

Efecto de la variabilidad espacial y temporal del viento sobre la circulación en el Golfo de California

Effect of the spatial and temporal variability of winds on the circulation in the Gulf of California

A. Jiménez
S.G. Marinone*
A. Parés-Sierra

Departamento de Oceanografía Física, CICESE
Km 107 Carretera Tijuana-Ensenada
Ensenada, CP 22860, Baja California, México
* E-mail: marinone@cicese.mx

Recibido en septiembre de 2004; aceptado en diciembre de 2004

Resumen

Con un modelo numérico del Golfo de California, se estudió y comparó su circulación debida al forzamiento de un viento espacialmente homogéneo y de evolución temporal simétrica (VI), y de otro derivado de datos observados de QuikScat (VO). Se presentan las diferencias entre ambos experimentos: del promedio y de la evolución estacional del campo de corrientes, densidad de energía cinética, vorticidad relativa y divergencia horizontal. En el promedio, las corrientes generadas por el VI son más débiles a VO con una estructura más simple: circulación anticiclónica en el sur e irregular en el norte. En ambos la variabilidad es mayor sobre la costa continental en aguas someras y difieren en la duración del giro ciclónico/anticiclónico en la cuenca norte. La magnitud del campo de corrientes también muestra diferencias entre experimentos, debido a la mayor intensidad del viento de otoño a invierno para el VO y en verano para el VI. El promedio de la energía cinética es mayor sobre la costa continental en ambos experimentos. Con VO se presenta alta vorticidad relativa a lo largo del golfo en una serie de núcleos intercalados en su signo. Cerca de las costas la divergencia y convergencia son mayores con ambos forzamientos; lejos de las costas éstas son mayores sólo con VO. La evolución temporal de la energía, vorticidad y divergencia es más irregular en el experimento VO. La vorticidad y divergencia con VI se origina sólo con viento fuerte y en las costas, mientras que en VO se produce también por el rotor del viento aun cuando éste no sea muy fuerte.

Palabras clave: variabilidad del viento, circulación, Golfo de California.

Abstract

A numerical model of the Gulf of California is used to study and compare the circulation due to a spatially homogeneous and time symmetric wind (VI) and one derived from QuikScat data (VO). The mean and seasonal evolution of the currents are presented for both cases, as well as their associated fields of kinetic energy, vorticity and horizontal divergence. On average, the currents generated by VI are weaker than those of VO and with a simpler spatial structure: anticyclonic circulation in the south and irregular in the north. In both cases, variability is larger on the continental coast in shallow waters but differs in the duration of the cyclonic/anticyclonic gyre in the northern basin. The magnitude of the currents also shows differences between the experiments because of stronger winds from autumn to winter for VO and during summer for VI. The average of the kinetic energy is greater for both experiments on the continental side. High relative vorticity cores are present along the gulf for VO. Close to the coast, the divergence and convergence is large in both cases, and large only for VO far from the coast. The temporal evolution of the kinetic energy, vorticity and divergence is more irregular for VO. Vorticity and divergence is generated only on the coasts and for strong winds for VI, whereas for VO it is also produced as a result of the wind stress curl.

Key words: wind variability, circulation, Gulf of California.

Introducción

El Golfo de California es una cuenca oceánica semicerrada 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.

Introduction

The Gulf of California is a semi-enclosed oceanic basin located between the Baja California Peninsula and mainland Mexico (fig. 1), in the subtropical eastern Pacific. It is approximately 150 km wide and 1100 km long, with depths ranging from 200 m at the head to 3600 m at the mouth.

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) 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).

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-Dangon *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 en el golfo, a excepción de Martínez (2002) quien fuerza su modelo con datos de viento derivados 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 este 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, encontraron 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 fue 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 a partir de los datos de viento del QuikScat.

Metodología

Modelo

El modelo numérico utilizado fue el Hamburg Shelf Ocean Model (HAMSOM) adaptado al Golfo de California por Marinone (2003). Las ecuaciones del modelo se resuelven 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 $2.5' \times 2.5'$ ($\sim 3.9 \times 4.6$ km). Se utilizan 12 capas en la vertical con niveles inferiores nominales de 10, 20, 30, 60, 100, 150, 200, 250, 300, 600, 1000 y 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. El modelo fue iniciado desde el reposo, con

Circulation in the gulf is produced, in order of importance, by (a) Pacific Ocean forcing (low frequencies and tide), (b) sea surface winds (Ripa, 1997; Marinone, 2003), and (c) surface heat and water fluxes. From an oceanographic point of view, one of the most important characteristics of atmospheric circulation is the spatial variability, which generates atmospheric vorticity that is transferred to the sea by turbulent momentum fluxes capable of creating turbulence and gyres in the water column (Parés-Sierra *et al.*, 2003).

The atmospheric circulation in the Gulf of California occurs mainly along the longitudinal axis because of the elevated topography on both sides (Badan-Dangon *et al.*, 1991). Numerical studies on the circulation have been based on the assumption that winds blow more or less symmetrically up (northwest) and down (southeast) the gulf in summer and winter, respectively. Consequently, except for Martínez's (2002) modeling studies using satellite-derived wind data from NSCAT/ERS-2 and the NCEP atmospheric circulation model, most numerical simulations of the gulf's circulation have used a hypothetical wind without considering its spatial variation and assuming a simple annual variation (e.g., Carbajal, 1993; Beier, 1997; Tanahara-Romero, 1997; Palacios-Hernández, 2001; Marinone, 2003).

There is evidence, however, indicating that this monsoonal character of surface winds over the Gulf of California is spatially inhomogeneous and not exactly an annual harmonics. Using QuikScat data, Marinone *et al.* (2004) found that the wind reverses approximately in a northwesterly direction during June to August and that the wind field has great spatial variability.

This study aims to compare the differences in circulation produced in a numerical model of the Gulf of California by (a) an idealized and spatially homogeneous wind and (b) the real climatology calculated from QuikScat wind data.

