

VARIABILIDAD ESPACIOTEMPORAL DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR EN EL GOLFO DE CALIFORNIA

TIME AND SPATIAL VARIABILITY OF SEA SURFACE TEMPERATURE IN THE GULF OF CALIFORNIA

Luis Soto-Mardones
S.G. Marinone*
Alejandro 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 mayo de 1998; aceptado en octubre de 1998

RESUMEN

Catorce años de imágenes infrarroja de satélite (1983–1996) son usadas para examinar la variabilidad de la temperatura superficial del mar (TSM) del Golfo de California. El estudio de la TSM se enfocó a las escalas semianual, anual e interanual y al promedio. En promedio, la TSM disminuye de la boca hacia la cabeza y su variabilidad aumenta. La escala anual es la responsable de la mayor parte de la variabilidad de la TSM, la cual oscila en fase con pequeñas variaciones de norte a sur. Espacialmente se encuentra en la región norte la formación de núcleos cálidos en invierno, asociados con giros anticiclónicos y núcleos fríos en verano, asociados con giros ciclónicos. La transición de primavera muestra un giro ciclónico ubicado más sobre el lado continental y la de otoño muestra un giro anticiclónico no muy bien definido. La TSM en la región de las islas es siempre menor que el resto del golfo. La variabilidad transversal de la estructura de TSM en la región central y sur se asocia con surgencias. La estructura espacial de la amplitud semianual es tal que aumenta hacia la cabeza al igual que la escala anual. La amplitud en la cabeza es el doble que en la boca y presenta gradientes menores. En la escala interanual, los eventos de 1988–1989 y 1992–1993 se distinguen por llegar hasta la región norte. En ambos eventos, las anomalías aparecen simultáneamente en la región de la boca e islas y a medida que evolucionan se intensifican más en la región de las islas. Este comportamiento no había sido descrito anteriormente. Los eventos de 1985, 1987 y 1990 presentan una evolución “normal”, es decir, una invasión progresiva de aguas cálidas de la región sur hacia dentro del golfo.

Palabras clave: temperatura superficial, variabilidad estacional e interanual, Golfo de California.

ABSTRACT

Fourteen years of satellite images (1983–1996) are used to examine the variability of sea surface temperature (SST) in the Gulf of California. The study focussed on the semiannual, annual and interannual scales and on the average. On average, SST decreases from the mouth to the head and its variability increases. The annual scale is responsible for most of the temporal variability, which oscillates in phase with minor north-south variations. The northern gulf shows the formation of warm anticyclonic

eddies during winter and cold cyclonic eddies during summer. The spring transition shows a cyclonic eddy closer to the mainland side of the gulf; the autumn transition shows a not well-defined anticyclonic eddy. The SST around the island region is always colder than the rest of the gulf. The lateral variability in the central and southern regions is associated with upwelling phenomena. The semiannual and annual amplitudes increase to the north by a factor of two with respect to the southern region. On the interannual scale, the 1988–1989 and 1992–1993 events reach all the gulf. Both events appear first in the south and island regions, and the signals are more intense at the islands than the rest of the gulf. This behavior has not been reported before. The 1985, 1987 and 1990 events show a “normal” evolution, i.e., the warm waters appear in the south and gradually progress into the gulf.

Key words: sea surface temperature, seasonal and interannual variability, Gulf of California.

INTRODUCCIÓN

El Golfo de California es un mar marginal de considerable interés oceanográfico y meteorológico, entre otras razones, por ser la única cuenca de evaporación del Océano Pacífico (Roden, 1958), por su alta productividad biológica, y por sus diferentes características hidrográficas, climáticas y topográficas.

