

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



**EFFECTO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL
DEL VIENTO SOBRE LA CIRCULACIÓN ESTACIONAL
DEL GOLFO DE CALIFORNIA**

TESIS

que para obtener el título de:

OCEANÓLOGO

Presenta:

Aleph Jiménez Domínguez

Ensenada, B. C., México

Agosto del 2004

Resumen

Haciendo uso de un modelo numérico tridimensional del Golfo de California, se realizaron dos experimentos forzados únicamente con viento. Uno forzado con un viento idealizado, espacialmente homogéneo y simétrico en su evolución temporal (VI), y otro con viento derivado de satélite (QuikScat) espacialmente heterogéneo (VO). Se compararon las diferencias presentadas, en ambos experimentos, de la circulación estacional en el Golfo de California, mediante el análisis de la evolución temporal y el promedio de las corrientes, la densidad de energía cinética, la vorticidad relativa y la divergencia horizontal, observadas en la capa superficial (CS), la capa de Ekman (CE) y en toda la columna de agua (CT). Los resultados presentan diferencias sustanciales entre experimentos. En el promedio las corrientes generadas por VO, en cada una de las capas analizadas, tienden a una circulación ciclónica que abarca gran parte de la cuenca norte del golfo, mientras en el sur, en CE, la estructura de las corrientes es más compleja, con la formación de remolinos intercalados en el sentido de su giro a lo largo del golfo. El experimento VI presenta en el golfo, en promedio, corrientes más débiles a VO y la estructura es mas simple, con tendencias a una circulación anticiclónica en el sur y más irregular en el norte. Ambos experimentos presentan mayor variabilidad sobre la costa continental en aguas someras. En su evolución temporal, las variaciones de la circulación en ambos experimentos son estacionales, pero el caso VO difiere en la duración del régimen del giro ciclónico/anticiclónico en la cuenca norte presentado en trabajos anteriores. La magnitud del campo de corrientes muestra diferencias estacionales entre experimentos, estos asociados a la evolución temporal del promedio

del campo de velocidad del viento el cual, en general, es mayor durante el periodo que abarca de otoño a invierno para el caso VO, y en verano para VI. La magnitud del promedio de la densidad de energía cinética, es más elevada sobre la costa continental en ambos experimentos, donde en VI se observa una mayor extensión de áreas de alta densidad con respecto a VO. Alta vorticidad relativa, en VO, se presenta a lo largo del golfo en una serie de núcleos intercalados en su signo y asociados a remolinos y cuencas. La mayor divergencia y convergencia se encuentra cerca de las costas para ambos forzamientos, lejos de estas, sólo el caso VO las produce. En la evolución temporal, el experimento VO presenta a lo largo del golfo una distribución más irregular de la energía, vorticidad y divergencia, al presentado por VI el cual es más homogéneo. El experimento VO presenta durante el periodo que abarca de otoño a invierno, alta energía cinética, vorticidad negativa y divergencia, y durante el verano alta energía cinética, vorticidad positiva y convergencia. El experimento VI presenta durante el invierno, alta densidad de energía cinética, vorticidad negativa y divergencia, y en el verano alta energía cinética, vorticidad positiva y convergencia, estos de mucho mayor magnitud en este periodo al presentado en el caso VO.

“EFECTO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL
DEL VIENTO SOBRE LA CIRCULACIÓN ESTACIONAL DEL
GOLFO DE CALIFORNIA”

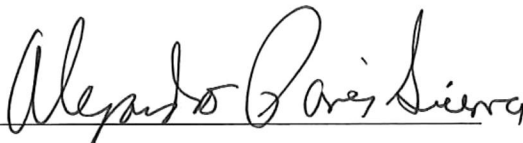
TESIS
QUE PRESENTA:
ALEPH JIMÉNEZ DOMÍNGUEZ

Aprobada por:



Presidente del Jurado

Dr. Silvio Guido L. Marinone Moschetto



Sinodal Propietario

Dr. Alejandro Parés Sierra



Sinodal Propietario

Dr. José Antonio Martínez Alcalá

Dedicatoria

A mis papás, *Julio Jiménez* y *Josefina Domínguez*, que son los mejores padres y maestros que he tenido, y a mi hermana, *Siddhartha*, que siempre ha estado conmigo y yo con ella.

A mi abuela, Ofelia Aponte

A TODOS mis amigos

A todos aquellos grandes de la humanidad que han logrado superarse y ayudado a los demás en el camino

Agradecimientos Académicos:

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por todas las facilidades otorgadas en sus instalaciones, equipo de cómputo y datos hidrográficos utilizados para la realización de esta tesis.

A mi director de tesis Dr. Silvio Guido L. Marinone Moschetto, y sinodales Dr. Alejandro Parés Sierra y Dr. José Antonio Martínez Alcalá por su dirección, asesoría y recomendaciones durante el desarrollo de este trabajo de tesis.

Agradecimientos Personales:

A Guido Marinone, por su tiempo, paciencia y dedicación a mi persona desde el primer momento. A Alejandro Parés y Antonio Martínez por ser parte de mi comité de tesis. Sinceramente, les agradezco que me hayan tenido paciencia por todas las omisiones hechas a falta de mi inexperiencia pues todavía me falta mucho por crecer en muchos aspectos, por lo que realmente espero poder seguir aprendiendo de sus consejos y enseñanzas por mucho tiempo.

A todos mis maestros a lo largo de mi vida, y principalmente, a los de la universidad, pues fue donde más aprecie sus conocimientos y amistades. En especial a: Pancho Aranda, Sergio Pou, Ana María Iñiguez, Graciela Guerra, Martín Hernández Ayón, Dora Waumann, Kim Murphy, Rene Pinet, Rubén Castro, Raúl Canino, Antonio Trujillo, Miguel Téllez.

Y muy pero muy especialmente a Manuel Moreno, Rafael Walls y Toño Martínez porque en gran parte marcaron mi vida hacia la física, dan excelentes clases e irradian de su personalidad ejemplos a seguir. Para mi sencillamente son *excelentes*.

A la Lic. Cecilia Loría Marín, por el apoyo brindado a lo largo de mi carrera

A TODOS mis amigos, difícil poder poner a cada uno, pero especialmente, Poncho Sánchez, Enrique Arnaud, Daniel Baroudi, Nahim Amar, Carlos Cardin, Mauricio Caballero, Cindy Marrufo, Gaby Absalón, Armando Balderas, Gildardo Zamudio, Carlos “Chack”, Luis Octavio “Tavo”, Manuela Saldaña, Karla Zamorano, Estefano Aragones, Eduardo Sierra, Jorge Noguez, Enrique Quintero, Hiula Rodríguez, Alfonso Fájér, Nicolet Arano, Julio Sánchez-Aldana, Diego Vea, Josue Díaz, Arturo Zamudio, Pablo Bonilla, Angeline Ruanova, Iridea Beamonte, Oscar Guzón, Adrian Torales, Nemer Narchi, Erick Bravo, Alec Torres, Enrique Castro, Enrique Collard, Paula Pijoan, Andrés Blanco, Laura Rodríguez, Gaby Caloca, Renata Arouca, Paulina Cetina, Angela

Ferrer, Angélica Félix, Ricardo “Pato”, Carlos “Acapulco”, Alin Hardy, Maricarmen Ruiz, Karina Cruz, Leonardo de la Rosa.

A todos los “Hot Spots” (LV generación), que con todos nuestros pros y contras, es una de las mejores generaciones de oceanólogos que hubo, hay y habrá y muchos lo saben. Como me divertí. ¡GRACIAS!

A todos los amigos y la gente que conocí en Chetumal, Xalapa, Ensenada, Mérida, y Cancún y a la buena o la mala me formaron.

A mi familia en Xalapa y Córdoba.

Al personal Administrativo de la Facultad de Ciencias Marinas, Mari, Lorena, Rosario, Jazmín, Angélica, Neli, Ebelia, Eliseo Almanza, Roberto Millán.

Y a Doña Tere, por supuesto.

Índice

	Pág.
1. Introducción	1
2. Metodología	4
2.1. <i>Modelo</i>	4
2.2. <i>Experimentos y Datos de Viento</i>	5
2.2.1. Idealizado (VI)	5
2.2.2. Observado (VO)	5
3. Resultados y Discusiones	6
3.1. <i>Vientos</i>	6
3.2. <i>Corrientes</i>	10
3.2.1. Promedio Temporal	10
3.2.2. Evolución Temporal	13
3.3. <i>Energía Cinética, Vorticidad Relativa y Divergencia Horizontal</i>	17
3.3.1. Promedio Temporal	18
3.3.2. Evolución Temporal	23
4. Sumario y Conclusiones	26
5. Referencias	28

Lista de Figuras

	Pág.
Fig. 1. Área de estudio del Golfo de California	3
Fig. 2. a) Promedio temporal (vectores) y desviación estándar ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (color) de la magnitud del viento observado (VO). En la parte superior b) y c) e inferior d) y e) la amplitud anual y semianual, de las componente u y v, respectivamente, del viento. Note el cambio de escalas en la barra de color.	7
Fig. 3. Rcm ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) de la magnitud del viento observado (VO) (rojo) y viento idealizado (VI) (azul) en todo el golfo en una serie de tiempo	9
Fig. 4. Promedio temporal de corrientes (vectores) y su desviación estándar ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (color) a lo largo del golfo en a) capa superficial (CS), b) capa de Ekman (CE) y c) en toda la columna de agua (CT). Las líneas (naranja) son una ayuda para visualizar la dirección del flujo. Los números que aparecen a la derecha de cada figura es la rcm ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) de la magnitud de la velocidad en el golfo	11
Fig. 5. Corrientes en la <i>capa superficial</i> en los días a) 55, b) 115, c) 235 y d) 335 para las corridas con viento observado (VO) y viento idealizado (VI). A la derecha de cada uno se encuentra una gráfica con el campo de viento observado y un vector independiente, Vs, que representa la velocidad y dirección del viento idealizado en ese día sobre el golfo. Los números que aparecen a la derecha de cada figura es la rcm ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) de la magnitud de la velocidad en el golfo	14
Fig. 6. Promedio temporal (color) de la energía cinética, vorticidad relativa y divergencia en la capa superficial (CS), capa de Ekman (CE) y en toda la columna de agua (CT)	19

Pág.