Methodology

Model

The numerical model used was the Hamburg Shelf Ocean Model (HAMSOM) adapted to the Gulf of California by Marinone (2003). The equations are solved semi-implicitly with a complete prediction of the temperature and salinity fields, allowing time-dependent baroclinic movements. The model's domain has a grid size of $2.5' \times 2.5'$ ($\sim 3.9 \times 4.6$ km). Twelve vertical layers are used with nominal inferior levels of 10, 20, 30, 60, 100, 150, 200, 250, 300, 600, 1000 and 4000 m. The number of layers depends on the local depth and the last layer varies in thickness according to the topography. The first layer is 10 m thick plus sea surface elevation. The model was initiated at rest, with an interval of 300 s, and was run until all the variables were periodically stable. As shown by Marinone (2003), the model reproduces the main seasonal signals of sea

un intervalo de 300 s, y se corrió hasta que todas las variables fuesen periódicamente estables. Como muestra Marinone (2003), el modelo reproduce las principales señales estacionales de temperatura superficial del mar, balance de calor, nivel del mar y circulación superficial de la región norte del golfo.

Para enfatizar el efecto del esfuerzo del viento en la circulación del golfo, el modelo fue forzado únicamente por el viento en su superficie, como se explica a continuación.

Experimentos y datos de viento

Se realizaron dos experimentos (corridos) con una duración de un año después de estabilizar. La nomenclatura de los dos experimentos que aparecerán en los resultados es VI para el viento idealizado y VO para el viento observado.

En el experimento con viento idealizado (VI), éste es espacialmente homogéneo y tiene una evolución temporal sinusoidal en dirección noroeste-sureste del golfo, con una amplitud de 5 m s^{-1} 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 sucede el 20 de agosto y ω es la frecuencia anual.

En el experimento con viento 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 este trabajo se usaron datos de viento de QuikScat sin interpolación espacial o temporal alguna; es decir, únicamente donde existiesen datos (Marinone *et al.*, 2004). Los datos de QuikScat abarcan del 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2003. 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 a partir del 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. La varianza explicada de las series, filtrando frecuencias mayores a 1/15 días, es mayor de 90%.

Resultados y discusión

Vientos

Antes de presentar los resultados del modelo se describe la estructura del VO utilizado para forzar el modelo. La figura 2 muestra el campo medio anual y su variabilidad, así como la

surface temperature, heat balance, sea level and surface circulation for the northern gulf.

To emphasize the effect of wind stress on the gulf's circulation, the model was forced only by surface wind, as is explained below.

Wind data and experiments

Two experiments (runs) were conducted lasting one year after stabilization. The nomenclature used in the results is VI for idealized wind and VO for observed wind.

In the idealized wind (VI) experiment, the wind is spatially homogeneous and has a sinusoidal temporal evolution in northwest-southeast direction of the gulf, with an amplitude of 5 m s^{-1} in northwest direction, that is:

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

where W is the wind component along the gulf's axis, ϕ_a is the phase so that the maximum occurs on 20 August and ω is the annual frequency.

In the observed wind (VO) experiment, the spatially and temporally variable wind field data were obtained from the NASA/NOAA sponsored data system Seaflux at the Jet Propulsion Laboratory (JPL) (ftp://ftp.podaac.jpl.nasa.gov/pub/ocean_wind/quikscat/L3/data). QuikScat wind data were used without any spatial or temporal interpolation, that is, only where there were data (Marinone *et al.*, 2004). The QuikScat data cover the period from 1 January 2000 to 31 December 2003. The temporal mean of these data was calculated and least squares were used to determine the annual and semi-annual component at each point of the grid. Hence, for each time step of the model, the wind was reconstructed only from the mean and the annual and semiannual variation as follows:

where φ represents each one of the wind components (u, v) and P their temporal mean, and (A and S) and (ϕ_a and ϕ_s) are their amplitudes and annual and semiannual phases, respectively, and ω is the annual frequency. The explained variance of the series, filtering frequencies greater than 1/15 days, is more than 90%.

Results and discussion

Winds

Before presenting the results of the model, the structure of the VO used to force the model is described. Figure 2 shows

amplitud anual y semianual de las componentes zonal (u) y meridional (v) del viento. La figura 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 (RCM) de este campo, definida como:

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

donde N es el número de puntos de la malla en el golfo. Para el caso del VO, $RCM = 2.05 \text{ m s}^{-1}$ y el promedio de la variabilidad (desviación estándar) en todo el golfo es 2.9 m s^{-1} . Para el caso del VI el promedio, por construcción, es cero y el promedio de la variabilidad es 3.5 m s^{-1} . La amplitud anual de las componentes u y v del viento son mayores que la amplitud semianual, y de éstas v es la mayor. En la figura 2c se muestra cómo cerca de la boca, pegado a la península, alcanza su valor máximo ($>4 \text{ m s}^{-1}$). La región que abarca el norte del golfo y las 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, aun 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 figura 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 VI y VO se muestra en la figura 3: VO presenta un máximo con magnitud mayor a 5 m s^{-1} durante el invierno y otro de $\sim 3 \text{ m s}^{-1}$ casi a la mitad del año; y VI presenta dos máximos iguales, de 5 m s^{-1} , durante la serie por su señal anual. Se puede apreciar claramente que sus máximos y mínimos se encuentran desfasados.

Corrientes

Promedio temporal

Del campo de corrientes obtenido del modelo se calculó el promedio temporal, para ambas simulaciones, en la capa superficial del modelo, en la capa de Ekman y en toda la columna de agua. La capa de Ekman abarca desde la superficie hasta los primeros 60 m de la columna de agua, lo que corresponde a integrar las primeras cuatro capas del modelo. En general, los resultados son muy similares entre la capa superficial y la de Ekman, con magnitudes mayores a la capa integrada en toda la columna de agua. Por tal razón y para apreciar mejor el efecto entre ambos experimentos se mostrarán sólo resultados para la capa superficial (fig. 4).

