfield y Allen, 1983). Los detalles numéricos del modelo se presentaron en la sección 2.

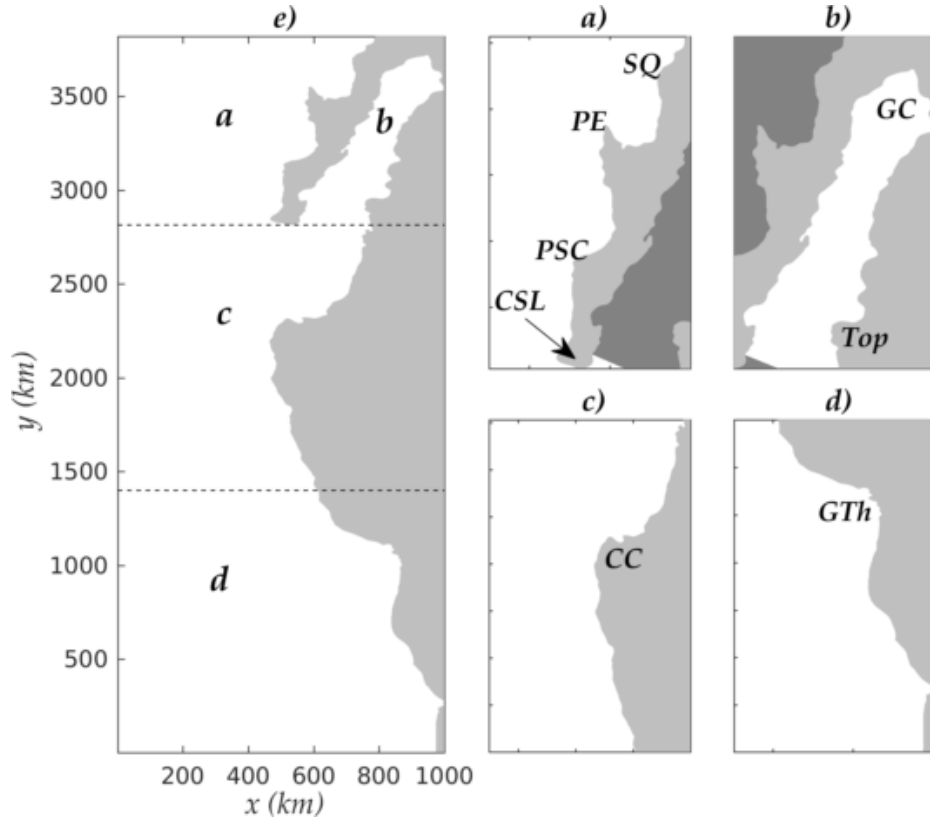


Figura 28: e) Dominio numérico (1003 x 3820 *pts*), costa del Pacífico Mexicano. Las líneas punteadas delimitan las zonas: a) Pacífico de Baja California (*PBC*). b) *GC*. c) *CC*. d) *GTh*. Las zonas grises representan puntos en tierra y, la zona blanca representa el océano. *SQ*: San Quintín, *PSC*: Puerto San Carlos, *CSL*: Cabo San Lucas, *Top*: Topolobampo.

En cada simulación se hace incidir una OKC por la frontera sur del dominio. Se introducen OKC tanto de elevación como de depresión, de diferentes escalas temporales, representativas de periodos de OAC observados en las costas del Pacífico Mexicano (Enfield y Allen 1983; Gutiérrez, *et al.*, 2014). Las escalas temporales consideradas fueron de 1, 5, y 10 días, con una amplitud de $\eta_0 = \pm 120$ m.

El objetivo de la presente sección es conocer la distribución de energía residual que se genera gracias al efecto de las discontinuidades de la costa sobre la propagación de una OKC. Al igual que en secciones anteriores, se analiza la energía mecánica integrada en el dominio cuando la onda incidente ha salido de éste (energía residual). Además de la energía residual, se utiliza la componente vertical de la vorticidad relativa ($\vec{\zeta}$) como un indicador de actividad de remolinos como principales estructuras residuales. La vorticidad relativa está definida como el rotacional del campo de velocidad:

$$\vec{\zeta} = \nabla_h \times \vec{v}$$

A continuación se muestran los resultados observados en las simulaciones de esta sección. En la Figura 29, se muestra como ejemplo la propagación de una OKC de depresión, con escala temporal de 10 días, a lo largo de la costa del Pacífico Mexicano.

Se observa que en el día 25, el frente de la onda ya ha pasado por el GTh y CC y comienza a entrar en el GC, mientras la cola de la onda al sur se encuentra cruzando el GTh (Figura 29). Para el día 36, la OKC se encuentra dentro del GC y el frente de la onda está por salir del golfo, mientras el resto de la onda continúa propagándose hacia el norte. También se pueden apreciar algunas estructuras residuales que se han generado en la zona de CC y el GTh. En el día 47 de simulación, la onda se encuentra sobre la Península de Baja California y ha comenzado a salir del dominio por la

frontera norte. En el día 58 la onda ha salido por completo del dominio y se observa una serie de perturbaciones a lo largo de la costa, que son más evidentes en CC, y en el GC, así como en PE, donde se observó el remolino de mayor dimensión horizontal.