Las características hidrográficas varían a lo largo del golfo. La región norte se caracteriza por tener altas salinidades superficiales y temperaturas que oscilan de 10°C a 32°C de invierno a verano (Sverdrup, 1941). Se sugiere que la distribución de salinidad y temperatura están determinados por flujos estacionales de calor y humedad, con presencia de fuertes mezclas por marea y mezclas convectivas (en invierno) (Lavín y Organista, 1988; Paden *et al.*, 1991). Sin embargo, Ripa (1997), Beier (1997) y Beier y Ripa (1998) indican que la termodinámica y la circulación estacional en el Golfo de California y de la parte norte en particular están dominados por el forzamiento del Océano Pacífico y por el régimen de vientos. Carrillo-Briebiezca (1996) muestra que aparecen giros baroclínicos en la topografía dinámica en la región norte, cóncavo en verano y un domo en invierno.

La región de las islas, delimitada al sur por un umbral, constituye una de las características topográficas más sobresalientes del golfo, donde se encuentran las temperaturas superficiales más bajas debido a la intensa mezcla por marea

INTRODUCTION

The Gulf of California is a marginal sea of considerable oceanographic and meteorological interest, among other reasons, because it is the only evaporative basin in the Pacific Ocean (Roden, 1958), and because of its high biological productivity and different hydrographic, climatic and topographic characteristics.

The hydrographic characteristics vary throughout the gulf. The northern region has high surface salinities and temperatures that oscillate between 10°C and 32°C from winter to summer (Sverdrup, 1941). It has been suggested that the salinity and temperature distributions are determined by seasonal fluxes of heat and humidity, with strong tidal and convective mixing (in winter) (Lavín and Organista, 1988; Paden *et al.*, 1991). However, Ripa (1997), Beier (1997) and Beier and Ripa (1998) indicate that the thermodynamics and seasonal circulation in the Gulf of California, particularly the northern region, are dominated by the forcing of the Pacific Ocean and by the wind regime. Carrillo-Briebiezca (1996) reported baroclinic eddies for the dynamic topography of the northern region, which are concave in summer and dome-like in winter.

The island region, delimited to the south by a sill, is one of the most important topographic characteristics of the gulf. The lowest surface temperatures occur here due to intense tidal mixing (Roden and Groves, 1959; Argote *et al.*, 1985; Paden *et al.*, 1991).

(Roden y Groves, 1959; Argote *et al.*, 1985; Paden *et al.*, 1991).

En la región central, la temperatura superficial muestra una marcada diferencia entre el invierno y el verano, alcanzando valores de 16°C y 31°C, respectivamente (Robles y Marinone, 1987). En esta región ocurren mínimos de salinidad en la capa superficial, cuyo origen probable es una corriente que fluye a lo largo de la costa este hacia el noroeste (Roden, 1964). Bray (1988), Ripa y Marinone (1989) y Ripa (1997) muestran que la circulación geostrofica superficial en una sección a través de Guaymas y Santa Rosalía se revierte estacionalmente.

Finalmente, la región sur que está en comunicación abierta con el Océano Pacífico tropical a través de la boca, tiene una estructura hidrográfica complicada debido a la confluencia de distintas masas de agua. Esencialmente, su estructura termohalina corresponde a la del Pacífico tropical oriental, modificada en la superficie por evaporación (Roden y Groves, 1959; Roden, 1964, 1972; Wyrki, 1966; Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Bray y Robles, 1991).

La circulación superficial en el Golfo de California es predominantemente estacional. En promedio, el agua entra durante primavera y verano y sale durante otoño e invierno; esto fue observado por primera vez en deriva de barco (Thorade, 1909; US Hydrographic Office, 1947 [ambos citados por Roden, 1958]), cálculos geostrofos a partir de datos históricos (Rosas-Cota, 1976; Bray, 1988; Marinone y Ripa, 1988) y diferencias del nivel del mar entre una costa y otra del golfo (Roden y Groves, 1959; Ripa, 1990, 1997; Beier 1997). Una descripción más detallada de la estructura superficial de la circulación estacional horizontal y de su variación en el tiempo fue realizada por Beier (1997), la cual muestra que la circulación superficial es ciclónica en verano y anticiclónica en invierno.