Se observa que sobre gran parte del golfo, el promedio temporal con VI es mucho menor que con VO. Esto se debe a que

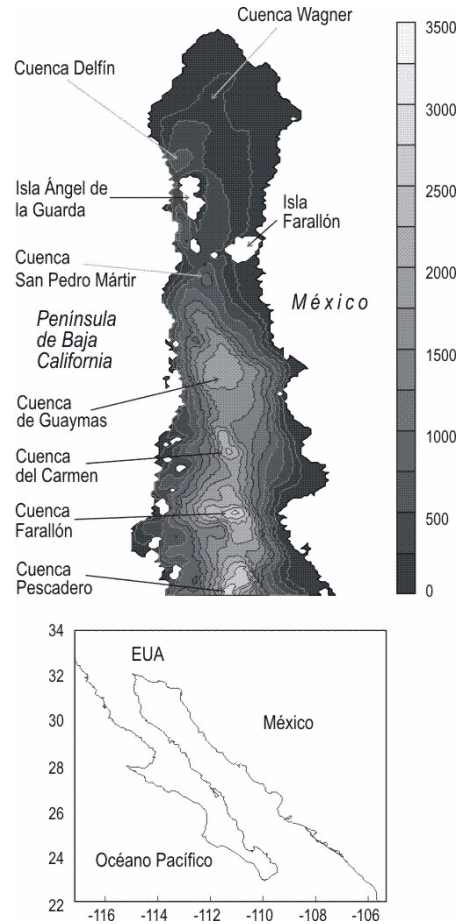


Figura 1. Área de estudio del Golfo de California. Los tonos de gris indican la profundidad (m) y las líneas son las isobatas.

Figure 1. Study area of the Gulf of California. The grey tones indicate depth (m) and the lines are isobaths.

the mean annual field and its variability, as well as the annual and semiannual amplitude of the zonal (u) and meridional (v) components of the wind. Figure 2a shows that the average wind in the north is towards the continent, while in the rest of the gulf it is mainly southeastwards. The variability of its magnitude increases from the gulf's head to the mouth, and from the mainland to the peninsula. As an overall measure of the temporal mean, the mean square root (MSR) of this field was calculated, defined as:

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

where N is the number of points on the gulf grid. In the case of VO, $MSR = 2.05 \text{ m s}^{-1}$ and mean variability (standard deviation) throughout the gulf is 2.9 m s^{-1} . In the case of VI, the mean, due to construction, is zero and mean variability is 3.5 m s^{-1} . The annual amplitude of the u and v components of the wind is higher than the semiannual amplitude. Of these components, v is higher, with maximum value ($>4 \text{ m s}^{-1}$) close to the mouth, next to the peninsula (fig. 2c). The lowest

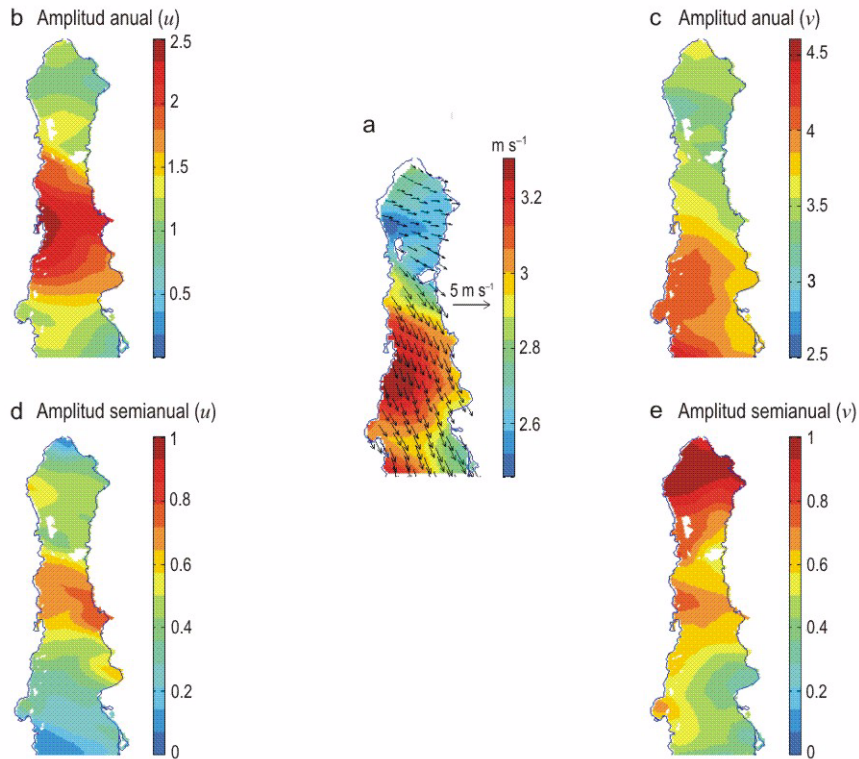


Figura 2. (a) Promedio temporal (vectores; por claridad no se muestran todos) y desviación estándar (m s^{-1}) (sombreado) de la magnitud del viento observado (VO). Amplitud anual (b) y semianual (d) de la componente u , y amplitud anual (c) y semianual (e) de la componente v , del viento. Note el cambio de escalas en la barra de sombreado.

Figure 2. (a) Temporal average (vectors; for clarity, not all are shown) and standard deviation (m s^{-1}) (shaded) of the magnitude of the observed wind (VO) experiment. (b) Annual and (d) semiannual amplitude of the u component, and (c) annual and (e) semiannual amplitude of the v component, of the wind. Note the change of scales in the shaded bar.

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 VO (fig. 4), el promedio anual de las corrientes no se cancela pues el promedio anual del viento no es cero, y se observa un remanente de la corriente mayor al del caso con VI, con tendencia a una circulación ciclónica en el norte del golfo y sobre gran parte del sur, con magnitudes aproximadas a 0.5 cm s^{-1} y 1.3 cm s^{-1} , respectivamente. Los números a la derecha de cada figura son la *RCM* para VO y VI, y ésta es mayor para VO.

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 y $>8 \text{ cm s}^{-1}$, respectivamente), en aguas de relativamente baja profundidad.

El promedio de la corriente en zonas alejadas de la costa con VO, sobre la capa superficial, presenta un ángulo de aproximadamente 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. En la cuenca norte el flujo tiene en promedio una circulación ciclónica, a excepción de su extremo superior la cual es anticiclónica.

amplitude in the annual signal of u and v corresponds to the region that includes the northern gulf and islands. Consequently, wind magnitude in this region has least variability, despite an input observed in the semiannual signal of both components, though not substantial, of amplitude. This can be observed in the standard deviation of figure 2a. The semiannual amplitude of both components contributed, to a lesser extent, to the magnitude of the wind. This amplitude is greater in the zonal and meridional components in some areas at the head and to the south of the islands.