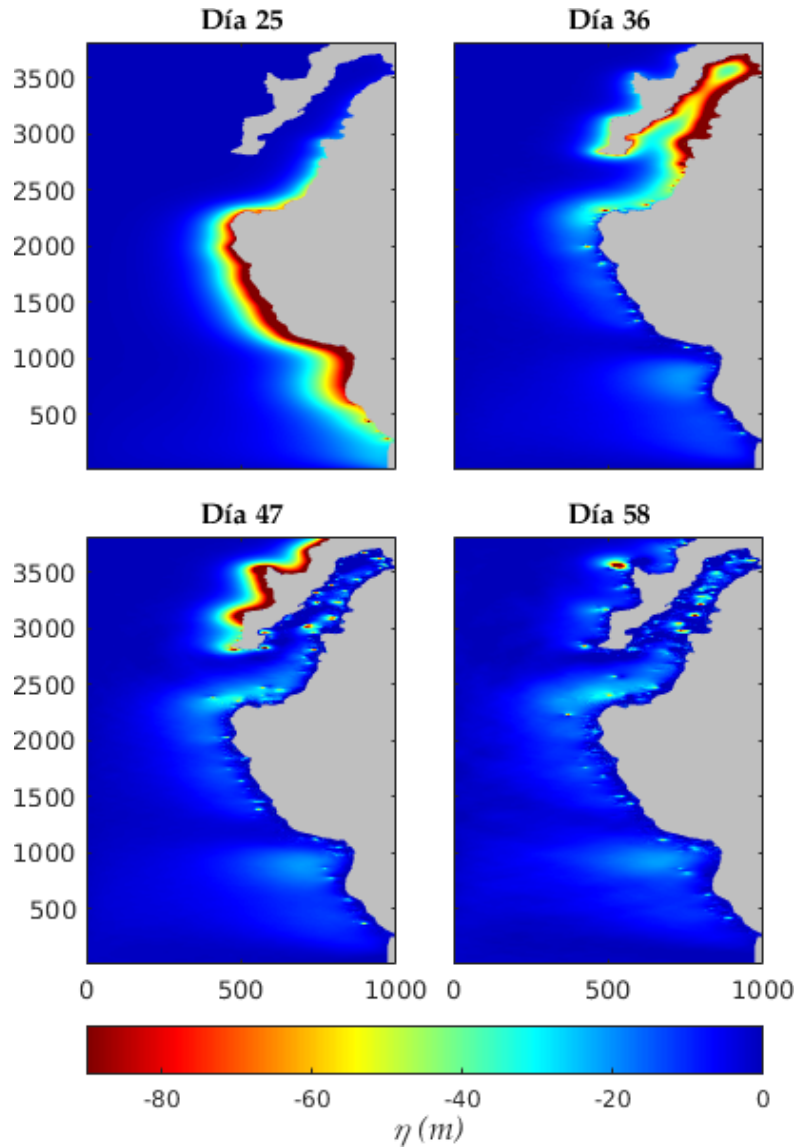


Figura 29: Desplazamiento de la interfase (η) para diferentes días de simulación. En esta Figura la onda incidente es de depresión y su escala temporal es de 10 días. Las unidades de ambos ejes son de longitud en km.

Una de las principales diferencias entre los resultados obtenidos en esta sección, y los obtenidos en las secciones previas con dominios idealizados, es que el porcentaje de energía residual generada sobre una costa real (Tabla III), es en todos los casos, mucho mayor que el observado en costas idealizadas (Tabla II). Lo anterior podría estar relacionado a que la costa real presenta un gran número de discontinuidades de distintas escalas, mientras que para costas idealizadas se utilizó solo una discontinuidad.

Tabla III: Porcentajes de la energía incidente (total) que queda en el dominio una vez que la OKC incidente ha salido de éste (energía residual), integrada en todo el dominio. **E. temp.** es la escala temporal en días de la OKC.

E. temp (<i>das</i>)	Energía mecánica (%)	
	$(\eta_0 < 0)$	$(\eta_0 > 0)$
1	63.2	53.2
5	65.6	48.7
10	61.2	48.8

Se observó que la energía residual total en todo el dominio, mostró una alta dependencia del signo de la amplitud de la OKC. Para las tres escalas temporales, las ondas de depresión produjeron porcentajes de energía residual considerablemente mayores que las OKC de elevación, con diferencias del 10 al 17 %. En la Tabla IV, se presenta el porcentaje de energía residual, integrada en cada una de las regiones (Figura 28a - d).

Tabla IV: Porcentaje de energía mecánica total presente en el dominio una vez que la OKC ha salido de éste (Energía residual %), integrado por zona. **PBC:** Pacífico de Baja California. **CC:** Cabo Corrientes. **GTh:** Golfo de Tehuantepec. **GC:** Golfo de California. E. temp. es la escala temporal en días de la OKC incidente. D y E corresponden a OKC de depresión y elevación respectivamente.

	PBC	CC	GTh	GC
E. temp. (d)	D/E	D/E	D/E	D/E
1	10.1 / 9.5	17.8 / 13.9	15.5 / 12.6	19.7 / 17.2
5	12.5 / 13.6	15.9 / 9.6	9.7 / 6.5	27.5 / 19.0
10	14.8 / 14.0	14.3 / 10.3	9.0 / 7.4	23.0 / 17.1

Para todas las escalas temporales y amplitudes analizadas, el GC es la zona donde más energía residual se genera (Tabla IV). Se infiere que esto está relacionado a que el GC presenta costas bastante irregulares, tanto al Este como al Oeste. En el Pacífico de Baja California (**PBC**), se observa que la energía aumenta conforme se incrementa la escala temporal (Tabla IV). En esta región también se observa que OKC de elevación mostraron un porcentaje ligeramente mayor al de OKC de depresión, cuando la escala temporal es de 5 días. También se puede observar que la energía residual de OKC de elevación y de depresión disminuye conforme aumenta el periodo en las regiones de CC y el GTh, y se puede apreciar que para las tres escalas temporales estudiadas, las ondas incidentes de depresión dejan más energía que las OKC de elevación.

Las figuras 30 y 31 muestran dos gráficas para cada una de las cuatro áreas en que se dividió la costa del Pacífico Mexicano. Las gráficas de la izquierda muestran la energía residual integrada (en x) horizontalmente, en función de la distancia a lo largo de la costa (y), la integral de la energía

residual en la dirección a lo largo de la costa (y), representa la energía residual total en cada área, mostrado en la Tabla IV). A la derecha se muestra la elevación de la interfase para cada región en un tiempo posterior al paso de la OKC incidente. La OKC de esta simulación tiene escala temporal de 10 días y $\eta_0 = \pm 120$ m. Se puede apreciar que tanto para OKC de depresión como de elevación, los porcentajes máximos de energía residual coinciden con la posición de algunas discontinuidades.