Fig. 7. Promedio transversal y temporal a lo largo del golfo de energía cinética, vorticidad relativa y divergencia en la capa superficial (CS), capa de Ekman (CE) y en toda la columna de agua (CT) **22**

Fig. 8. Promedio transversal de energía cinética, vorticidad relativa y divergencia durante un año, en la capa superficial (CS), capa de Ekman (CE) y en toda la columna de agua (CT). El eje horizontal es tiempo (días) y el vertical longitud (km) del golfo desde la cabeza (0 km) hacia la boca (~1060 km), respectivamente. Las fechas señaladas en la parte superior de la primera figura corresponden a los días elegidos en la evolución temporal de las corrientes **24**

1. Introducción

El Golfo de California es una cuenca oceánica semi-cerrada ubicada entre la península de Baja California y la región continental de México (Fig. 1), en el Pacífico Subtropical Oriental. Su extensión es de aproximadamente 150 km de ancho y 1100 km de largo, con profundidades que varían desde un promedio de 200 m en la cabeza a 3600 m en la boca.

Se ha establecido que su circulación es causada, en orden de importancia, por a) el forzamiento del Océano Pacífico (frecuencias bajas y mareas), b) vientos sobre la superficie del mar (Ripa, 1997, Marinone, 2003) y c) por flujos de calor y agua también en la superficie. Desde un punto de vista oceanográfico, una de las características más importantes de la circulación atmosférica es su variación espacial, lo cual genera vorticidad atmosférica que se transfiere al mar mediante flujos de momentum turbulentos capaces de crear turbulencia y giros en la columna de agua (Parés-Sierra, *et al.*, 2003).

El esfuerzo friccional del viento produce un arrastre sobre las aguas superficiales a la derecha (izquierda) en el hemisferio Norte (Sur), a un ángulo aproximado de 45° con respecto a la dirección del esfuerzo del viento, aumentando el ángulo y disminuyendo la velocidad conforme la profundidad se incrementa creando una patrón de vectores de corriente en forma de espiral llamado la Espiral de Ekman. El grosor de esta capa del océano que comprende desde la interfase con la atmósfera hasta la profundidad a la cual la influencia del transporte de agua por efectos del viento no es

significativa se le denomina Capa de Ekman; el volumen total de agua transportado en ella, denominado Transporte de Ekman, es a 90° con respecto a la dirección del viento.

La circulación atmosférica en el golfo es principalmente a lo largo de su eje longitudinal, a causa de la elevada topografía a ambos lados de éste (Badan-Dagon, *et al.*, 1991). Estudios numéricos sobre la circulación del golfo se han basado en la suposición de que el viento sopla más o menos simétricamente hacia arriba (Noroeste) y abajo (Sureste) del golfo durante el verano y el invierno, respectivamente. Con esta idea, la mayoría de las simulaciones numéricas de la circulación del golfo, a excepción de Martínez (2002) en que fuerzan su modelo con datos de viento derivado de NSCAT/ERS-2 y el modelo de circulación atmosférica NCEP, han utilizado un viento hipotético a lo largo de éste sin tomar en cuenta su variación espacial y suponiendo una simple variación anual (e.g., Carbajal, 1993; Beier, 1997; Tanahara-Romero, 1997; Palacios-Hernández, 2001; Marinone, 2003).

Sin embargo, existen evidencias de que éste carácter monzónico de vientos superficiales sobre el Golfo de California es bastante inhomogéneo espacialmente, además de no ser exactamente un armónico anual. Marinone *et al.* (2004) mediante datos de QuikScat encuentran que el viento se invierte aproximadamente en dirección Noroeste, durante los meses de Junio a Agosto, y que el campo de vientos posee gran variabilidad espacial.

El objetivo de este estudio es comparar las diferencias en la circulación producidas en un modelo numérico del Golfo de California por a) un viento idealizado y espacialmente homogéneo con b) la climatología real calculada de los vientos QuikScat.

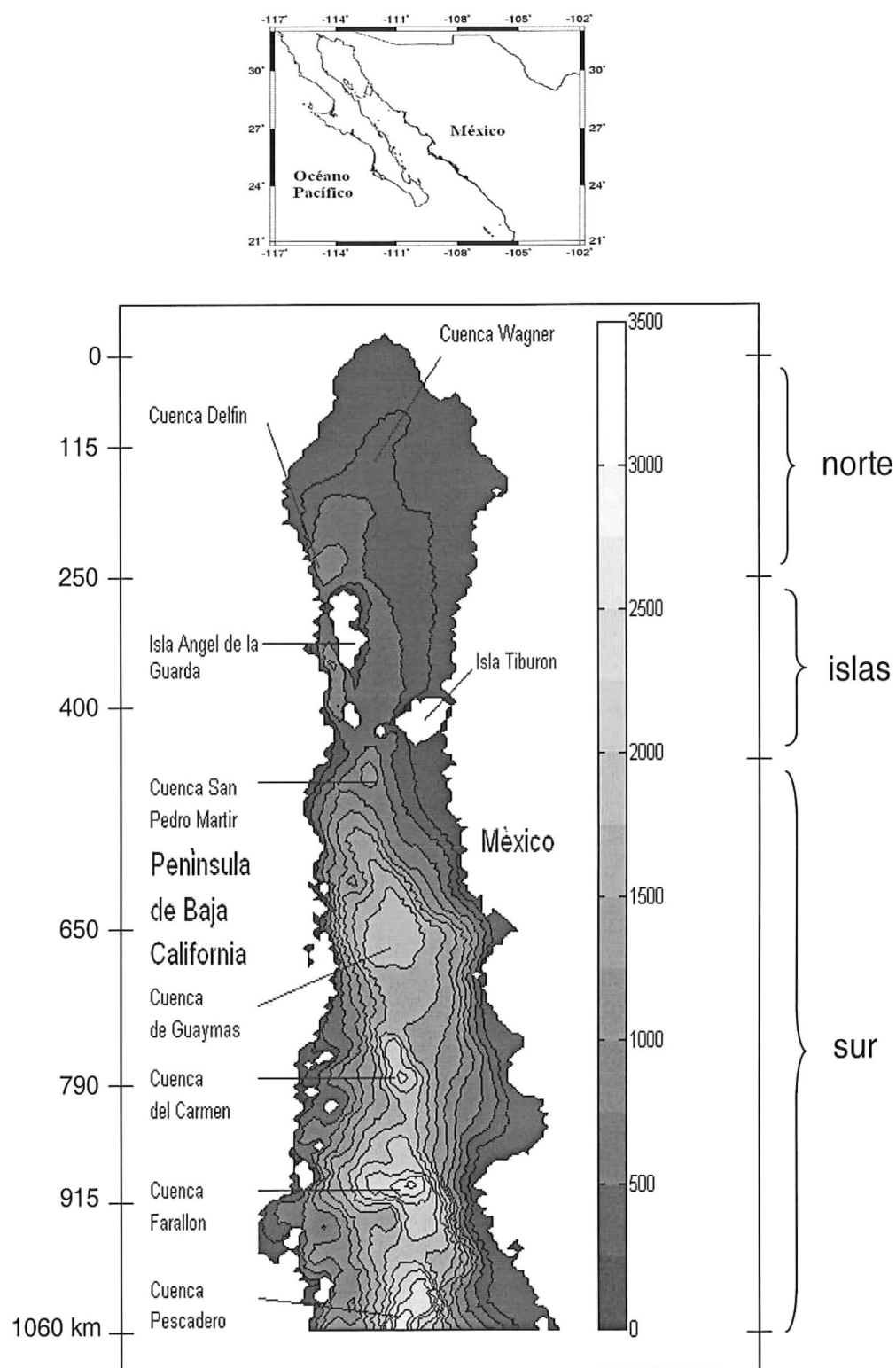


Fig. 1. Área de estudio del Golfo de California.