En términos generales, el Golfo de California presenta una señal estacional fuerte en la circulación y temperatura superficial. En cambio, en la salinidad se ha encontrado que no tiene un patrón estacional muy definido; aparentemente está más

In the central region, the surface temperature shows marked differences between winter and summer, reaching values of 16°C and 31°C, respectively (Robles and Marinone, 1987). Minimum salinity occurs in the surface layer, probably due to a northwestward current that flows along the eastern coast (Roden, 1964). Bray (1988), Ripa and Marinone (1989) and Ripa (1997) indicate that the geostrophic surface circulation in a section across Guaymas and Santa Rosalía reverses seasonally.

The southern region, which communicates with the tropical Pacific Ocean through the mouth, has a complex hydrographic structure due to the confluence of different water masses. Essentially, its thermohaline structure corresponds to that of the tropical eastern Pacific, modified at the surface by evaporation (Roden and Groves, 1959; Roden, 1964, 1972; Wyrki, 1966; Álvarez-Borrego and Schwartzlose, 1979; Bray and Robles, 1991).

The surface circulation in the Gulf of California is predominantly seasonal. On average, there is inflow of water during spring and summer and outflow during autumn and winter; this was first observed from ship drifts (Thorade, 1909; US Hydrographic Office, 1947 [both cited in Roden, 1958]), geostrophic calculations using historical data (Rosas-Cota, 1976; Bray, 1988; Marinone and Ripa, 1988) and differences in sea level between one coast of the gulf and the other (Roden and Groves, 1959; Ripa, 1990, 1997; Beier, 1997). A more detailed description of the surface structure of the horizontal seasonal circulation and of its variation in time was made by Beier (1997), and shows that the surface circulation is cyclonic in summer and anticyclonic in winter.

In general, the Gulf of California presents a strong seasonal signal in the surface circulation and temperature. However, the salinity does not appear to have a well-defined seasonal pattern; apparently, there is greater influence of a semi-annual signal (Roden, 1958; Roden and Groves, 1959; Ripa and Marinone, 1989).

influenciada por una señal semianual (Roden, 1958; Roden y Groves, 1959; Ripa y Marinone, 1989).

En la escala interanual, la variación más importante que se ha detectado en el Golfo de California es causada por el fenómeno de El Niño. Baumgartner y Christensen (1985), a partir de observaciones del nivel del mar y anomalías de temperatura del golfo, concluyeron que las ocurrencias de fluctuaciones no estacionales en el nivel del mar se asocian con el episodio de El Niño-Oscilación Austral (ENOA), señalando que la principal fuente de tal variabilidad es la intensificación del giro norecuatorial que se presenta durante tales eventos. Por ejemplo, el evento ENOA 1982–1983 provocó una mayor advección de agua ecuatorial hacia el interior del golfo en marzo de 1983, penetrando hasta la cuenca de Guaymas (Robles y Marinone, 1987; Bray 1988; Torres, 1993). Los eventos de El Niño afectan el patrón de circulación en invierno en la región norte del golfo, cambiando la distribución de densidad en las regiones fuera de las plataformas someras, aunque no existe una norma en la forma en que afectan a ésta (Carrillo-Bribiezca, 1996). En resumen, el Golfo de California se caracteriza por tener variaciones importantes en la frecuencia semianual, anual e interanual.

Las imágenes infrarrojas obtenidas de satélites son una poderosa herramienta en el estudio de procesos oceánicos en las capas superficiales, debido principalmente a que la información está uniformemente distribuida tanto espacial como temporalmente. La temperatura superficial del mar (TSM) obtenida de las imágenes de satélite provee un diagnóstico de procesos dinámicos subsuperficiales. Cambios en la temperatura superficial pueden ser correlacionados con cambios a través de la capa superior y pueden ser relacionados con la variabilidad de los forzantes. Por ejemplo, la presencia de aguas frías en las costas pueden ser relacionadas con surgencias (Paden *et al.*, 1991) o con la variación del calentamiento superficial.