The temporal variation of the *MSR* of wind magnitude throughout the gulf for the VI and VO fields is shown in figure 3: VO presents a maximum magnitude of more than 5 m s^{-1} in winter and another of $\sim 3 \text{ m s}^{-1}$ mid-way through the year, while VI presents two equal maxima of 5 m s^{-1} during the annual series. It is clear that the maximum and minimum values are out-of-phase.

Currents

Temporal mean

Based on the current field obtained from the model, the temporal mean was calculated, for both simulations, in the

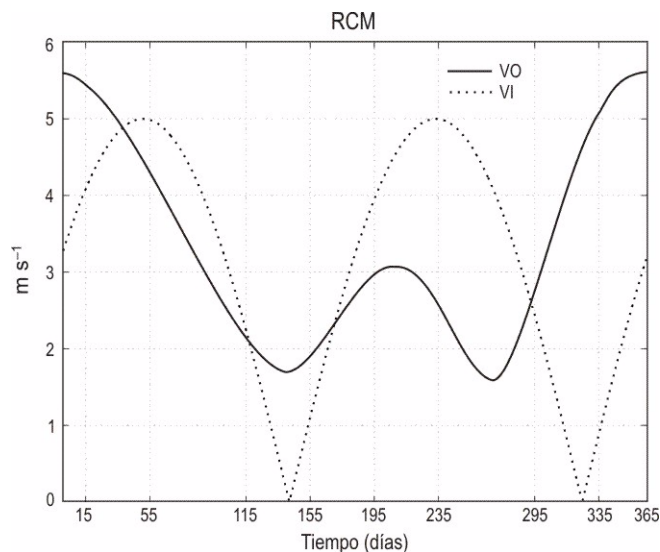


Figura 3. Raíz cuadrática media (*RCM*) ($m s^{-1}$) de la magnitud del viento observado (VO) (línea gruesa) y viento idealizado (VI) (línea delgada) en todo el Golfo de California en una serie de tiempo.

Figure 3. Mean square root (*RCM*) ($m s^{-1}$) of the magnitude of the observed wind (VO, thick line) and idealized wind (VI, thin line) throughout the Gulf of California in a time series.

Evolución temporal

En la figura 4 se observa que hay gran variabilidad (desviación estándar alta) en la evolución temporal de las corrientes y ésta es de mayor magnitud que el promedio. La variabilidad con VI es mayor que con VO, y en ambos caos es más intensa sobre la costa continental. En el caso con VI la variabilidad más alta se presenta en el norte y a la altura de la cuenca Farallón.

La variabilidad temporal del forzamiento, limitada a una señal anual y a una anual más semianual con VI y VO, respectivamente, produce una circulación estacional en las corrientes. Se presentan aquí cuatro tiempos (días 55, 115, 235 y 355) del año, que se encuentran dentro de los meses de febrero, abril, agosto y diciembre, y que representan la evolución estacional (fig. 5). Las razones principales por las cuales se seleccionaron estos días se dan a continuación junto con la descripción del campo de corrientes para ese día.

1. Día 55 (febrero). Los campos de viento, con 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 (fig. 5a). Con 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 con VI, la magnitud de las corrientes es mayor, principalmente sobre el lado del continente. En el norte se observa que la corriente circula

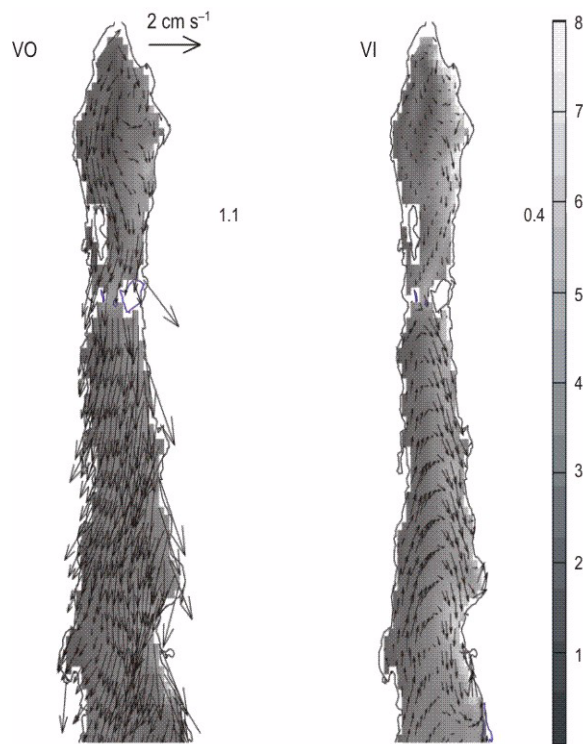


Figura 4. Promedio temporal de corrientes superficiales (vectores, por claridad no se muestran todos) y su desviación estándar ($m s^{-1}$) (sombreado) a lo largo del Golfo de California. Los números que aparecen a la derecha de cada subfigura son la raíz cuadrática media ($cm s^{-1}$) de la magnitud de la velocidad en el golfo.

Figure 4. Temporal average of surface currents (vectors; for clarity, not all are shown) and standard deviation ($m s^{-1}$) (shaded) for the Gulf of California. The numbers that appear to the right of each subfigure are the mean square root ($cm s^{-1}$) of the magnitude of the velocity in the gulf.

surface layer of the model, in the Ekman layer and throughout the water column. The Ekman layer extends from the surface to the first 60 m of the water column, integrating the first four layers of the model. In general, the results are very similar for the surface and Ekman layers, with greater magnitudes than that of the whole water column; therefore, to better appreciate the effect of both experiments, only the results for the surface layer are presented (fig. 4).

The temporal mean with VI is much lower than that with VO over a large part of the gulf. This is because sea surface wind only has an annual variation, which means that, on average, a part of the cycle of the currents practically cancels the other. On the other hand, with VO (fig. 4), the annual mean of the currents is not canceled because the annual mean of the wind is not zero, and a greater remnant of the main current is observed than that with VI, tending to a cyclonic circulation in the northern gulf and most of the southern gulf, with approximate magnitudes of $0.5 cm s^{-1}$ and $1.3 cm s^{-1}$, respectively. The numbers on the right of each figure are the *MSR* for VO and VI, which is higher for VO.

anticiclónicamente, mientras en el sur las corrientes son llevadas en dirección sur hacia la costa peninsular.