2. Metodología

2.1. Modelo

El modelo numérico utilizado es el Hamburg Shelf Ocean Model (HAMSOM) adaptado al Golfo de California por Marinone (2003). Las ecuaciones del modelo están resueltas semi-implícitamente con un pronóstico completo de los campos de temperatura y salinidad, permitiendo movimientos baroclínicos dependientes del tiempo. El dominio del modelo tiene un tamaño de malla de 2.5' x 2.5' (~3.9 km x 4.6 km). Se utilizan 12 capas en la vertical con niveles inferiores nominales de 10, 20, 30, 60, 100, 150, 200, 250, 300, 600, 1000, 4000 m. El número de capas depende de la profundidad local y la última capa tiene un espesor variable que se acomoda a la topografía. El grosor de la primera capa es de 10 m más la elevación de la superficie del mar.

Los campos de temperatura y salinidad se prescriben en la entrada del golfo usando datos históricos del Golfo de California pertenecientes al CICESE. De estos datos, los campos de temperatura y salinidad fueron interpolados en los puntos de la malla a lo largo de la frontera en la boca del golfo, y se les ajustó por cuadrados mínimos para obtener los armónicos anuales y semianuales. La temperatura, salinidad están prescritos cuando la fase se encuentra dentro del golfo, de otra manera se aplican condiciones de radiación sobre las variables dinámicas.

Para los diferentes experimentos el modelo fue iniciado desde el reposo, con un intervalo de 300 s, y se corrió hasta que todas las variables fuesen periódicamente estables. Se utilizó la aproximación al plano- f , es decir, el valor del parámetro de Coriolis es constante en el dominio del modelo ($f = 6.62 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$). Los planos (x,y), se

encuentran alineados en la dirección al eje transversal y longitudinal del golfo, respectivamente. El modelo es forzado por el esfuerzo del viento en la superficie del mar con dos situaciones, como se explica a continuación.

2.2. Experimentos y Datos de Viento

Se realizaron dos experimentos (corridas), cada una forzada sólo con viento, con una duración aproximada de un año. La nomenclatura de los dos experimentos que aparecerán en los resultados es VI para viento idealizado y VO para viento observado.

2.2.1. Idealizado (VI)

El viento es espacialmente homogéneo y tiene una evolución temporal sinusoidal en dirección noroeste-sureste del golfo, con una amplitud de 5 m/s en dirección noroeste, es decir,

$$W(t) = 5 \cos (\omega t - \phi_a), \quad (1)$$

donde W es la componente del viento a lo largo del eje del golfo, ϕ_a es la fase tal que el máximo es el 20 de agosto y ω es la frecuencia anual.

2.2.2. Observado (VO)

Los datos del campo de viento variable en espacio y tiempo fueron obtenidos del sistema de datos Seaflux del Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA/NOAA (ftp://ftp.podaac.jpl.nasa.gov/pub/ocean_wind/quikscat/L3/data). Para esta tesis se

usaron datos de viento de QuikScat sin interpolación espacial o temporal alguna, es decir, únicamente donde hubiese datos (Marinone, *et al.*, 2004). Los datos de QuikScat abarcan el periodo de Septiembre 3 de 1999 al presente. A estos datos se les calculó el promedio temporal y, por cuadrados mínimos, la componente anual y semianual en cada punto de la malla. Así para cada paso de tiempo del modelo, el viento se reconstruyó sólo con el promedio y la variación anual y semianual, como

$$\varphi(x,y,t) = P(x,y) + A(x,y) \cos [\omega t - \phi_a(x,y)] + S(x,y) \cos [2\omega t - \phi_s(x,y)], \quad (2)$$

donde φ representa a cada una de las componentes del viento (u,v), P el promedio temporal de éstas, (A y S) y (ϕ_a y ϕ_s) son sus amplitudes y fases anual y semianual, respectivamente y ω es la frecuencia anual.

3. Resultados y Discusiones

3.1. Vientos

Antes de presentar los resultados del modelo se describe la estructura del viento observado, VO, utilizado para forzar el modelo. La Fig. 2 muestra el campo medio anual y su variabilidad, así como la amplitud anual y semianual de las componentes zonal (u) y meridional (v) del viento. La Fig. 2a muestra que el promedio del viento en el norte es en dirección al continente y en el resto del golfo es principalmente en dirección Sureste. La variabilidad de su magnitud se incrementa de la cabeza a la boca del golfo, y del continente hacia la península. Como una medida global de la magnitud del promedio temporal del viento, se calculó la raíz cuadrática media de este campo, definida como

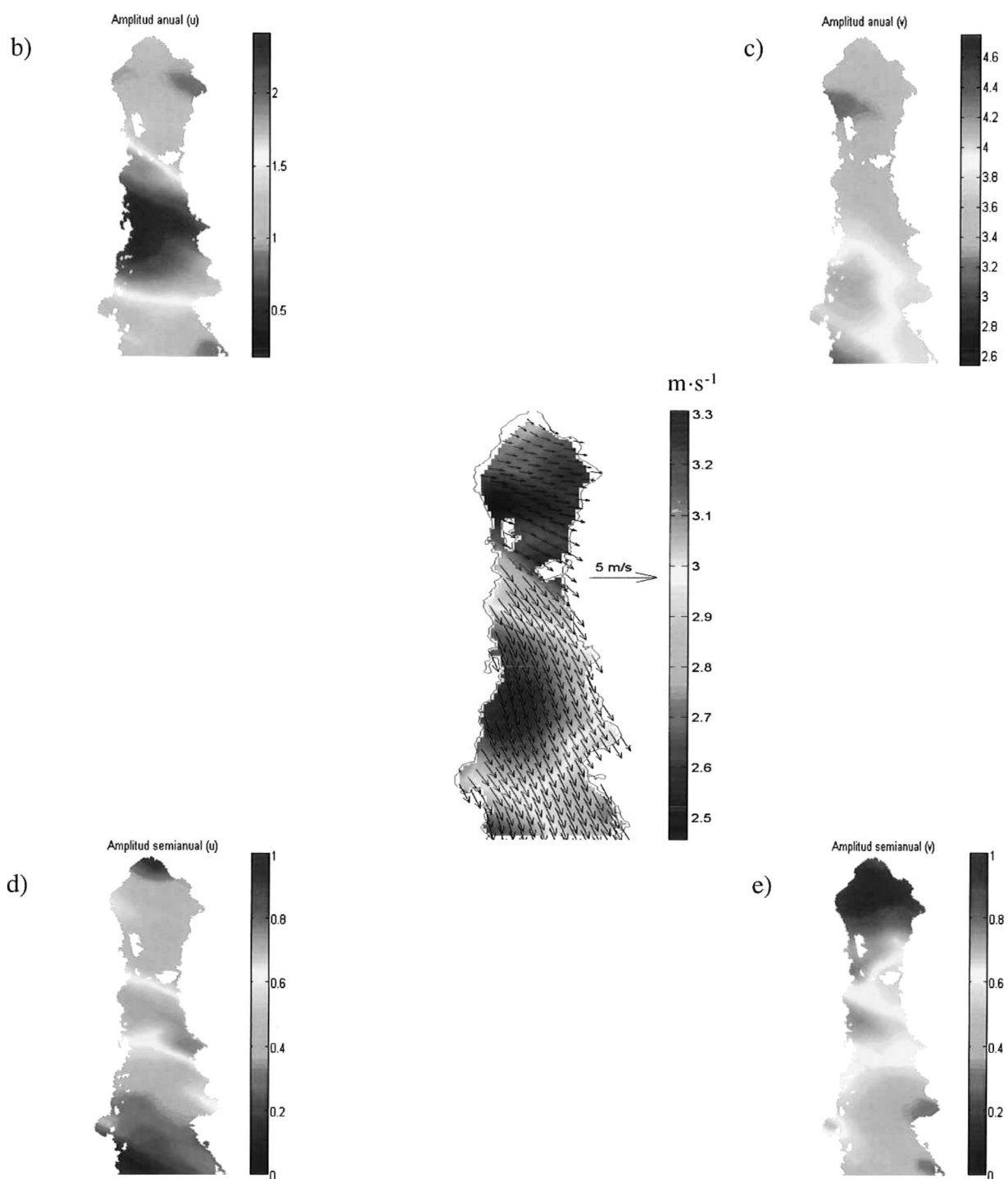


Fig. 2. a) Promedio temporal (vectores) y desviación estándar ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (color) de la magnitud del viento observado (VO). En la parte superior b) y c) e inferior d) y e) la amplitud anual y semianual, de las componente u y v, respectivamente, del viento. Note el cambio de escalas en la barra de color.

$$rcm = \sqrt{[N^{-1} \sum_i (u_i^2 + v_i^2)]}, \quad (3)$$

donde N es el número de puntos de la malla en el golfo. Para el caso del viento observado, $rcm = 2.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y el promedio de la variabilidad (desviación estándar) en todo el golfo es $2.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Para el caso del viento idealizado el promedio, por construcción, es cero y el promedio de la variabilidad es $3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La amplitud anual de las componentes u y v del viento son mayores que la amplitud semianual; de éstas, la componente en v es la mayor. En la Fig. 2c se muestra como cerca de la boca, pegado a la península, alcanza su valor máximo ($> 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). La región que abarca el norte del golfo e islas es la de menor amplitud en la señal anual de u y v . Esto lleva a que la magnitud del viento en esta región sea la de menor variabilidad, aún cuando en la señal semianual de ambas componentes se aprecie un aporte, aunque no sustancial, de la amplitud. Esto se puede observar en la desviación estándar de la Fig. 2a. La amplitud semianual en ambas componentes contribuye en menor escala a la magnitud del viento. Esta amplitud es mayor en las componentes zonal y meridional en algunas zonas de la cabeza y al sur de las islas.