En el GC (Figura 30b y 31b), se observa un máximo de energía residual, que se ubica al Sur del golfo. Esta posición coincide con una serie de discontinuidades, principalmente un angostamiento del canal cerca de la localidad de Topolobampo, además de un ensanchamiento del canal en Bahía de La Paz, en la costa Oeste del GC. En general, el GC mostró una presencia considerable de energía mecánica residual, principalmente energía cinética. Se infiere que la intensa actividad residual en esta cuenca está asociada a las múltiples irregularidades que presenta (tanto de angostamiento como de ensanchamiento del canal) con anchos variables a lo largo de toda la costa del GC.

En el litoral del Pacífico, PE es un área importante de generación de energía residual, PE corresponde a una discontinuidad de ensanchamiento de canal con un ancho aproximado de 100 km (poco más de $2Rd$) (Figura 30a y 31a). En esta zona se produce el remolino de mayor radio observado, que también coincide con el máximo de energía potencial residual de to-

do el dominio, para ondas incidentes con amplitud de ambos signos. Otra región importante fue CSL (Figura 30a y 31a), esta punta representa una discontinuidad con dos ensanchamientos, por lo que presenta dos lados de “sombra” para las corrientes generadas por la OKC, independientemente del signo de su amplitud (Figura 14). Por su parte, CC mostró una acumulación de energía residual justo en la zona de discontinuidad donde el canal se ensancha con un ancho aproximado de $D \approx 140$ km ($D > 2Rd$), por lo que es probable que se generen remolinos que acumulen energía residual en esa región (Figura 30c y 31c). Por otro lado, el GTh muestra un acumulamiento de energía que corresponde con la discontinuidad de angostamiento, aunque en ningún caso rebasa el 1 % (tampoco para OKC de otras escalas temporales). La posición de este cúmulo de energía residual varía ligeramente con respecto al signo de la amplitud, lo cual es consistente con lo descrito en la sección 3.2, donde se determinó que la posición donde se forma un remolino (zona de “sombra”) depende del signo de la amplitud de la OKC y del tipo de discontinuidad (Figura 14).

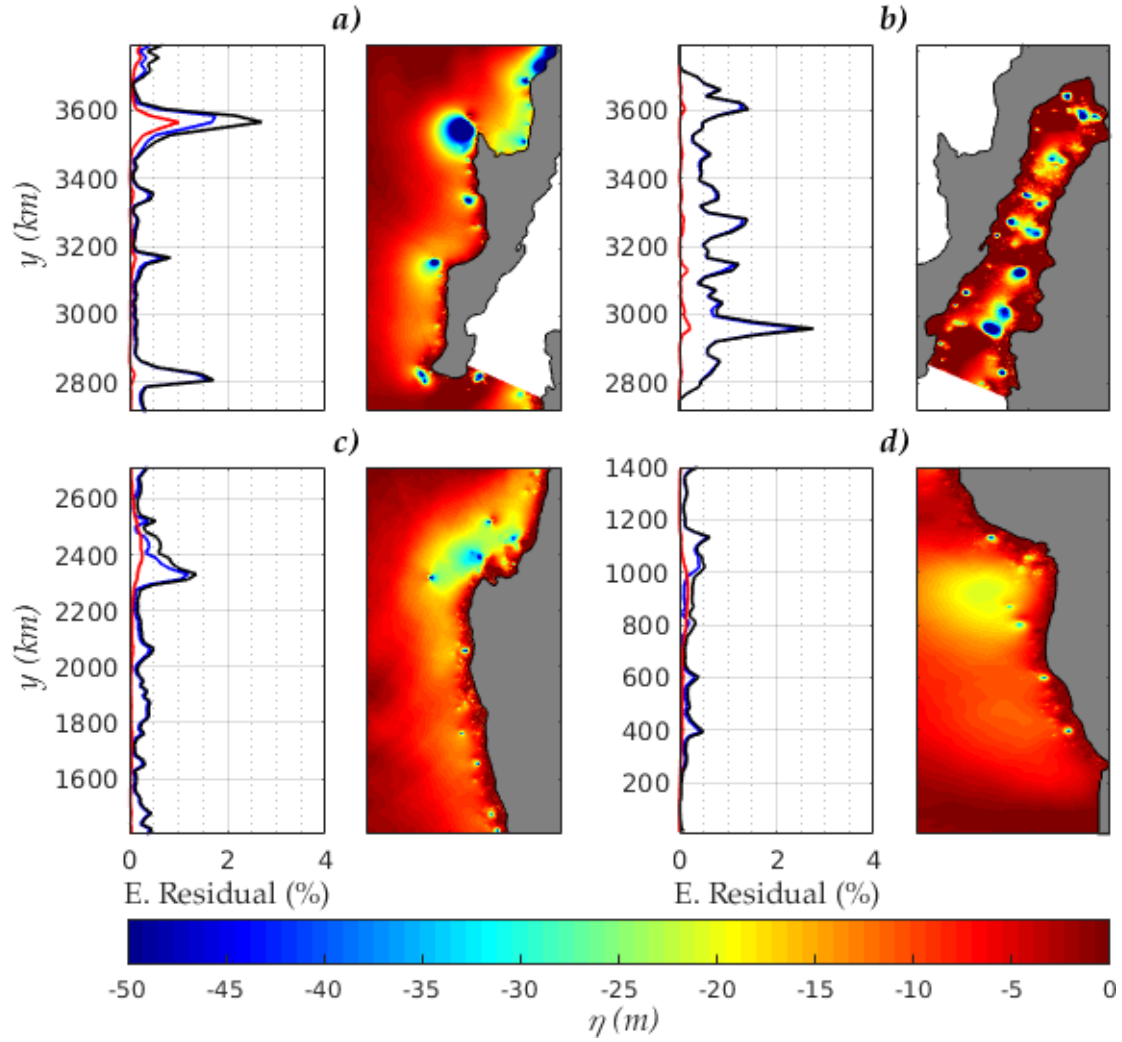


Figura 30: Porcentaje de energía residual integrada horizontalmente en cada zona y desplazamiento de la interfase (η). Las líneas representan la energía residual total (negro), cinética (azul) y potencial (rojo), para las zonas de a) PBC, b) GC, c) CC, y d) GT. La onda incidente es de depresión.