Este trabajo tiene como objetivo dar una descripción detallada de la evolución

On the interannual scale, the most important variation detected in the Gulf of California is caused by the El Niño phenomenon. Baumgartner and Christensen (1985), based on observations of sea level and temperature anomalies in the gulf, concluded that the occurrences of nonseasonal fluctuations in sea level are associated with the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) event, and indicated that the principal source of this variability is the intensification of the north equatorial eddy that occurs during such events. For example, the 1982–1983 ENSO event caused greater advection of equatorial water into the gulf in March 1983, reaching the Guaymas Basin (Robles and Marinone, 1987; Bray, 1988; Torres, 1993). El Niño events affect the circulation pattern in winter in the northern region of the gulf and change the density distribution in the areas off the shallow shelves, even though there is no norm as to how they affect it (Carrillo-Bribiezca, 1996). In summary, the Gulf of California is characterized by important variations in the semiannual, annual and interannual frequency.

Satellite infrared imagery is a powerful tool in the study of upper ocean processes, mainly because the information is uniformly distributed in both space and time. The sea surface temperature (SST) obtained from satellite images provides a description of the dynamic subsurface processes. Changes in surface temperature can be correlated with changes throughout the upper layer and related to variability of the forcing. For example, the presence of cold water on the coasts can be related to upwelling (Paden *et al.*, 1991) or to the variation of surface warming.

The objective of this study is to provide a detailed description of the time and spatial evolution of the surface temperature in the Gulf of California (fig. 1), using a 14-year (1983–1996) series of satellite images averaged weekly.

DATA BASE

The data set used in this study forms part of the global analysis of SST obtained by the University of Miami/Rosenstiel School of Marine

espatiotemporal de la temperatura superficial del Golfo de California (fig. 1), mediante el uso de una serie de 14 años (1983–1996) de imágenes de satélite promediadas semanalmente.

BASE DE DATOS

El conjunto de datos usados en este estudio forma parte de los análisis globales de TSM obtenidos por la Universidad de Miami/Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Sciences (RSMAS). Los archivos son promedios semanales de ocho días de mediciones, trasladando un día con el promedio de la semana anterior, del AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). La cobertura espacial es para una malla de 2048×1024 puntos cubriendo a la Tierra de 180°W a 180°E de longitud por 90°N a 90°S de latitud, con tamaño de malla de aproximadamente 18×18 km. Las áreas donde el efecto de las nubes no permite obtener información se llenan con datos interpolados. De este conjunto semanal de datos se extrajo el área del Golfo de California y se redujo la información a promedios mensuales, es decir, cada mapa mensual se construyó de cuatro o cinco archivos semanales de RSMAS. Cabe señalar que el golfo está casi libre de nubes todo el año (Soto, 1997).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los promedios espaciales y temporales, series de tiempo de la TSM, su climatología y sus anomalías interanuales, análisis armónico de la TSM y una descomposición de la TSM en funciones empíricas ortogonales.

Temperatura mensual (T)

Una inspección rápida de la evolución temporal de la TSM permite ver claramente el conocido dominio de la señal anual. Para ilustrar esta variabilidad, la figura 2 muestra la serie temporal de promedios espaciales en las regiones norte y sur del golfo (ver fig. 1). Destaca en la fig-

and Atmospheric Sciences (RSMAS). The files are weekly averages of eight days of measurements, with one day overlapping the average of the previous week, from AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). The spatial coverage is for a grid of 2048×1024 points, covering the earth from 180°W to 180°E longitude by 90°N to 90°S latitude, with a mesh size of approximately 18×18 km. Interpolated data were used to fill areas where it was not possible to obtain information due to cloud cover. The Gulf of California was extracted from this weekly collection of data and this information was converted to monthly averages, i.e., each monthly map was made from four or five weekly files of RSMAS. It should be noted that the gulf has clear skies most of the year (Soto, 1997).