2. Día 115 (abril). El campo de vientos muestra una expresión clara del cambio estacional en la amplitud en ambos experimentos y de dirección con VO, mostrando ciertas características particulares en el patrón de corrientes en ambos casos (fig. 5b). Con 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 ellas. 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 hay predominancia en la dirección del flujo ni tampoco se observa la formación de estructuras en forma de remolinos. En ese momento ambos experimentos atraviesan un periodo de transición en el patrón de corrientes, principalmente en el sur.
3. Día 235 (agosto). La dirección del VI es a 180° con respecto a la observada en el día 55, mientras que el VO muestra una reducción de su amplitud principalmente a lo largo del golfo, y su dirección es distinta a la que se observa con VI, lo que origina diferencias en el patrón y magnitud de las corrientes (fig. 5c). Esta fecha es de relevancia, pues habitualmente en los modelos numéricos se utiliza VI y una de sus características más relevantes era su homogeneidad espacial y su periodo de inversión que le daba el carácter de “monzónico”. Esta característica producía un efecto particular sobre la circulación, sin embargo, se observa que en lo más aproximado a la realidad esto no es del todo cierto en los campos de viento, y sus efectos son visiblemente diferentes en la magnitud del campo de corrientes del experimento con VO, como se señala más adelante. La magnitud de las corrientes con VO disminuye su intensidad en el norte y éstas conservan en menor medida parte de la circulación ciclónica observada anteriormente. Sin embargo, con 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 los vientos con VO y VI son distintos en dirección y magnitud.
4. Día 355 (diciembre). Esta última fecha se presenta con la finalidad de mostrar uno de los periodos de mayor magnitud del campo de VO y mientras que el de VI es casi nulo (fig. 5d). En el experimento con 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 éstas se dirigen principalmente hacia la costa peninsular. La corrida con VI muestra corrientes débiles en todo el golfo, con giros anticiclónicos definidos en la cuenca norte y sur.

For both VO and VI, highest spatial and temporal variability of the currents occurs along the coast of mainland Mexico (>5 and >8 cm s⁻¹, respectively), in relatively shallow waters.

The average current in offshore areas with VO, over the surface layer, occurs at an approximate angle of 40° relative to wind stress, in a southerly direction. This is consistent with the Ekman theory. In areas very close to the mainland coast the average current is, to a great extent, in the direction of the average wind. In the northern basin, the circulation tends to be cyclonic, except in the uppermost area, where it is anticyclonic.

Temporal evolution

Figure 4 shows that there is great variability (high standard deviation) in the temporal evolution of the currents, of higher magnitude than the average. Variability is greater with VI than with VO, and in both cases it is more intense on the mainland coast. In the case of VI, greatest variability occurs in the north and around Farallón Basin.

The temporal variability of the forcing, limited to an annual signal and an annual plus semiannual signal with VI and VO, respectively, produces a seasonal circulation of the currents. Four times of the year are presented here (days 55, 115, 235 and 355), corresponding to February, April, August and December, representing the seasonal evolution (fig. 5). The main reason for choosing these days is given below, together with a description of the current field for that day.

1. Day 55 (February): The wind fields with VO and VI basically run in the same direction; however, they produce a pattern of the currents in the gulf of different magnitude in each experiment (fig. 5a). With VO, the currents in the north are in a period of transition from anticyclonic to cyclonic circulation. In the southern basin, the currents flow towards the mouth with greater force on the mainland coast, while in the area of the islands, the currents flow towards this basin. With VI, the magnitude of the currents is greater, mainly on the side of the mainland. In the north the current is anticyclonic, whereas in the south the currents are southerly towards the coast of the peninsula.
2. Day 115 (April): The wind field clearly shows the seasonal change in amplitude in both experiments, and in direction with VO, indicating certain particular characteristics in the pattern of the currents in both cases (fig. 5b). With VO, the currents have a cyclonic circulation in the north and in the island region they flow towards this basin, with a medium-scale cyclonic eddy to the south of these islands. With VI, the magnitude of the currents is of similar intensity, with a similar structure as that of the gyre in the north; but in the