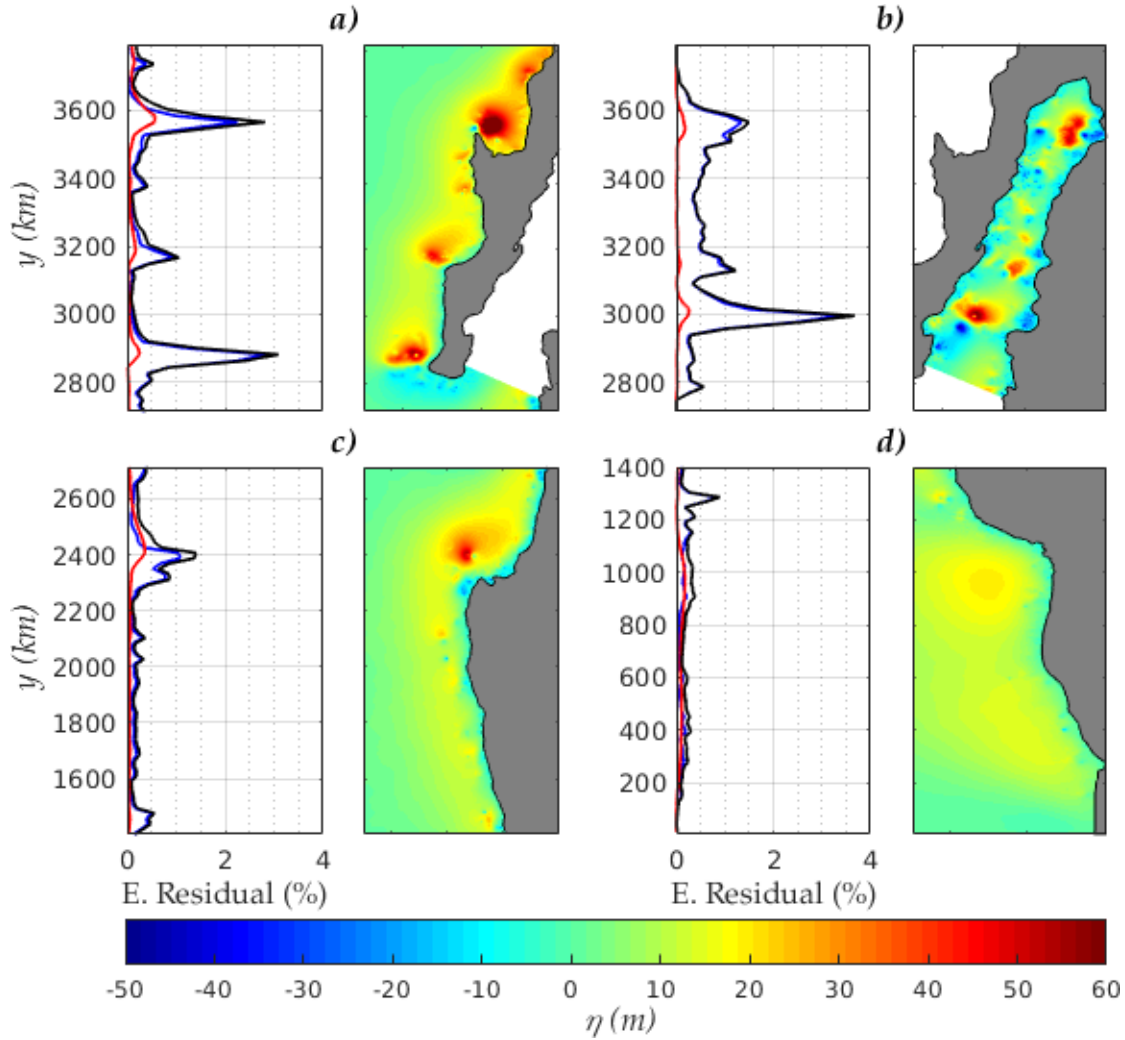


Figura 31: Similar a la Figura 30 pero para OKC de elevación. Porcentaje de energía residual integrada horizontalmente en cada zona y desplazamiento de la interfase. Las líneas representan la energía residual total (negro), cinética (azul) y potencial (rojo), para las zonas de a) PBC, b) GC, c) CC, y d) GT.

La vorticidad relativa (residual) integrada horizontalmente también muestra una distribución espacial cuyos máximos coinciden con las principales irregularidades de la línea de costa. La vorticidad relativa es un indicador de la presencia de remolinos u ondas de Rossby a lo largo de la costa del dominio. Las figuras 32 y 33 muestran la vorticidad relativa dividida entre f , para ondas incidentes de depresión y de elevación respectivamente, de

amplitud $\eta_0 = \pm 120$ m, y escala temporal de 10 días. También se muestra la energía residual y el desplazamiento de la interfase, con el fin de relacionar lo observado con las discontinuidades de la costa.