RESULTS AND DISCUSSION

This section presents the spatial and temporal averages, SST time series, its climatology and interannual anomalies, harmonic analyses of SST and a decomposition of SST with empirical orthogonal functions.

Monthly temperature (T)

A quick examination of the temporal evolution of SST clearly shows the well-known dominant annual signal. In order to illustrate this variability, figure 2 shows the time series of spatial averages in the northern and southern regions of the gulf (see fig. 1). There is a marked difference in the north-south amplitude, an almost in-phase temporal evolution throughout the gulf and the presence of interannual temperature anomalies.

Total average (T_T)

Figures 3a and b show the spatial distributions of the total average of surface temperature (T_T) and the standard deviation (σ_T). Mean temperature decreases from the mouth towards the interior of the gulf, reaches a minimum in the island

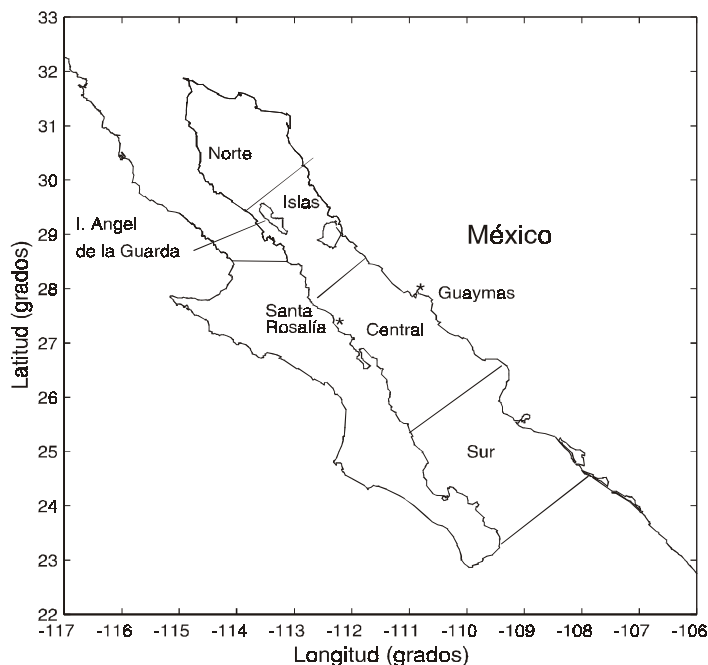


Figura 1. Golfo de California y las cuatro regiones elegidas.
Figure 1. Gulf of California and the four regions selected.

ura una diferencia de amplitud de norte a sur, la evolución temporal prácticamente en fase en todo el golfo y la presencia de anomalías interanuales de temperatura.

Promedio total (T_T)

En la figuras 3a y b se muestran las distribuciones espaciales del promedio total de temperatura superficial (T_T) y su desviación estándar (σ_T). La temperatura promedio disminuye de la boca hacia el interior del golfo, llega a un mínimo en la región de la islas y luego aumenta un poco hacia la cabeza. La variabilidad asociada con la TSM, dada por su desviación estándar, tiene un comportamiento opuesto al promedio, es decir, aumenta hacia el interior del golfo y la variabilidad mínima está en la región de la boca. Como se verá más adelante, esta variabilidad se debe principalmente a la señal anual.

region and then increases slightly towards the head. The variability associated with SST, given by its standard deviation, is contrary to that of the average, i.e., it increases towards the interior of the gulf, with minimum variability in the mouth region. As will be shown later, this variability is mainly due to the annual signal.