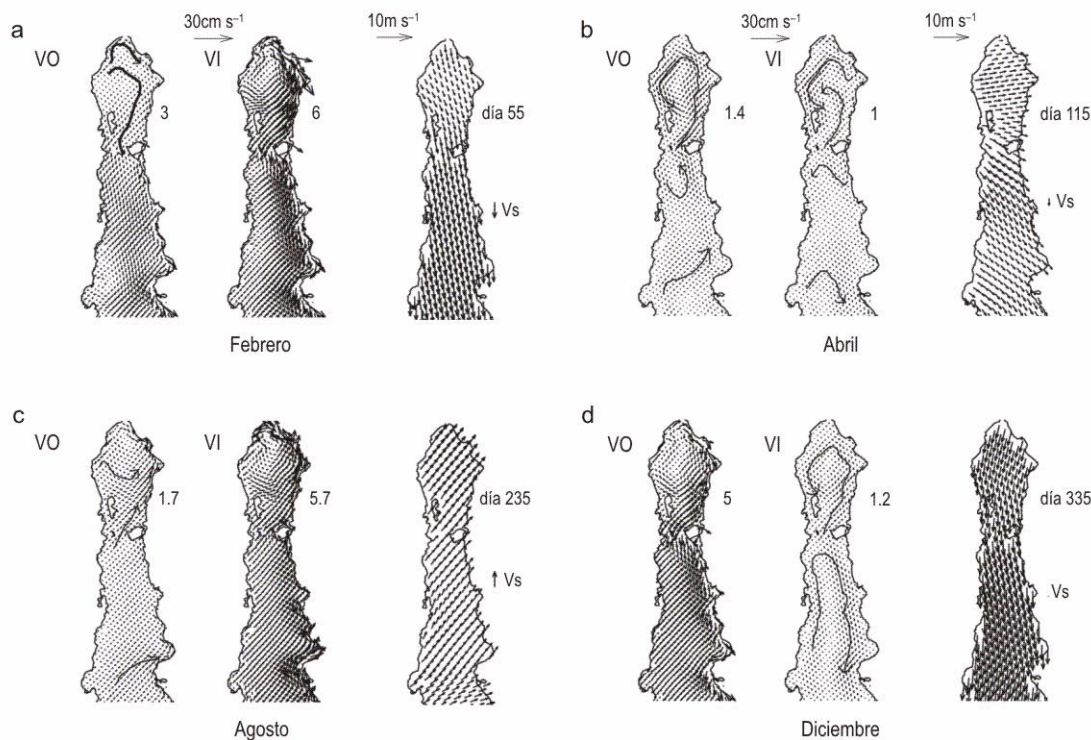


Figura 5. Corrientes en la capa superficial en los días (a) 55, (b) 115, (c) 235 y (d) 335 para las corridas con viento observado (VO) y viento idealizado (VI). A la derecha de cada uno se encuentra una gráfica con el campo de VO y un vector independiente, Vs, que representa la velocidad y dirección del VI en ese día sobre el Golfo de California. Los números que aparecen a la derecha de cada figura son la raíz cuadrática media (cm s^{-1}) de la magnitud de la velocidad en el golfo.

Figure 5. Currents in the surface layer on days (a) 55, (b) 115, (c) 235 and (d) 335 for the observed wind (VO) and idealized wind (VI) runs. The graph to the right of each shows the VO field and an independent vector, Vs, that represents the speed and direction of VI on that day over the Gulf of California. The numbers that appear to the right of each graph are the mean square root (cm s^{-1}) of the magnitude of the velocity in the gulf.

Como se observa en la figura 5 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; Marinone, 2003), donde se había utilizado un viento sencillo como forzamiento, pero incluyendo el forzamiento del Océano Pacífico, el cual es de mayor importancia que el viento (Ripa, 1997). De hecho, se hicieron simulaciones con todos los forzantes con viento realista y sencillo y dan resultados muy similares (no se muestran), lo que indica que efectivamente el forzamiento debido al Océano Pacífico es más importante.

Energía cinética, vorticidad relativa y divergencia

En la sección anterior se presentaron los campos de corrientes para algunos tiempos con el fin de 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 (especialmente 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.

south there is no predominant flow direction and the formation of eddy-like structures is not observed. At this time, both experiments show a transition period in the pattern of the currents, mainly in the south.

- Day 235 (August): The direction of VI is 180° relative to that observed on day 55, while VO shows reduced amplitude mainly along the gulf and its direction is different to that observed with VI, producing differences in the pattern and magnitude of the currents (fig. 5c). This date is important because VI is commonly used in numerical models and one of its most relevant characteristics is its spatial homogeneity and its period of reversal that gives it a monsoonal character, producing a particular effect on the circulation; however, it is observed that, as close as possible to reality, this is not entirely true in the wind fields and the effects are visibly different in the magnitude of the current field of the VO experiment, as indicated further on. The magnitude of the currents with VO decreases in intensity in the north and to a lesser extent they maintain part of the cyclonic circulation previously observed. With VI, on the other hand, the currents increase in magnitude and define a cyclonic gyre in the north, and in the south they are carried by the wind in a northern direction and a gyre is not apparent. Note that at

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

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

La divergencia horizontal es:

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

Estas variables fueron calculadas sobre todos los puntos de la malla del modelo, y se calcularon sus promedios temporal, lateral y lateral-temporal como se muestra a continuación.

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 y H es el grosor de la capa.

La mayor densidad de energía cinética se observa sobre la costa continental para ambos experimentos (fig. 6), decreciendo hacia la península. Para el experimento con VO los valores más elevados de energía cinética ($>13 \text{ J m}^{-3}$) se concentran principalmente en áreas pequeñas, mientras que en el caso con VI éstos se presentan a lo largo de toda la costa continental. Sobre la región oriental de las islas, con VI se presenta mayor energía que con VO. Nótese que la distribución de la densidad de energía cinética es muy similar a la variabilidad del promedio temporal de las corrientes (fig. 4).

En el experimento con VO, en la capa de Ekman (no se muestra) se observan centros de vorticidad relativa positiva (ciclónica) y negativa (anticiclónica) intercaladas y centradas en las cuencas y al sur de las islas, en algunos concordando con los observados por Martínez (2002). Estos centros de vorticidad concuerdan con el sentido de los giros y de la rotación de la circulación. Martínez (2002), en un periodo de análisis de cuatro meses (invierno), menciona que existen dos fuentes de vorticidad en el golfo, una debida 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 ($D > 0$) y convergencia ($D < 0$) en áreas donde generalmente se presentan surgencias y sumideros, éstos 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

this time the wind in the VO and VI experiments is different in direction and magnitude.

4. Day 355 (December): This date is included in this work in order to show one of the periods of highest magnitude of the VO field, while that of VI is almost nill (fig. 5d). In the VO experiment, the circulation pattern of the currents describes an anticyclonic gyre in the north, while in the island region the currents flow southwards and primarily towards the coast of the peninsula over its southern part. The VI experiment indicates weak currents throughout the gulf, with defined anticyclonic gyres in the northern and southern basins.

As can be seen from figure 5, the duration of the anticyclonic/cyclonic gyre over the northern basin is different to that presented in other studies (e.g., Beier, 1997; Palacios-Hernández, 2001; Marinone, 2003), where a simple wind was used as forcing, but including the Pacific Ocean forcing, which is more important than that of wind (Ripa, 1997). In fact, simulations were made with all the forcings with real and simple winds, producing similar results (not shown); this indicates that forcing by the Pacific Ocean is more important.

Kinetic energy, relative vorticity and divergence

In the previous section, the current fields for four dates were presented as examples of their evolution during the seasonal cycle. A synthesized form of showing these results is to calculate the kinetic energy. Moreover, to determine the effect of wind (spatially homogeneous or not) on the circulation, the relative vorticity and horizontal divergence were also calculated as measures of this effect. For example, in an infinite ocean, a homogeneous wind does not introduce vorticity to the system and divergence is equal to zero, but in a semi-enclosed sea, coastal effects produce vorticity and divergence differs from zero.