La variación temporal de la rcm de la magnitud del viento en todo el golfo de los campos de viento VI y VO es mostrada en la Fig. 3. VO presenta un máximo con magnitud mayor a $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ durante el invierno y otro de $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ casi a la mitad del año. VI presenta dos máximos iguales de $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ durante la serie por su señal anual. Se puede apreciar claramente que sus máximos y mínimos se encuentran desfasados.

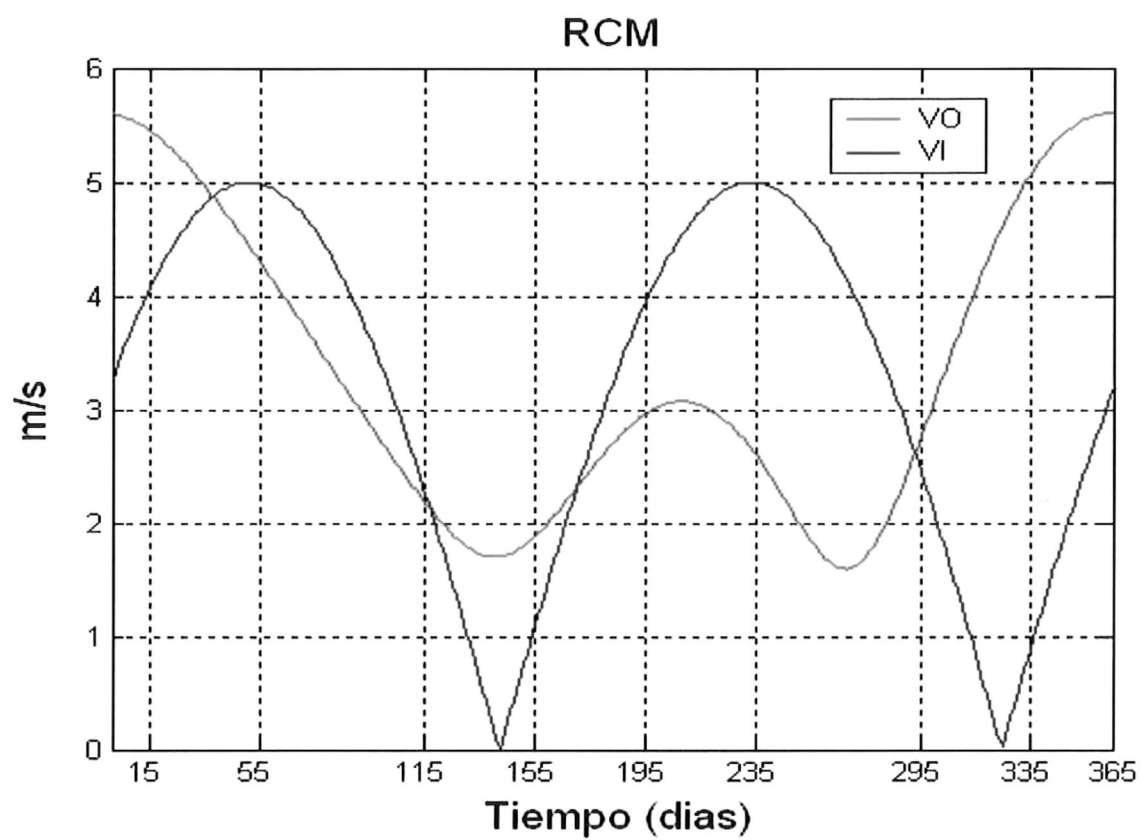


Fig. 3. Rcm ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) de la magnitud del viento observado (VO) (rojo) y viento idealizado (VI) (azul) promediado en todo el golfo en una serie de tiempo.

3.2. Corrientes

3.2.1. Promedio Temporal

Del campo de corrientes obtenidos del modelo se calculó el promedio temporal, para ambas simulaciones, en la 1^{er} capa del modelo (CS), en la capa de Ekman (CE), y en toda la columna de agua (CT) (Fig. 4). La capa de Ekman abarca desde la superficie hasta los primeros 60 m en la columna de agua correspondiendo a las primeras 4 capas del modelo.

Se observa que sobre gran parte del golfo, el promedio temporal en el caso con viento idealizado es mucho menor al viento observado y se aproxima a cero. Esto se debe a que el viento en la superficie del mar tiene sólo una variación anual, lo que implica que en el promedio una parte del ciclo de las corrientes casi logre cancelarse con la otra. Por otra parte, con viento observado VO en CS (Fig. 4a), el promedio anual de las corrientes no se cancelan pues el promedio anual del viento no es cero, y se observa un remanente de la corriente mayor a VI con tendencia a una circulación ciclónica en el norte del golfo con magnitudes aproximadas a $0.5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, y sobre gran parte del sur del golfo de $1.3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Se obtuvo la rcm para VO y VI en cada caso (CS, CE y CT) y estas disminuyen en magnitud de CS a CT y siempre es mayor en VO a VI en todos los casos.

Se observa que, tanto para VO y VI, la mayor variabilidad espacial y temporal de las corrientes se presenta a lo largo de la costa continental ($>5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ y $>8 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente), en aguas de relativamente baja profundidad. En ambos experimentos, se observa que la intensidad de las corrientes disminuye de CS a CT, ya que las velocidades en las capas del modelo decrecen con respecto a la profundidad puesto que

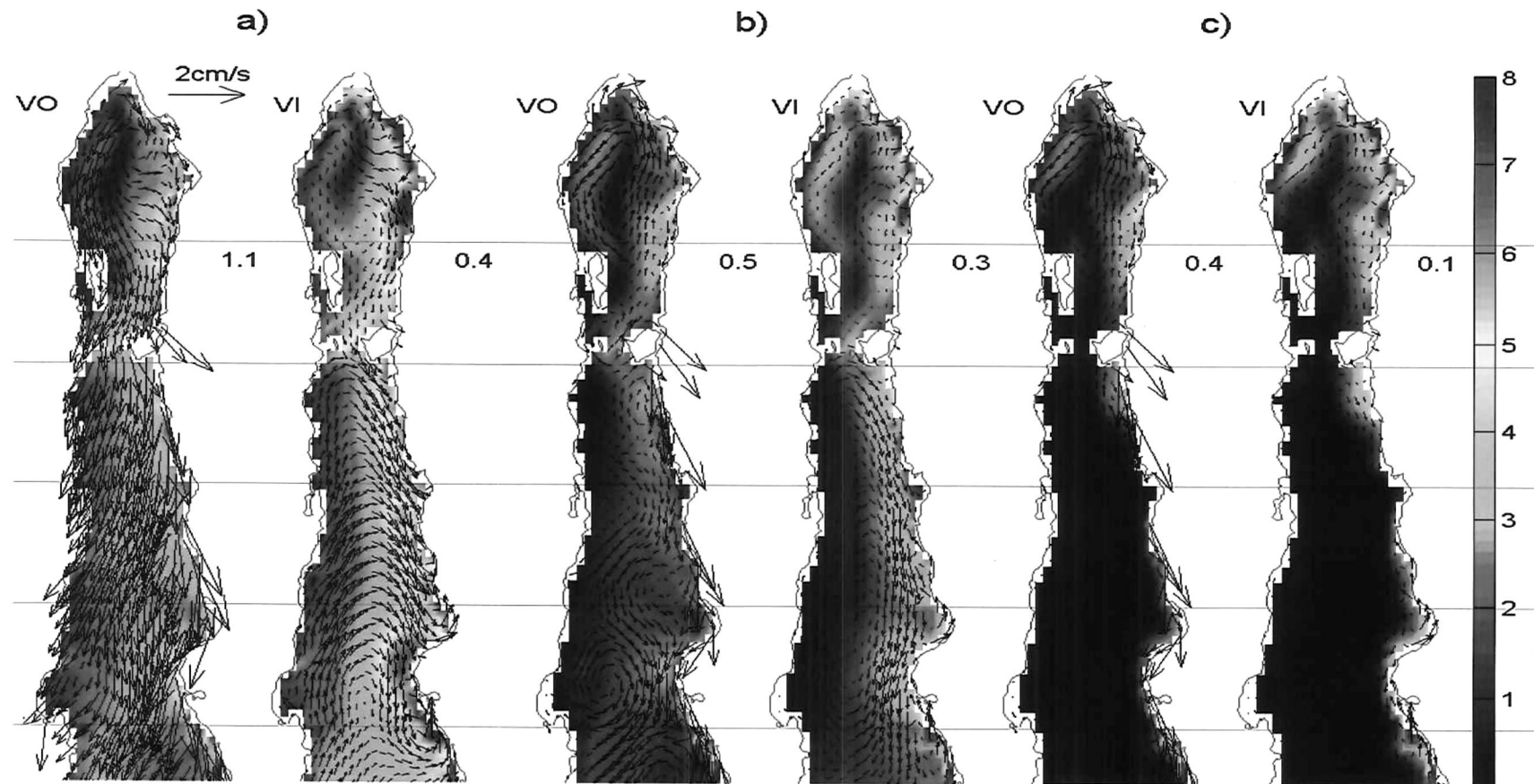


Fig. 4. Promedio temporal de corrientes (vectores) y su desviación estándar ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) (color) a lo largo del golfo en a) capa superficial (CS), b) capa de Ekman (CE) y c) en toda la columna de agua (CT). Los números que aparecen a la derecha de cada figura es la rcm ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) de la magnitud de la velocidad promediado en el golfo.

el modelo únicamente es forzado por viento, y una causa de la magnitud de la corriente es la capacidad de el esfuerzo del viento en impulsar las corrientes por debajo de la superficie del océano.