Climatology (T_m)

The climatology was calculated by averaging the monthly SSTs of all the years. Figure 4 shows the spatial structure of the SST climatology (T_m), grouped into the four seasons. Minimum temperatures occur throughout the gulf in winter (especially January and February) and maximum temperatures in summer (especially August and September). However, the spatial structure of T_m is different in the four regions. In the northern region during winter, there are warm anticyclonic

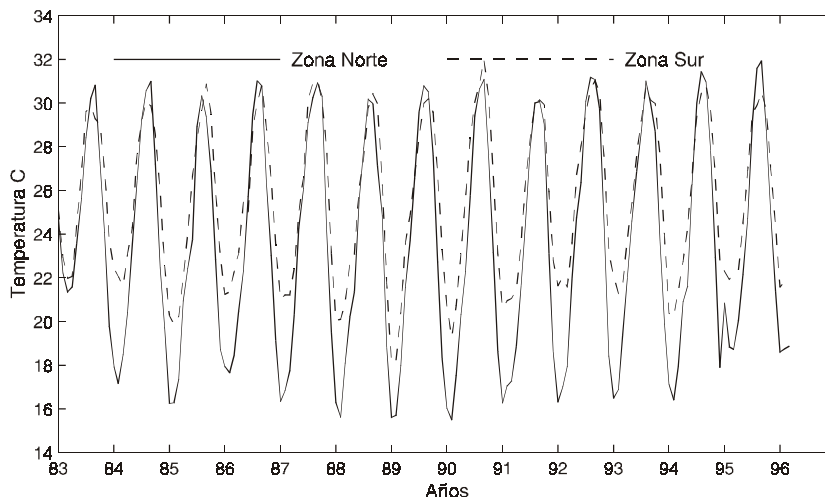


Figura 2. Serie temporal de los promedios espaciales del promedio mensual de la temperatura superficial del mar para las regiones norte y sur del Golfo de California.

Figure 2. Time series of the spatial averages of the monthly mean sea surface temperature of the northern and southern regions of the Gulf of California.

Climatología (T_m)

La climatología se calculó promediando para cada mes la TSM de todos los años. En la figura 4 se muestra la estructura espacial de la climatología de TSM (T_m) agrupada en las cuatro estaciones del año. Ocurren mínimos de temperatura para todo el golfo en los meses de invierno (especialmente enero y febrero) y máximos en los meses de verano (especialmente agosto y septiembre). Sin embargo, la estructura espacial de T_m es diferente en las cuatro zonas. En la zona norte, durante el invierno se observan giros cálidos y anticiclónicos y durante el verano, giros fríos y ciclónicos. La existencia de este sistema de giros, que revierten su sentido con las estaciones, fue mostrada numéricamente por Beier (1997). Lavín *et al.* (1997a), usando boyas lagrangianas, observaron en el invierno de 1996 un giro anticiclónico muy intenso, pero no pudieron atribuirle características permanentes como la que surge de este análisis que incluye 14 años. El giro de ver-

edies and during summer, cold cyclonic eddies. The existence of this system of eddies, which reverse in direction with the seasons, was described numerically by Beier (1997). Lavín *et al.* (1997a), using Lagrangian buoys, observed a very intense anticyclonic eddy in the winter of 1996, but they could not attribute permanent characteristics to it, such as those observed in this analysis that covers 14 years. The summer eddy is widely documented in the literature as a geostrophic eddy (Bray, 1988; Carrillo-Briebiezca, 1996) and by direct measurements of currents (Lavín *et al.*, 1997a).

The summer eddy has less spatial structure than the winter eddy, probably because this is a period of maximum surface warming throughout the gulf. The spring transition shows a cyclonic eddy located more toward the mainland, similar to those described by Beier (1997). The autumn transition shows an anticyclonic eddy that is not well defined, which differs from that found by Bray (1988), Carrillo-Briebiezca (1996), and the