Tanto para OKC de depresión como de elevación, el GC destaca por mostrar una gran concentración de vorticidad y energía residual (Figura 32a, 33a, 32b, 33b, línea punteadas negras), esta energía residual en el GC se manifiesta como una serie de remolinos, mismos que se pueden observar en el desplazamiento de la interfase (Figura 32c y 33c). En la costa del Pacífico se observan 4 zonas donde la vorticidad relativa (Figura 32a y 33a) y la energía residual (Figura 32b y 33b) muestran máximos relativos, estos máximos coinciden con los lugares donde se produjeron remolinos. Estos lugares son: PE, CSL, CC, y el GTh. Como se mencionó anteriormente, tanto para OKC de depresión como de elevación, el remolino más grande se produce en PE. Las corrientes y el desplazamiento de la interfase de los remolinos mencionados, son consistentes con geostrofia (no mostrado). CSL también muestra actividad residual considerable, probablemente asociada a la presencia de remolinos. CC y el GTh también resaltan por su vorticidad, en estos lugares existe actividad residual significativa. En el caso de CC, la concentración de energía cinética (Figura 32b y 33b, línea azul) sugiere que la actividad de remolinos es la que predomina en ese lugar. Mientras en el GTh, es posible observar una estructura de dimensiones horizontales considerablemente grandes, cuya amplitud tiene el mismo signo que la OKC incidente. Dicha estructura parece corresponder a una

onda de Rossby (Figura 32c y 33c), ya que como se mostró en la sección 3.5, OKC de escala temporal de 10 días pueden producir ondas de Rossby a esas latitudes.

La distribución de la energía residual observada en las figuras 32b y 33b, no es del todo consistente con lo observado en la sección 3.6, donde se observó que a menor latitud el porcentaje de energía residual es mayor, sin embargo, se infiere que otras características de las discontinuidades pueden estar involucradas en el proceso de generación de energía residual, por ejemplo se observa que el vértice de PE posee un ángulo más agudo que el del CC.

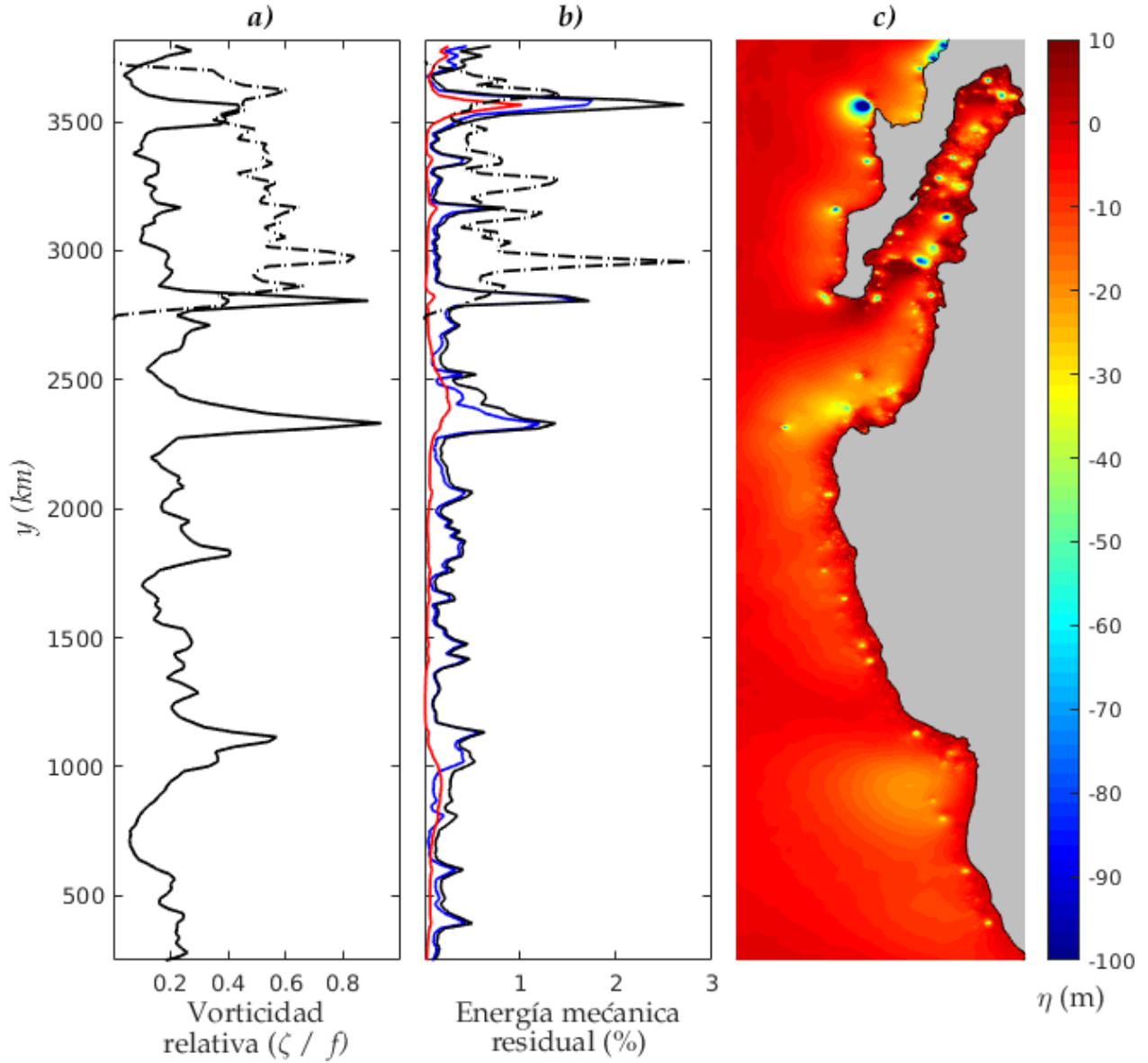


Figura 32: a) Vorticidad relativa residual integrada horizontalmente, dividida por la vorticidad planetaria (f) En el litoral del Pacífico (línea continua) y en el GC (línea punteada). b) Porcentaje de energía mecánica (línea negra continua), cinética (azul) y potencial (roja), integradas en x . Tanto en a) como en b), la línea continua corresponde al litoral del Pacífico, mientras la línea discontinua corresponde a la energía residual en el GC. c) Desplazamiento de la interfase una vez que la OKC ha salido del dominio.