El promedio de la corriente en zonas alejadas de la costa en VO, sobre CS, es aproximadamente a un ángulo de 40° con respecto al esfuerzo del viento, en dirección sur. Esto es consistente con la teoría de Ekman. En áreas muy cercanas a la costa continental el promedio de las corrientes es, en gran medida, en la dirección del promedio del viento. Esto como resultado de una circulación de Ekman en aguas someras, donde la circulación neta se aproxima cada vez más a la dirección del viento a medida que la profundidad decrece, y en aguas muy someras el flujo es, en gran parte, en la dirección del viento (Pickard y Emery; 1990). En cualquiera de las tres capas (CS, CE y CT) se observa que en la cuenca norte el flujo tiene en promedio una circulación ciclónica, a excepción de su extremo superior la cual es anticiclónica. En CE (Fig. 4b), en el experimento VO, el golfo muestra un remolino ciclónico que abarca toda la cuenca norte, otro al sur de las islas pegado a la península y uno más a la altura de la cuenca del Carmen, y un remolino anticiclónico a la altura de la cuenca Farallón y uno más pequeño al sur de isla Tiburón; mientras que en VI la cuenca sur del golfo muestra en general una circulación anticiclónica y en el norte se observan pequeños remolinos, uno ciclónico y otro anticiclónico, pegados al continente. Por debajo de la capa de Ekman, cuando la profundidad es mayor, las corrientes son muy débiles (Fig. 4c).

3.2.2. Evolución Temporal

En la Fig. 4 se observa que hay gran variabilidad (desviación estándar) en la evolución temporal de las corrientes y es de mayor magnitud que el promedio. La variabilidad en VI es mayor a VO y en ambas es más intensa sobre su costa continental. En el caso con VI la variabilidad más alta se presenta en el norte y a la altura de la cuenca Farallón. En CT (Fig. 4c) la variabilidad en ambos experimentos disminuye significativamente sobre casi todo el golfo, quedando únicamente aquellas áreas pegadas a las costas, principalmente en el norte del golfo.

La variabilidad temporal del forzamiento, limitada a una señal anual para VI y anual más semianual para VO, produce una circulación estacional en las corrientes. Se presentan aquí 4 tiempos del año (días 55, 115, 235 y 355), que se encuentran dentro de los meses de febrero, abril, agosto y diciembre, y que representan esta evolución (Fig. 5). Las razones principales por las cuales estos días fueron seleccionados se dan a continuación.

Día 55. Los campos de viento, en VO y VI, corren básicamente en la misma dirección, sin embargo producen un patrón de corrientes en el golfo de diferente magnitud en cada uno de los experimentos.

Día 115. El campo de vientos muestra una expresión clara del cambio estacional en la amplitud en ambos experimentos y en dirección para VO, mostrando ciertas características particulares en el patrón de corrientes en ambos casos.

Día 235. La dirección del viento idealizado es a 180° con respecto a la observada en el día 55. El viento observado muestra una reducción de su amplitud a lo

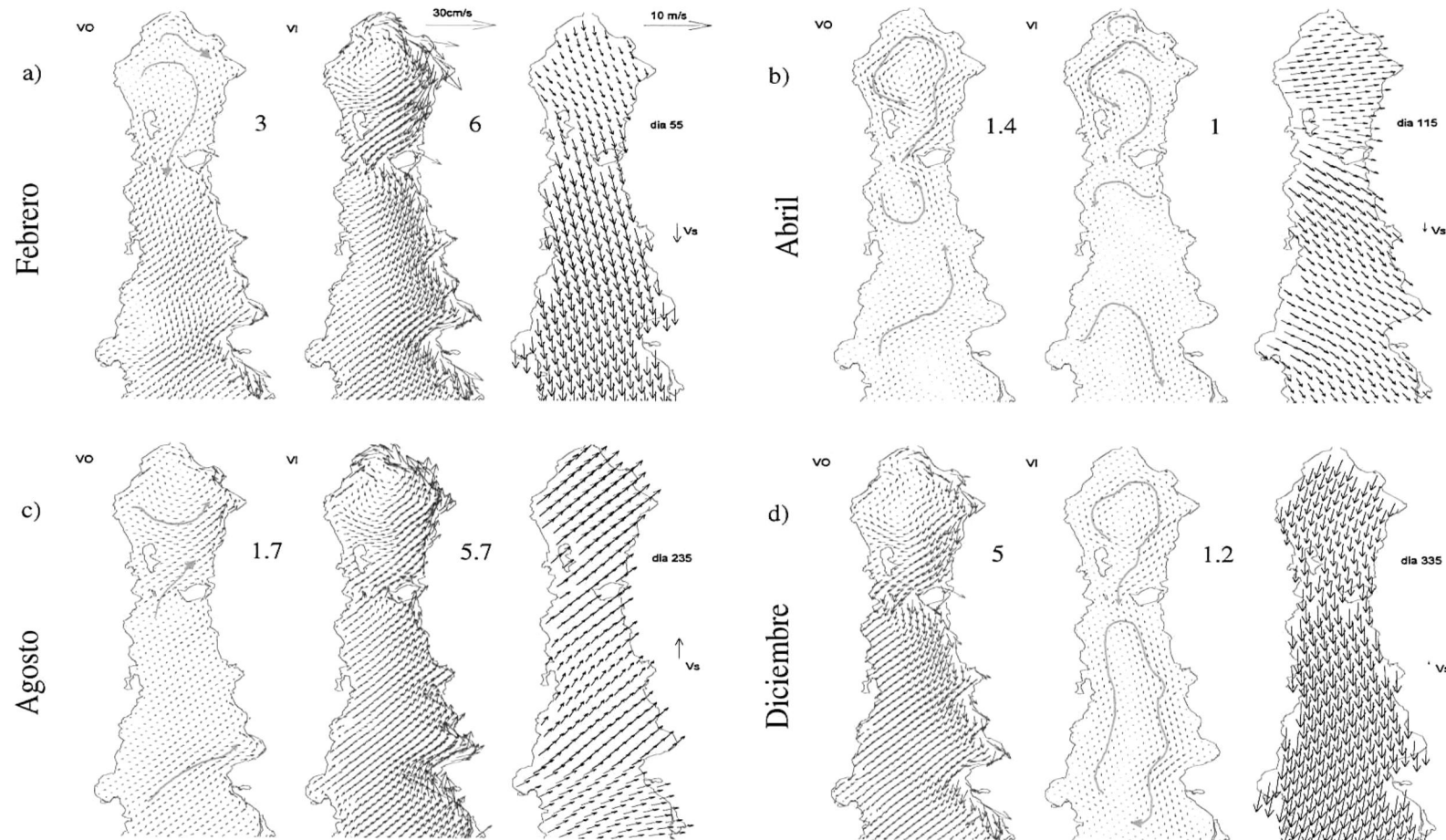


Fig. 5. Corrientes en la *capa superficial* en los días a) 55, b) 115, c) 235 y d) 335 para las corridas con viento observado (VO) y viento idealizado (VI). A la derecha de cada uno se encuentra una gráfica con el campo de viento observado (vectores en negro) y un vector independiente, V_s , que representa la velocidad y dirección del viento idealizado en ese día sobre el golfo. Los números que aparecen a la derecha de cada figura es la rcm ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) de la magnitud de la corriente promediado en el golfo. Las líneas (naranja) son una ayuda para visualizar la dirección del flujo.

largo del golfo y su dirección es distinta a la que se observa en VI, lo que origina diferencias en el patrón y magnitud de las corrientes. Esta fecha es de las más importantes, pues habitualmente es utilizado el viento idealizado en los modelos numéricos y una de sus características más relevantes era su homogeneidad espacial y su periodo de inversión que le daba el carácter de “monzónico” produciendo un efecto particular sobre la circulación, sin embargo, se observa que en lo más aproximado a la realidad esto no es del todo cierto y sus efectos son visiblemente diferentes en el experimento VO, como se señala más adelante.

Día 355. La última fecha que se presenta se introduce en este trabajo con la finalidad de mostrar uno de los periodos de mayor intensidad del campo de viento observado y mientras que el viento idealizado es casi nulo.

A grandes rasgos, el patrón de circulación de las corrientes en CE, es muy similar a la que se observa en CS, con la excepción de que la magnitud de las corrientes en CE son menores que en CS, y en CE se observa un ligero reacomodo en la dirección de estas, por efecto de la topografía. Las corrientes en CT se limitan para ambos casos, a la región costera del lado del continente y al norte del golfo, como resultado de la integración de velocidades muy pequeñas en capas más profundas que la de Ekman. Por tales motivos, se presentan las corrientes en CS únicamente.