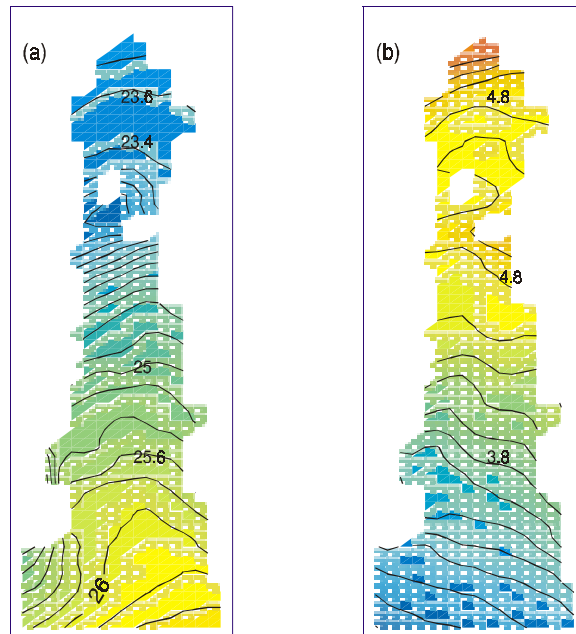


Figura 3. Distribución espacial del (a) promedio total de la temperatura superficial del mar y (b) su desviación estándar. El intervalo de contornos es 0.2°C.
Figure 3. Spatial distribution of (a) total average of the sea surface temperature and (b) its standard deviation. The contour interval is 0.2°C.

ano está ampliamente documentado en la bibliografía como un giro geostrófico (Bray, 1988; Carrillo-Briebzca, 1996) y por mediciones directas de corrientes (Lavín *et al.*, 1997a).

El giro de verano presenta menos estructura espacial que el de invierno, probablemente por ser éste un periodo de máximo calentamiento superficial en todo el golfo. La transición de primavera muestra un giro ciclónico ubicado más sobre el continente, similar a los descritos por Beier (1997). La transición de otoño muestra un giro anticiclónico no muy bien definido a diferencia de lo encontrado por Bray (1988) y Carrillo-Briebzca (1996), y los pronósticos de Beier (1997) y Beier y Ripa (1998). Una razón por la cual se enmascara el giro en la TSM es que el enfriamiento es más rápido que el calentamiento, como se verá más adelante.

predictions of Beier (1997) and Beier and Ripa (1998). The eddy may be masked in the SST because the cooling is quicker than the warming, as will be shown later.

In the island region during winter, particularly around Ángel de la Guarda Island, the orientation of the isotherms is such that there is an anti-cyclonic circulation around it, which coincides with the predictions of Beier's (1997) model, but not with that inferred by Romero-Centeno (1995). It should be noted that in the latter study, only information on the first 300 m is used. During summer, the circulation inferred from SST reverses, as in Beier's (1997) model. The island region is generally characterized as having the lowest temperatures of the gulf. South of the islands there are strong temperature gradients, with greater T_m on the mainland than on the