The kinetic energy density is:

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

where ρ_0 is constant density under the Boussinesq approximation. The relative vorticity is:

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

The horizontal divergence is:

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

These variables were calculated over all the grid points of the model, and their temporal, lateral and lateral-temporal averages were calculated as is shown below.

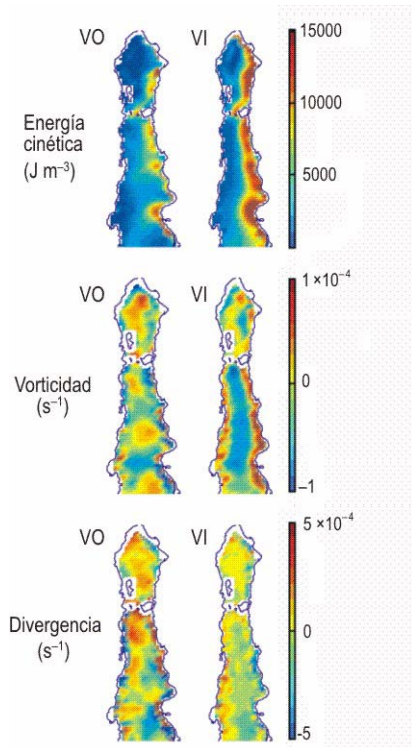


Figura 6. Promedio temporal de la energía cinética, vorticidad relativa y divergencia en la capa superficial del modelo.

Figure 6. Temporal average of kinetic energy, relative vorticity and divergence in the surface layer of the model.

largo de las costas es una causa de estos fenómenos. En el experimento con VI hay vorticidad positiva principalmente en las costas del sur e islas y en el centro de la cuenca norte. 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 con VI en la figura 4. 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 determinada sólo por los efectos de la línea de costa y la topografía sobre la circulación. En cuanto a divergencia y convergencia, éstas se encuentran principalmente en la costa peninsular y continental, respectivamente, con valores muy bajos en el centro de la cuenca norte y muy cercanos a cero en el centro de la cuenca sur.

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

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

donde $X(y)$ es el ancho del golfo y depende de la latitud. La figura 7 muestra estos promedios. La energía cinética muestra similitudes entre el comportamiento a lo largo del golfo en ambos experimentos. No obstante, el caso con VI es mucho más energético en el norte que con VO y ambos son muy

Temporal average

The temporal average of kinetic energy density, relative vorticity and divergence is calculated as follows:

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

where T is the total time and H the thickness of the layer.

The highest density of kinetic energy is observed on the mainland coast in both experiments (fig. 6), decreasing towards the peninsula. The highest kinetic energy values with VO ($>13 \text{ J m}^{-3}$) are primarily found in small areas, while those with VI occur all along the mainland coast. In the eastern part of the islands there is more energy with VI than with VO. Note that the distribution of kinetic energy density is similar to the variability of the temporal average of the currents (fig. 4).

In the VO experiment, for the Ekman layer (not shown) cores of positive (cyclonic) and negative (anticyclonic) relative vorticity are intercalated and concentrated in the basins and to the south of the islands. In some cases they coincide with those observed by Martínez (2002). These vorticity cores concur with the spin direction of the gyres and the rotation of the circulation. Martínez (2002), during a four-month (winter) survey, reports that there are two sources of vorticity in the gulf, one due to the wind stress curl and another due to flow adjustment to the coast. In some cases the positive vorticity cores are found in areas with flow divergence, where geostrophic currents and concavities would originate in a direction that concurs with $\zeta > 0$. Near the coasts, divergence ($D > 0$) and convergence ($D < 0$) zones are found in areas where upwelling and downwelling generally occur as a result of the interaction between wind stress and the coastline, moving the currents offshore or towards the peninsular or mainland coasts, respectively. The temporal average of the wind (fig. 2a) over the gulf and its direction along the coasts is one reason for these phenomena. In the VI experiment, positive vorticity occurs primarily on the southern coasts and around the islands, and in the central part of the northern basin. In the southern basin, vorticity is negative in much of its central area. Both positive and negative vorticity are related to the flow rotation observed with VI in figure 4. Since the spatial homogeneity of the wind does not allow a direct source of positive or negative vorticity towards the sea surface, vorticity is determined only by the effects of the coastline and the topography on circulation. Divergence is mainly found on the peninsular coast and convergence on the mainland coast, with very low values in the central part of the northern basin and values very close to zero in the central part of the southern basin.

To synthesize the previous result, each variable was integrated laterally along the gulf:

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

where $X(y)$ is the width of the gulf and depends on latitude. Figure 7 shows these averages. The kinetic energy shows a

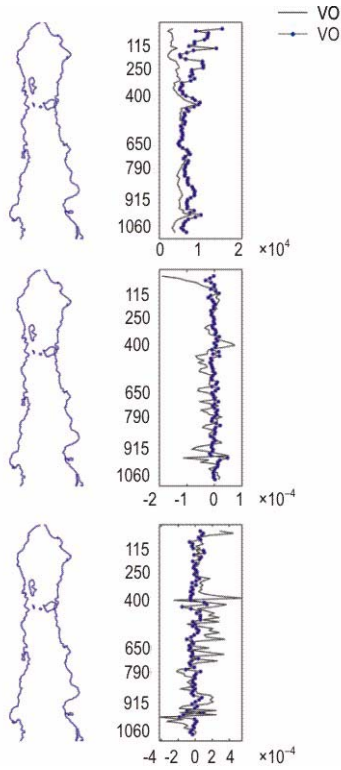


Figura 7. Promedio transversal y temporal a lo largo del Golfo de California de energía cinética, vorticidad relativa y divergencia en la capa superficial.
Figure 7. Transversal and temporal average along the Gulf of California of kinetic energy, relative vorticity and divergence in the surface layer.

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 con VO son de mayor magnitud que con VI. Esto se debe a que el campo de VO posee una mayor variabilidad espacial y temporal, generando mayor vorticidad atmosférica, y, por consiguiente, transmitiendo mayor vorticidad sobre las corrientes a través del esfuerzo del viento. Además, se presentan surgencias o hundimientos que generan 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 ésta no se cumple en todos los casos a lo largo del golfo. Esta relación 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 la capa superficial con VO es sólo de -0.10 .