Durante el día 55 (febrero) (Fig. 5a) en CS, en VO, las corrientes en el norte atraviesan un periodo de transición de su circulación de anticiclónico a ciclónico. En la cuenca sur las corrientes fluyen hacia la boca y lo hacen con mayor fuerza sobre la costa continental, mientras el flujo en las islas se da en dirección hacia esta cuenca. En el

experimento VI, la magnitud de las corrientes es mayor, principalmente sobre el lado del continente. En el norte se observa que la corriente circula anticiclónicamente, mientras en el sur las corrientes son llevadas en dirección sur hacia la costa peninsular.

Durante el día 115 (abril) (Fig. 5b), en VO, se aprecia que en el norte las corrientes circulan ciclónicamente, y en las islas fluyen hacia esta cuenca. En el sur se aprecia un flujo predominante hacia las islas con un remolino ciclónico de mediana escala al sur de estas. En el experimento con VI, la magnitud de las corrientes es de similar intensidad, con una estructura similar del giro en el norte y en el sur no existe predominancia en la dirección del flujo y tampoco se observa la formación de estructuras en forma de remolinos. Durante este tiempo ambos experimentos atraviesan un periodo de transición en el patrón de corrientes, principalmente en el sur.

Durante el día 235 (agosto) (Fig. 5c), la magnitud de las corrientes en VO conservan en menor medida parte de la circulación ciclónica observada anteriormente. En VI, las corrientes incrementan su magnitud definiendo un giro ciclónico en el norte, y en el sur son arrastradas por el viento en dirección norte sin ningún giro aparente. Note que en este tiempo el viento en VO y VI son distintos en dirección y magnitud.

Durante el día 335 (diciembre) (Fig. 5d), en el experimento VO, el patrón de circulación de las corrientes, describe un giro anticiclónico en el norte, en la zona de las islas las corrientes fluyen hacia el sur, y sobre el sur estas se dirigen hacia la costa peninsular principalmente. La corrida con VI muestra corrientes débiles en todo el golfo, con giros anticiclónicos definidos en la cuenca norte y sur.

La duración del giro anticiclónico/ciclónico sobre la cuenca norte es distinta a la presentada por trabajos anteriores (e.g. Beier, 1997; Palacios-Hernández, 2001 y Marinone, 2003), como se observa en la Fig. 5, donde se había utilizado un viento sencillo como forzamiento.

3.3. *Energía Cinética, Vorticidad Relativa y Divergencia.*

En la sección anterior se presentó para algunos tiempos los campos de corrientes para ejemplificar su evolución durante el ciclo estacional. Una forma sintetizada de mostrar estos resultados es mediante el cálculo de la energía cinética. También para ver el efecto del viento, espacialmente homogéneo o no, sobre la circulación, se calculó la vorticidad relativa y divergencia horizontal, como medidas de tal efecto. Por ejemplo, en un océano infinito, un viento homogéneo no introduce vorticidad al sistema y la divergencia es igual a cero, pero en un mar semicerrado, por efectos costeros si se produce vorticidad y la divergencia es distinta de cero.

A continuación definiremos estas variables, utilizadas en observar el efecto de los campos de viento, VO y VI, en la circulación del Golfo de California.

La densidad de energía cinética es

$$E = 1/2 \rho_0 (u^2 + v^2), \quad (4)$$

donde ρ_0 es densidad constante bajo la aproximación de Boussinesq.

La vorticidad relativa es

$$\zeta = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y. \quad (5)$$

Cuando $\zeta > 0$ se dice que la circulación es ciclónica y cuando $\zeta < 0$ anticiclónico.

La divergencia horizontal es,

$$D = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y, \quad (6)$$

y cuando $D > 0$ se dice que hay divergencia y cuando $D < 0$ convergencia. Estas fueron calculadas sobre todos los puntos de la malla del modelo y en cada una de las capas. A estas variables se les calculó el promedio temporal, promedio lateral y promedio temporal y lateral como se muestra a continuación.

3.3.1. Promedio Temporal

El promedio temporal de densidad de energía cinética, vorticidad relativa y divergencia se calculó como,

$$\{E^T, \zeta^T, D^T\} = T^{-1} H^{-1} \iint \{E, \zeta, D\} dz dt, \quad (7)$$

donde T es el tiempo total. La integral en la vertical se realizó para CS, CE y CT y H es el grosor de cada una de estas capas.

Energía Cinética. Los valores más altos de densidad de energía cinética se observan sobre la costa continental para ambos experimentos (Fig. 6), decreciendo hacia la península. Para el experimento VO los valores más elevados de energía cinética ($> 13 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$) en CS se concentran principalmente en pequeñas áreas, mientras que en el caso VI

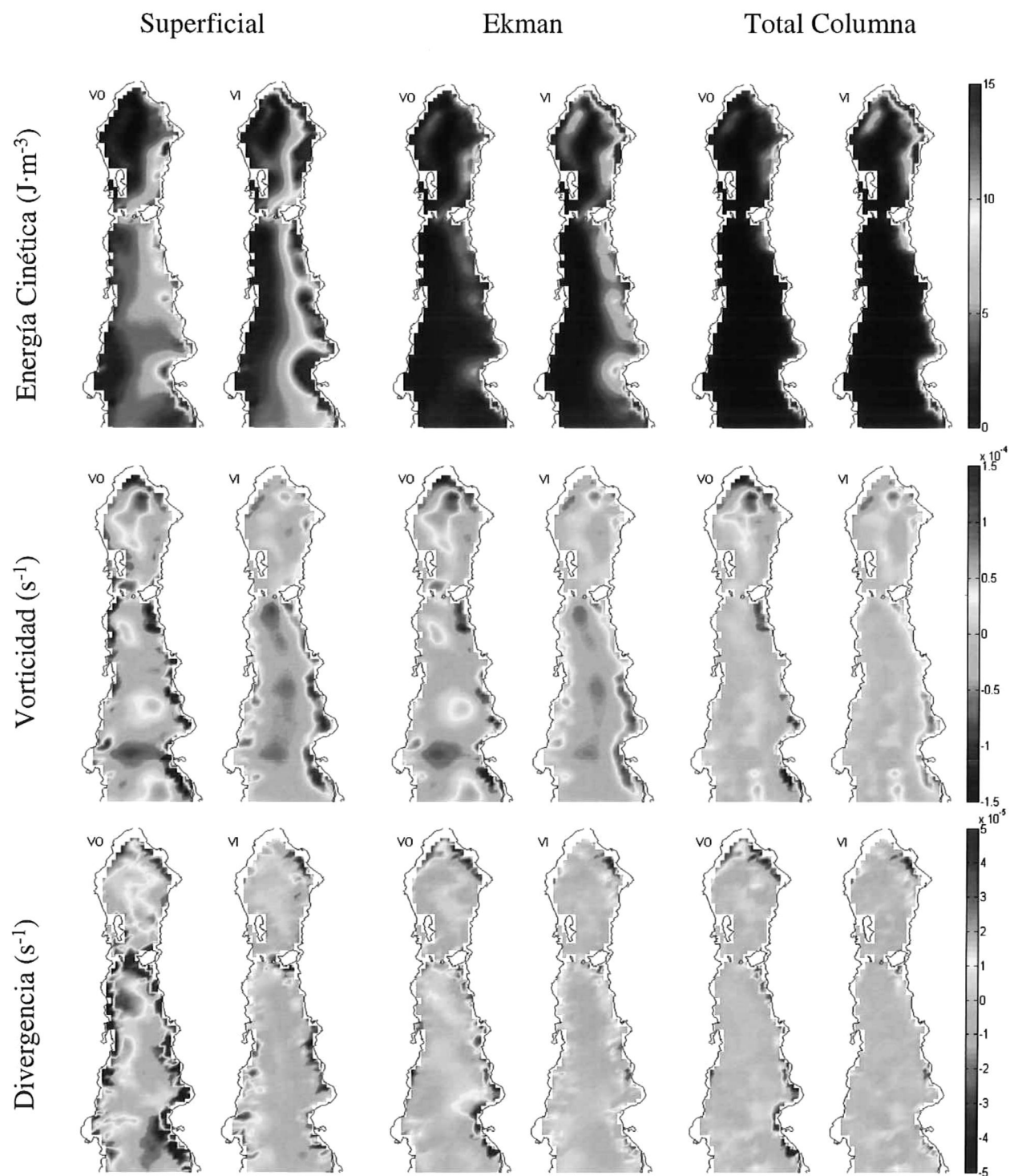


Fig. 6. Promedio temporal (color) de la energía cinética, vorticidad relativa y divergencia en la capa superficial (CS), capa de Ekman (CE) y en toda la columna de agua (CT).

se presentan a lo largo de toda su costa continental. Sobre la región oriental de las islas VI presenta mayor energía que VO. La magnitud del promedio de la energía en ambos experimentos, decrece al integrar un mayor número de capas sobre el golfo. Nótese que la distribución de la densidad de energía cinética es muy similar a la variabilidad del promedio temporal de las corrientes (Fig. 4).