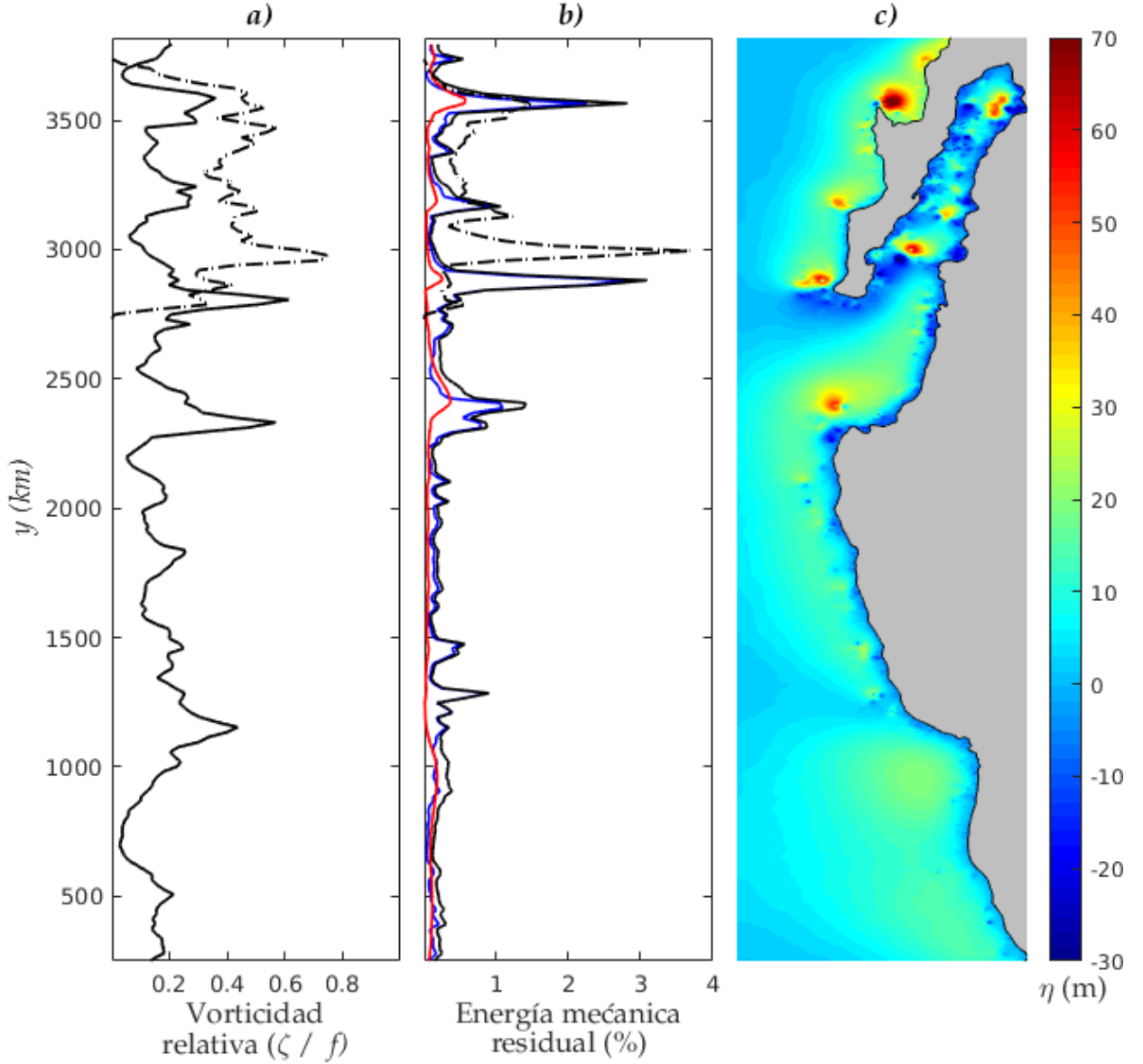


Figura 33: Similar a la Figura 32 pero para OKC de elevación. a) Vorticidad relativa residual integrada horizontalmente, dividida por la vorticidad planetaria (f) En el litoral del Pacífico (línea continua) y en el GC (línea punteada). b) Porcentaje de energía mecánica (línea negra continua), cinética (azul) y potencial (roja), integradas en x . Tanto en a) como en b), la línea continua corresponde al litoral del Pacífico, mientras la línea discontinua corresponde a la energía residual en el GC. c) Desplazamiento de la interfase una vez que la OKC ha salido del dominio.

En resumen, de la presente sección podemos decir que al igual que en secciones anteriores, OKC de depresión producen un porcentaje mayor de energía residual que las OKC de elevación. Sin importar el periodo o el

signo de la amplitud de la OKC, la energía residual y la vorticidad relativa (ambas integradas horizontalmente), presentan máximos relativos que señalan las discontinuidades de la costa de Topolobampo en el GC, y de PE, CSL, CC, y el GTh en la costa del Pacífico, como las zonas más importantes de generación de actividad residual en la costa del Pacífico Mexicano.

Algunos autores han reportado la presencia de remolinos, cerca de la discontinuidad de angostamiento en la costa de la localidad de Topolobampo, ya sea a través de observaciones satelitales (Pegau *et al.*, 2002), o a través de modelos numéricos (Martínez y Allen, 2004b; Zamudio *et al.*, 2008). Por otro lado, en la costa del Pacífico, las discontinuidades de PE, CSL, y CC, han sido reportadas por (Kurczyn *et al.*, 2010), como zonas de generación de remolinos costeros detectados a partir de datos de altimetría satelital. Así mismo, (Flores-Morales, 2012), con un modelo tridimensional, observó que OKC producen remolinos en CSL y CC. El GTh mostró concentraciones relativamente bajas de energía residual, pues los remolinos observados en esta zona son en general de radios bastante reducidos. Sin embargo, la vorticidad relativa señala al GTh como un lugar de actividad residual importante. Esto sugiere que en el GTh, la contribución de ondas de Rossby es relevante para la vorticidad, mientras que la interacción entre línea de costa y OKC, no es un mecanismo dominante en la generación de remolinos en la región. La distribución de la energía residual muestra concentraciones mayores al norte, contrario a lo observado en la sección 3.6 (Figura 27), donde la energía residual disminuye conforme

aumenta la latitud. Lo anterior sugiere que las características de las discontinuidades dominan la generación de energía residual, y a pesar de que no se analiza, se especula que la agudeza de los vértices podría jugar un papel importante en la generación de energía residual.