Evolución temporal

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

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

similar behaviour in both experiments along the gulf. Nevertheless, with VI there is much more energy in the north than with VO, and with both it is very similar in the area from the Guaymas Basin to south of the islands. Vorticity and divergence with VO appear to be of greater magnitude than with VI. This is because the VO field has greater spatial and temporal variability, generating more atmospheric vorticity and, consequently, producing more vorticity on the currents through wind stress. In addition, upwelling and downwelling occur causing a redistribution of the water masses in the gulf by Ekman pumping. A relationship appears to exist between positive/negative vorticity and convergence/divergence in the lateral-temporal average, though it is not fulfilled in all cases along the gulf. This relationship is more evident in the area from Carmen Basin to San Pedro Mártir Basin; however, the correlation coefficient throughout the gulf between vorticity and divergence in the surface layer with VO is only -0.10 .

Temporal evolution

Figure 8 shows the temporal evolution by Hovmöller diagrams of laterally integrated E , ζ and D , that is:

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

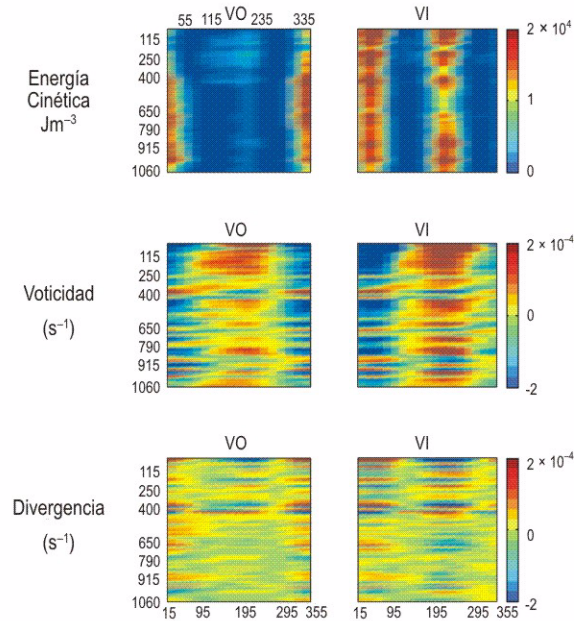


Figura 8. Promedio transversal de energía cinética, vorticidad relativa y divergencia durante un año en la capa superficial del modelo. El eje horizontal es tiempo (días) y el vertical longitud (km) del Golfo de California desde la cabeza hacia la boca, respectivamente. Las fechas señaladas en la parte superior de la primera figura corresponden a los días elegidos en la evolución temporal de las corrientes (fig. 5).

Figure 8. Transversal average of kinetic energy, relative vorticity and divergence during one year for the surface layer of the model. The horizontal and vertical axes indicate time (days) and length (km) of the Gulf of California from the head to the mouth, respectively. The four dates given above the first graph correspond to the days chosen for the temporal evolution of the currents (fig. 5).

Durante el invierno, el experimento con VO presenta los valores más altos para la densidad de energía cinética, 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 relacionada con los máximos de la RCM que presenta el campo de VO (ver fig. 3). Durante lo que resta del año la densidad de energía cinética, la vorticidad relativa y la divergencia horizontal disminuyen al tiempo que lo hace la magnitud del campo de viento.

El experimento con VI presenta un claro ciclo estacional en la densidad de energía cinética, vorticidad y divergencia, relacionado con los dos máximos de energía en la variación anual del viento. La distribución a lo largo del golfo es homogénea al igual que el campo de VI, 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.

Agradecimientos

El trabajo fue elaborado con el presupuesto normal de CICESE y del proyecto 35251-T de CONACyT de S.G. Marinone.

Referencias

- Badan-Dangon, A., Dorman, C.E., Merrifield, M.A. and Winant, C.D. (1991). The lower atmosphere over the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 96, 16: 877–16, 896.
- Beier, E. (1997). A numerical investigation of the annual variability in the Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 27(5): 597–848.
- Carbajal, N. (1993). Modeling of the circulation in the Gulf of California. Ph.D. thesis, Institute für Meereskunde, Hamburg, 186 pp.
- Marinone, S.G. (2003). A three dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 108(C10), 3325, doi: 10.1029/2002 JC 001720.
- Marinone, S.G., Parés-Sierra, A., Castro, R. and Mascarenhas, A. (2004). Correction to “Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California”. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L10305, doi: 10.1029/2004GL020064.

In winter, the VO experiment produced the highest values for kinetic energy density, mainly in the southern gulf. These periods of high kinetic energy density are related to periods of negative vorticity (anticyclonic) and divergence primarily along the gulf. Approximately mid-way through the experiment, an increase is observed in kinetic energy density, mainly in the northern gulf, associated with positive vorticity (cyclonic) and convergence. The occurrence of maximum kinetic energy density values is related to the maximum MSR values of the VO field (see fig. 3). During the remainder of the year the kinetic energy density, relative vorticity and horizontal divergence decrease at the same time as the magnitude of the wind field decreases.

The VI experiment shows a clear seasonal cycle for kinetic energy density, vorticity and divergence related to the two energy maxima in the annual variation of the wind. The distribution along the gulf is homogeneous, as is the VI field, producing high values of kinetic energy, negative vorticity and divergence in winter when southerly winds predominate, and high values of kinetic energy, positive vorticity and convergence in summer when northerly winds predominate. At the time when the amplitude of VI is not large, the magnitude of the variables decreases and undergoes a transition period.

Acknowledgements

This work received financial support from CICESE and CONACyT (grant 35251-T to S.G. Marinone).

English translation by Christine Harris.

-
- Martínez, J.A. (2002). Modeling studies of mesoscale circulation in the Gulf of California. Ph.D. thesis, 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., Mascarenhas, A., Marinone, S.G. and Castro, R. (2003). Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California. *Geophys. Res. Lett.*, 20(6), 1312, doi: 10.1029/2002GL016716.
- Ripa, P. (1997). Towards a physical explanation of the seasonal dynamics and thermodynamics of the Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 27: 597–614.
- 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.