Vorticidad y Divergencia. En CS y CE, en el experimento VO, se observan centros de vorticidad relativa positiva (ciclónica) y negativa (anticiclónica) intercaladas y centradas sobre las cuencas y al sur de las islas, en algunos casos concuerdan con los observados por Martínez (2002). Estos centros de vorticidad concuerdan con el sentido de los giros y de la rotación de la circulación que se observa más evidentemente en la Fig. 4b. Martínez (2002), en un periodo de análisis de 4 meses (invierno), menciona que existen dos fuentes de vorticidad en el golfo, una debido al corte del esfuerzo del viento y otra por el ajuste del flujo a la costa. En algunos casos los centros de vorticidad positiva se encuentran en zonas donde existe divergencia del flujo, en donde se originarían concavidades y corrientes geostróficas en un sentido que concuerda con $\zeta > 0$. Cerca de las costas se observan zonas de divergencia y convergencia en áreas donde generalmente se presentan surgencias y sumideros, estos originados principalmente por la interacción entre el esfuerzo del viento y la línea de costa, moviendo las corrientes hacia mar adentro, o hacia las costas peninsular/continental, respectivamente. El promedio temporal del viento (Fig. 2a) sobre el golfo y su dirección a lo largo de las costas es una causa de estos fenómenos. En el experimento VI hay vorticidad positiva en las costas del sur e islas y en el centro de la cuenca norte principalmente. En la cuenca

sur, en gran parte del centro de su superficie, la vorticidad es negativa. Tanto vorticidad positiva como negativa se encuentran relacionadas con la rotación del flujo que se observa para el caso VI en las Figs. 4a y 4b. La homogeneidad espacial del viento no permite que haya una fuente directa de vorticidad positiva o negativa hacia la superficie del mar por lo cual la vorticidad queda restringida al papel que juega la línea de costa y la topografía en la circulación de las corrientes. En cuanto a la divergencia esta se encuentra, principalmente, en la costa peninsular y la convergencia en la continental, con muy bajos valores en el centro de la cuenca norte y valores muy cercanos a cero en el centro de la cuenca sur. En CE, en ambos experimentos, la magnitud de la vorticidad disminuye ligeramente, y en mayor medida lo hace la divergencia, conservando la misma estructura espacial a la observada en CS sobre el golfo. En CT, la vorticidad y la divergencia son casi cero sobre gran parte de las islas y el sur del golfo, y se limitan principalmente al norte y sobre la costa continental.

A fin de sintetizar el resultado anterior, se integró lateralmente a lo largo del golfo cada una de las variables como,

$$\{E_L^T, \zeta_L^T, D_L^T\} = X(y)^{-1} \int \{E^T, \zeta^T, D^T\} dx, \quad (8)$$

donde $X(y)$ es el ancho del golfo y depende de la latitud. La Fig. 7 muestra estos promedios para CS, CE y CT. En el experimento VO, la energía, la vorticidad y la divergencia disminuyen de CS a CE y CT sobre casi todo el golfo, siendo en CT la mayor reducción. Sobre la parte superior del norte del golfo no se aprecia un descenso sustancial en la magnitud de estas variables debido a que es más somero.

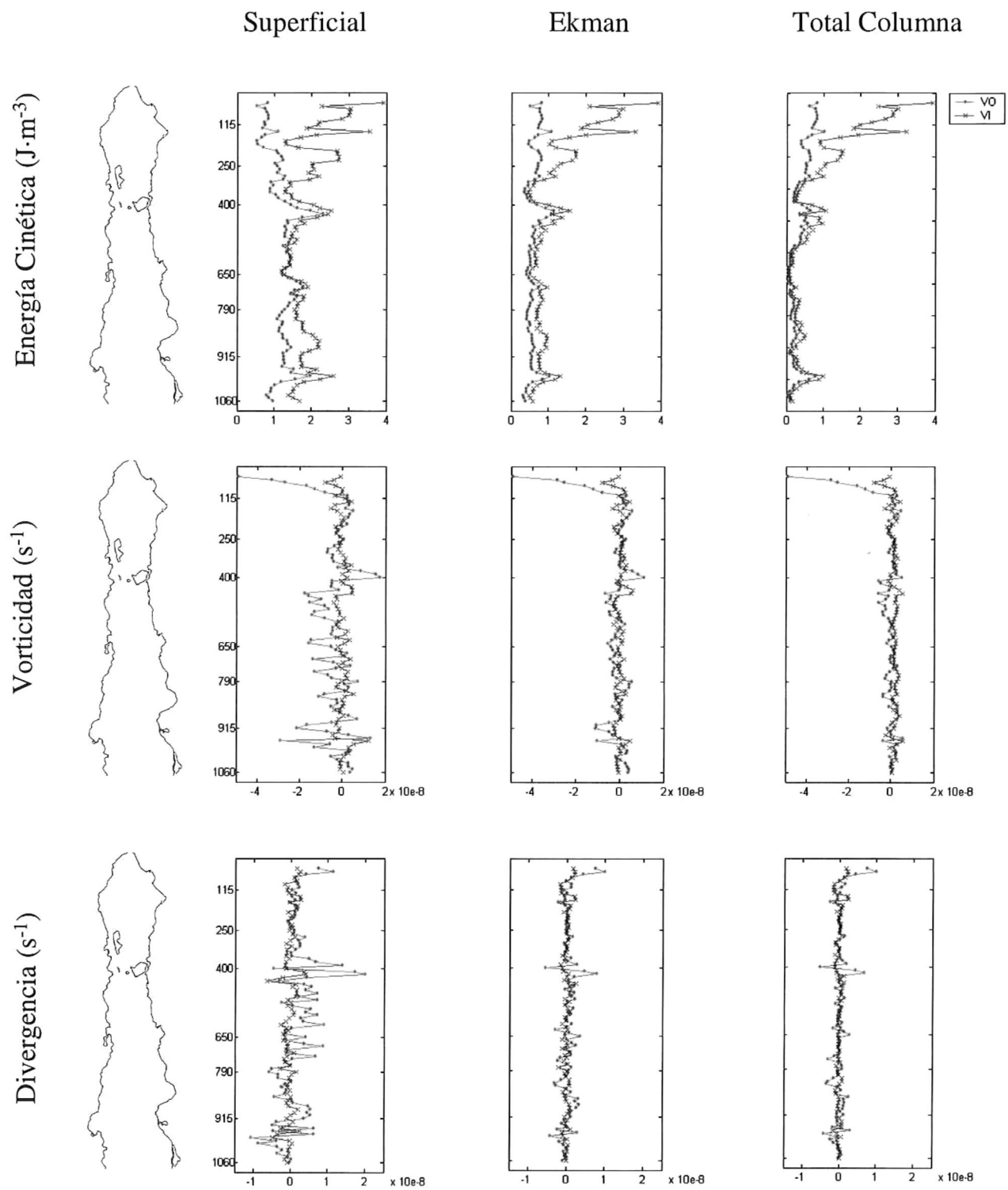


Fig. 7. Promedio transversal y temporal a lo largo del golfo de energía cinética, vorticidad relativa y divergencia en la capa superficial (CS), capa de Ekman (CE) y en toda la columna de agua (CT).

La energía cinética en la capa superficial, CS, muestra similaridades en el comportamiento entre los experimentos a lo largo del golfo. No obstante el caso VI es mucho más energético en el norte a VO y ambos son muy similares en el trayecto que abarca desde la cuenca de Guaymas hacia el sur de las islas. A simple vista se observa que la vorticidad y la divergencia en VO son de mayor magnitud que VI. Esto se debe a que el campo de viento observado posee una mayor variabilidad espacial y temporal, generando mayor vorticidad atmosférica, y por consiguiente, mayor vorticidad sobre las corrientes a través del esfuerzo del viento; y que también se presenten surgencias o hundimientos que llevan por consiguiente una redistribución de las masas de agua en el golfo a través del bombeo de Ekman. Al parecer existe una relación entre vorticidad positiva/negativa y convergencia/divergencia en el promedio lateral-temporal, aunque esto no se cumple en todos los casos a lo largo del golfo. Esto parece más evidente sobre el trayecto que abarca desde la cuenca del Carmen hasta la cuenca de San Pedro Mártir. Sin embargo, el coeficiente de correlación a lo largo de todo el golfo entre la vorticidad y la divergencia en CS para VO es sólo de -0.10.