La Figura 34, muestra la posición del número de remolinos generados (en celdas de $1/2^\circ \times 1/2^\circ$), obtenidos de un censo realizado a partir de altimetría satelital para el periodo de 1993 hasta 2017 (<https://www.aviso.altimetry.fr/>). El Golfo de California no está incluido en este censo.

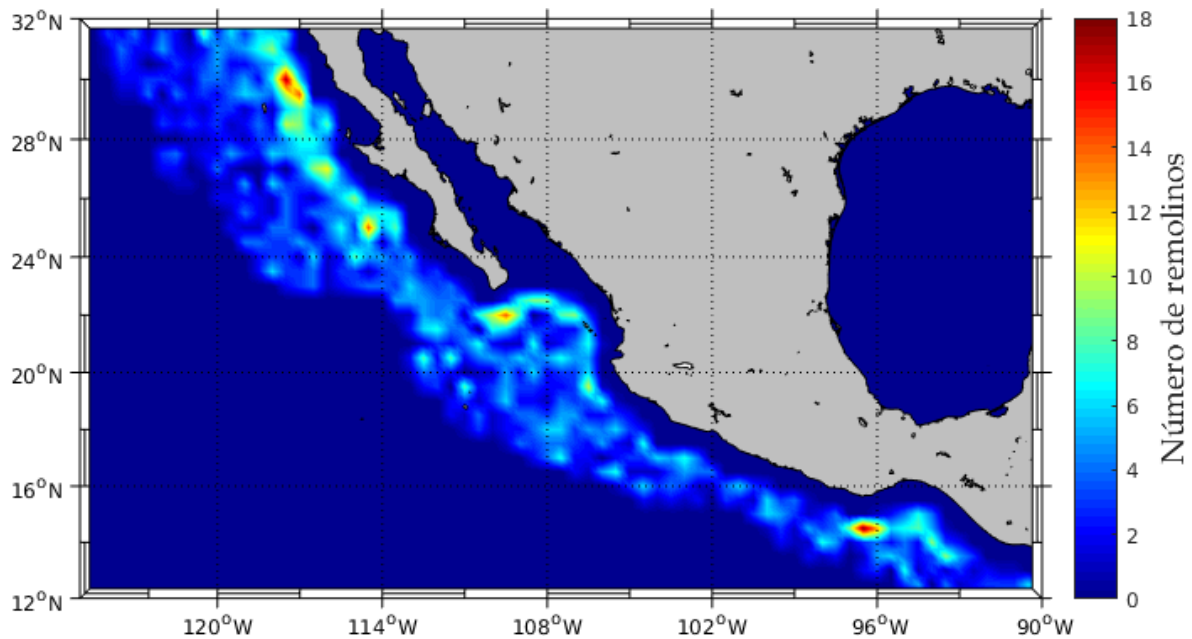


Figura 34: Número de remolinos (color) observados cada $1/2^\circ$, provenientes de la base de datos de Shelton y AVISO (www.aviso.altimetry.fr/). Se muestran sólo remolinos a 500 km de la costa.

En la Figura 34 se puede observar que el número de remolinos es mayor cerca de las costas, lo que sugiere que podrían tener un origen costero. Resaltan algunas zonas donde es evidente que existe un mayor número

de remolinos, y coinciden con discontinuidades como CSL, PSC, PE, y el GTh, lugares que coinciden con lo que se ha mostrado en este trabajo. Sin embargo las observaciones difieren en cierta medida de los resultados mostrados en esta sección, por ejemplo la alta concentración de remolinos frente a las costas de San Quintín ($\approx 30^\circ\text{N}$), que en nuestras simulaciones no se observa de forma tan clara.

En nuestro trabajo se mostró que las OKC producen remolinos de escalas horizontales relativamente pequeñas (no mayores a 50 km), además se producen a una distancia cercana de la costa, menor a 10 km. Bajo las condiciones descritas, no es posible que el altímetro detecte remolinos con las características mencionadas. Sin embargo remolinos producidos en las costas podrían obtener energía a través de otros mecanismos no estudiados, y propagarse hacia el Oeste hasta ser observados por el altímetro.

4. Conclusiones

Con base a los estudios realizados en las diferentes secciones, se concluye que las irregularidades de la línea de costa son capaces de extraer energía de las OKC, principalmente en forma de energía cinética asociada a remolinos. La generación de remolinos tiene lugar en la zona de “sombra” de la discontinuidad (Figura 14). El sentido de giro de los remolinos producidos depende solamente del signo de la amplitud (signo de la vorticidad) de la OKC incidente. De tal forma que OKC de elevación producen siempre an-

ticitrones, y OKC de depresión producen ciclones.

Una pequeña parte de la energía residual en el dominio queda en forma de ondas. Si la escala temporal de la OKC es mayor al periodo mínimo de ondas de Rossby, las OKC pueden producir ondas de Rossby, sin importar el tipo de costa (Figura 5 y 6). Sin embargo la contribución de Rossby es pequeña (3 %). Si la escala temporal de la OKC es menor o igual al periodo inercial local, se producen ondas de Poincaré “viajeras” cuando se obliga a una OKC a cambiar de dirección debido a una discontinuidad (Figura 21). Si la escala temporal de la OKC no permite la existencia de ondas de Poincaré o Rossby, la energía residual solo existe en forma de remolinos.