3.3.2. Evolución Temporal

En la Fig. 8 se muestra la evolución temporal en forma de diagramas Hovmöller de E , ζ y D lateralmente integradas, es decir

$$\{E_L, \zeta_L, D_L\} = X(y)^{-1} H^{-1} \iint \{E, \zeta, D\} dz dx. \quad (9)$$

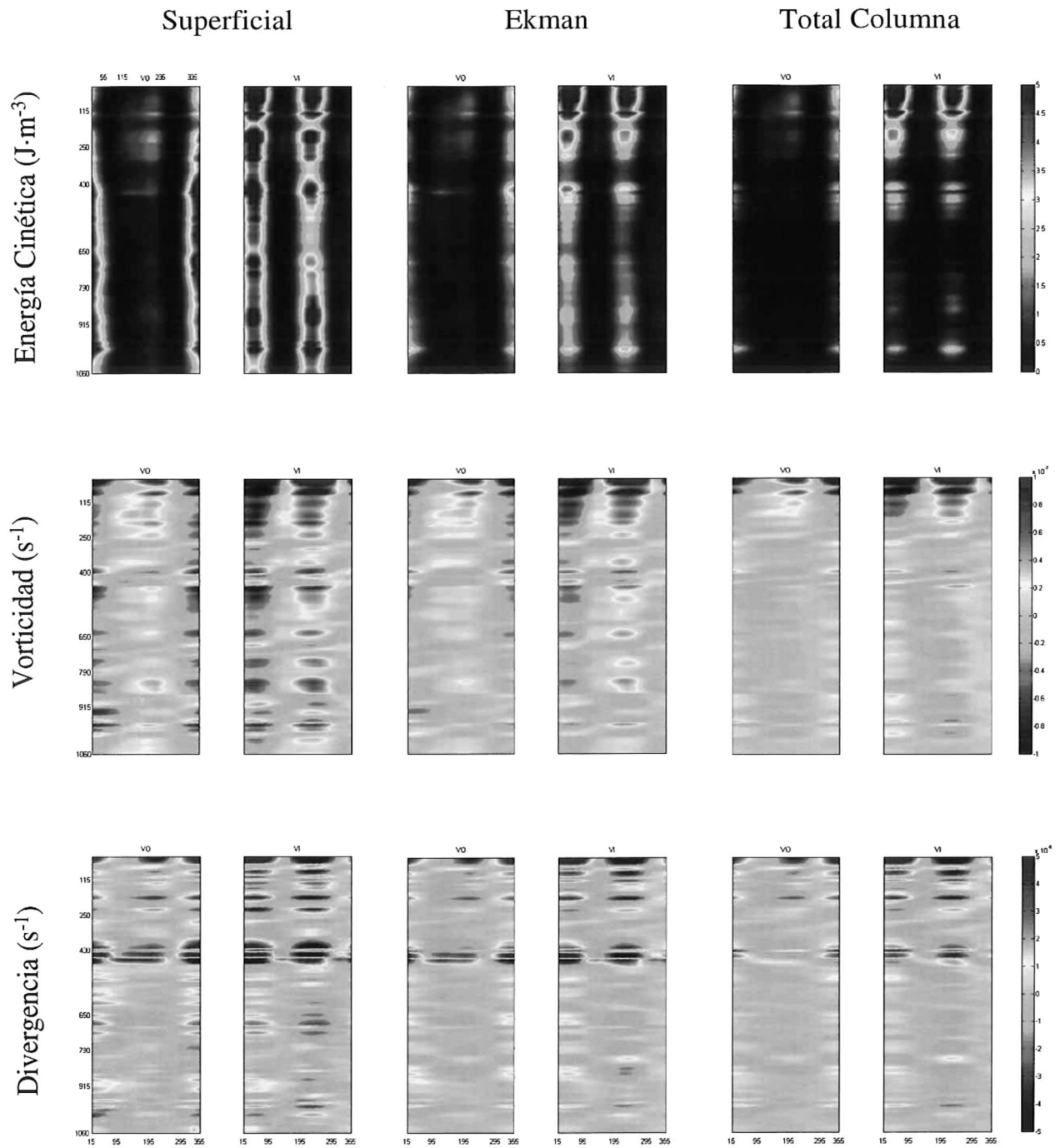


Fig. 8. Promedio transversal de energía cinética, vorticidad relativa y divergencia durante un año, en la capa superficial (CS), capa de Ekman (CE) y en toda la columna de agua (CT) en función del tiempo. El eje horizontal es tiempo (días) y el vertical longitud (km) del golfo desde la cabeza (0 km) hacia la boca (~1060 km), respectivamente. Las fechas señaladas en la parte superior de la primera figura corresponden a los días elegidos en la evolución temporal de las corrientes.

Durante el invierno, el experimento VO, presenta en CS para la densidad de energía cinética los valores más altos, principalmente en el sur del golfo. Estos periodos de alta densidad de energía cinética están relacionados con periodos de vorticidad negativa (anticiclónica) y divergencia principalmente a lo largo del golfo. Aproximadamente a mitad del año de experimento, se observa un incremento en la densidad de energía cinética, principalmente en el norte del golfo, asociado con vorticidad positiva (cyclónica) y convergencia. La presencia de máximos de densidad de energía se encuentra relacionados con los máximos de la rcm que presenta el campo de viento observado (ver Fig. 3). Durante lo que resta del año la densidad de energía cinética, la vorticidad relativa y la divergencia horizontal disminuye al tiempo que lo hace la magnitud del campo de viento.

El experimento VI presenta un claro ciclo estacional en la densidad de energía cinética, vorticidad y divergencia relacionado a los 2 máximos de energía en la variación anual del viento. La distribución a lo largo del golfo es homogénea al igual que el campo de viento idealizado, originando altos valores de energía cinética, vorticidad negativa y divergencia durante el invierno cuando el viento es máximo hacia el sur, y nuevamente alta energía, vorticidad positiva y convergencia en el verano cuando es máximo en dirección norte. Durante el tiempo en que la amplitud del viento idealizado no es grande, la magnitud de las variables decrece y atraviesa por un periodo de transición. En CE y CT, las variables en ambos experimentos disminuyen su intensidad, principalmente al sur del golfo

4. Sumario y Conclusiones

Se analizaron las salidas de un modelo numérico tridimensional del Golfo de California forzado por un viento sencillo (VI) con promedio temporal cero y espacialmente homogéneo, y por viento derivado de satélite (QuikScat) (VO) espacialmente heterogéneo. El promedio del campo de viento observado (VO) no es cero y es básicamente en dirección Este en el norte y Sureste en el resto del golfo, y su varianza temporal se incrementa de la cabeza a la boca.

A pesar de lo estrecho del golfo y de la variabilidad temporal del viento, se observa para VO en el promedio temporal de las corrientes en la superficie y lejos de la costa, una circulación consistente a la teoría de Ekman en aguas profundas, donde las corrientes van aproximadamente a 40° de la dirección del viento. Sobre la costa continental, en ambos casos, las corrientes van básicamente en la dirección del viento y es donde se presenta su mayor variabilidad. A lo largo de la región sur, en la capa de Ekman en VO, se produce una serie de remolinos que alternan el sentido de su circulación con viento variable, mientras que para el caso VI sólo produce una circulación anticiclónica que abarca toda la cuenca.

En la evolución temporal, la duración del régimen del giro ciclónico/anticiclónico en la cuenca norte difiere en el caso VO con respecto a VI y a los presentados en trabajos anteriores.

La variabilidad espacial del viento observado permite que a lo largo y ancho del golfo se presente una distribución más irregular de los campos de energía cinética, vorticidad relativa y divergencia horizontal, tanto en el promedio y la evolución

temporal. Mientras que en el viento idealizado, la homogeneidad espacial y su simple variación anual, produce una distribución espacial más homogénea sobre el centro de las cuencas y a lo largo de las costas en el promedio temporal, y que en la evolución temporal se presente cierta simetría con la inversión de su signo en la vorticidad y divergencia.

Las zonas de mayor densidad de energía cinética se encuentran en zonas de baja profundidad sobre la costa continental, en ambos casos, y son de mayor extensión en VI.

La presencia de núcleos de alta vorticidad relativa (positiva y negativa) en el golfo se encuentran en estructuras en forma de remolinos (ver Fig. 4b), y situados sobre cuencas a lo largo del golfo.

Cerca de las costas, se encuentran las zonas de mayor divergencia y convergencia, con ambos forzamientos. Lejos de éstas, sólo el caso de viento variable las produce.

En la evolución temporal, los periodos de mayor intensidad de los campos de corrientes, densidad de energía cinética, vorticidad relativa y divergencia horizontal, en ambos experimentos, se originan durante los periodos donde el promedio de los campos de velocidad del viento (rcm) en el golfo, estos desfasados en su evolución temporal, son de mayor magnitud (ver Fig. 3).

5. Referencias

- Badan-Dagon, A., C. E. Dorman, M. A. Merrifield y C. D. Winant. (1991). The lower atmosphere over the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 96, 16, 877-16, 896.
- Beier, E. (1997). A numerical investigation of the annual variability in the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27, No.5, 597-848.
- Carbajal, N. (1993). Modeling of the circulation in the Gulf of California. Ph. D. Thesis, Institute fur Meereskunde, Hamburg. 186 pp.
- Marinone, S. G. (2003). A three dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 108 (C10), 3325, doi: 10.1029/2002 JC 001720.
- Marinone, S. G., A. Parés-Sierra, R. Castro y A. Mascarenhas. (2004). Correction to "Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California". *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L10305, doi: 10.1029/2004GL020064.
- Martínez, J. A. (2002). Modeling Studies of Mesoscale Circulation in the Gulf of California. Tesis de Doctorado. College of Oceanic and Atmospheric Sciences. Oregon State University. 173 pp.
- Palacios-Hernández, E. (2001). Circulación de la Región Norte del Golfo de California: Estacional y Anomalías. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 117 pp.

- Parés-Sierra, A., A. Mascarenhas, S. G. Marinone y R. Castro. (2003). Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters*, Vol. **20**. No.6, 1312, doi: 10.1029/2002GL016716.
- Pickard, G. L., Emery, W. J. (1990). Descriptive Physical Oceanography. An Introduction. 5a edición. Pergamon Press. 320 pp.
- Tanahara-Romero, S.A. (1997). Estudio de la Circulación Debida al Forzamiento por Viento en la Zona Norte del Golfo de California Durante Invierno. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 61 pp.