La energía mecánica residual responde moderadamente al ancho de la discontinuidad (D), pero sólo en el rango donde $|D| < Rd$, lo que pone de manifiesto la importancia del radio de deformación como escala de referencia espacial (Figura 16).

En la costa del Pacífico Mexicano, la energía residual mostró una alta sensibilidad al signo de la amplitud de la onda incidente, donde las OKC de depresión dejan más energía residual (hasta 17 % más) que las de elevación. La mayor parte de la energía residual se produce en el GC. Las discontinuidades que destacan por su concentración de energía residual en la costa del Pacífico Mexicano son: el cabo de Topolobampo en el GC, y PE, CSL, CC y (en menor medida) GTh en la costa del Pacífico. Las características

de las discontinuidades costeras parecen ser más importantes en la distribución de energía residual que la escala temporal de las OKC y la latitud, ya que en la secc. 3.6 se observó que la energía residual disminuye con la latitud (en costas idealizadas), pero al utilizar la línea de costa real, se observa básicamente lo contrario. La energía residual generada en diferentes localidades para una misma escala temporal presenta mayor variación que al cambiar la escala temporal en una misma región.

Referencias

1. Álvarez, L. G., Badan-Dangon, A., y Valle, A. (1989). On coastal currents off Tehuantepec. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 29(1), 89-96.
2. Arakawa, C., Demuren, A. O., Rodi, W., y Schönung, B. (1988). Application of multigrid methods for the coupled and decoupled solution of the incompressible Navier-Stokes equations. In 7th GAMM-Conference on Numerical Methods in Fluid Mechanics(pp. 1-8).
3. Blumberg, A. F., y Mellor, G. L. (1987). A description of a three dimensional coastal ocean circulation model. *Three dimensional coastal ocean models*, 4, 1-16.
4. Brink, K. H. (1991). Coastal-trapped waves and wind-driven currents over the continental shelf. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23(1), 389-412.
5. Christensen Jr, N., René, V., y Gutiérrez, G. V. (1983). A study of sub-inertial waves off the west coast of Mexico. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 30(8), 835-850.
6. Clarke, A. J. (1988). Inertial wind path and sea surface temperature patterns near the Gulf of Tehuantepec and Gulf of Papagayo. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 93(C12), 15491-15501.

7. Enfield, D. B., y Allen, J. S. (1983). The generation and propagation of sea level variability along the Pacific coast of Mexico. *Journal of physical oceanography*, 13(6), 1012-1033.
8. Flores-Morales, A. L., Parés-Sierra, A., y Gómez-Valdivia, F. (2012). Semiannual Kelvin Waves in the Northeastern Tropical Pacific. *Journal of Coastal Research: Volume 28, Issue 5*: pp. 1068 – 1072.
9. Flores Morales, A. L. (2012). Efectos de ondas de origen remoto en la variabilidad estacional de la costa occidental mexicana. Tesis de Doctorado en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 96 pp.
10. Gutiérrez, M. O., López, M., Candela, J., Castro, R., Mascarenhas, A., y Collins, C. A. (2014). Effect of coastal-trapped waves and wind on currents and transport in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(8), 5123-5139.
11. Grimshaw, R., y Allen, J. S. (1988). Low-frequency baroclinic waves off coastal boundaries. *Journal of physical oceanography*, 18(8), 1124-1143.
12. Huthnance, J. M., Mysak, L. A., y Wang, D. P. (1986). Coastal trapped waves. Baroclinic processes on continental shelves, 3, 1-18.
13. Kessler, W. S., McPhaden, M. J., y Weickmann, K. M. (1995). Forcing of intraseasonal Kelvin waves in the equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C6), 10613-10631.
14. 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: Oceans*, 117(C10).
15. Lavelle, J. W., y Thacker, W. C. (2008). A pretty good sponge: Dealing with open boundaries in limited-area ocean models. *Ocean Modelling*, 20(3), 270-292.

16. Martínez, J. A., y Allen, J. S. (2004a). A modeling study of coastal-trapped wave propagation in the Gulf of California. Part I: Response to idealized forcing. *Journal of physical oceanography*, 34(6), 1332-1349.
17. Martínez, J. A., y Allen, J. S. (2004b). A modeling study of coastal-trapped wave propagation in the Gulf of California. Part II: Response to idealized forcing. *Journal of physical oceanography*, 34(6), 1332-1349.
18. Palacios, D. M., y Bograd, S. J. (2005). A census of Tehuantepec and Papagayo eddies in the northeastern tropical Pacific. *Geophysical Research Letters*, 32(23).
19. Pegau, W. S., Boss, E., y Martínez, A. (2002). Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters*, 29(9), 6-1.
20. Stumpf, H. G. (1975). Satellite detection of upwelling in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 5(2), 383-388.
21. Tomczak, M., (2000). Coastal trapped waves and other oscillations. <http://www.physocean.icm.csic.es/ShelfCoast/>.
22. Trasviña, A., Barton, E. D., Brown, J., Velez, H. S., Kosro, P. M., y Smith, R. L. (1995). Offshore wind forcing in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: The asymmetric circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C10), 20649-20663.
23. Wilkin, J. L., y Chapman, D. C. (1987). Scattering of coastal-trapped waves by irregularities in coastline and topography. *Journal of Physical Oceanography*, 20(3), 396-421.
24. Yankovsky, A. E., y Chapman, D. C. (1995). Generation of mesoscale flows over the shelf and slope by shelf wave scattering in the presence of a stable, sheared mean current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C4), 6725-6742.

25. Yuan, D. (2005). Role of the Kelvin and Rossby waves in the seasonal cycle of the equatorial Pacific Ocean circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C4).
26. Zamudio, L., Hogan, P., y Metzger, E. J. (2008). Summer generation of the Southern Gulf of California eddy train. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C6).
27. Zamudio, L., Hurlburt, H. E., Metzger, E. J., y Tilburg, C. E. (2007). Tropical wave-induced oceanic eddies at Cabo Corrientes and the Maria Islands, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C5).