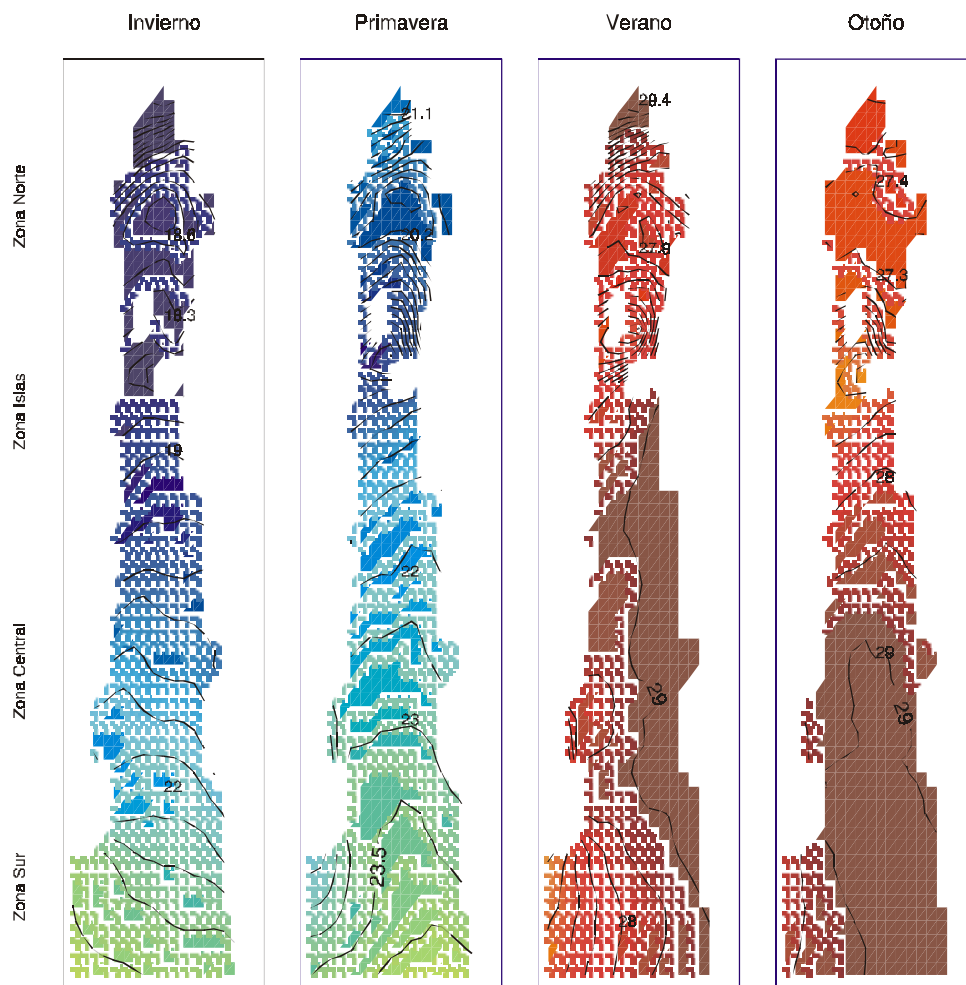


Figura 4. Estructura espacial de la temperatura superficial del mar para las cuatro estaciones del año. Note que para las regiones sur y central el intervalo de contorno es de 0.5°C y para las regiones norte y de las islas es de 0.1°C.

Figure 4. Spatial structure of sea surface temperature for the four seasons. Note that the contour interval is 0.5°C for the southern and central regions and 0.1°C for the northern and island regions.

En la zona de las islas, en particular alrededor de la Isla Ángel de la Guarda, se observa durante invierno una orientación de las isotermas tal que se sugiere una circulación anticiclónica alrededor de ésta, lo cual coincide con las predicciones del modelo de Beier (1997) pero no con lo inferido

península. This suggests that during most of the year, except in November and December, the surface circulation of the gulf is to the northwest.

In the central and southern regions, during winter the isotherms tend to head towards the mainland region, where the water is colder. In the

por Romero-Centeno (1995). Cabe destacar que en este último trabajo sólo se utiliza información de los primeros 300 m. Durante verano, la circulación inferida de la TSM se revierte, igual que en el modelo de Beier (1997). La zona de las islas se caracteriza, en general, por mostrar las menores temperaturas del golfo. Al sur de las islas se observan fuertes gradientes de temperatura con T_m mayor en el continente que en la península. Esto sugiere que durante la mayor parte del año, excepto en noviembre y diciembre, la circulación superficial del golfo es en dirección noroeste.

En las regiones central y sur, se observa que en los meses de invierno las isoterms tienden a orientarse hacia la región del continente, mostrando aguas más frías en esta región. En los meses de verano la estructura espacial de temperatura muestra, en forma más evidente, la presencia de aguas más cálidas en el lado del continente y más frías en el lado de la península. Esta variación estacional de temperatura puede explicarse en términos del efecto del viento, el cual tiene un carácter estacional (el viento sopla del noroeste durante el invierno con rapidez de 8 a 12 $m s^{-1}$ y del sudeste durante el verano, con rapidez promedio $\sim 5 m s^{-1}$; Lavín *et al.*, 1997b) y genera surgencias costeras del lado del continente en invierno y del lado de la península en verano. En los meses de otoño y primavera la estructura de las isolíneas tiene una estructura similar entre sí, sugiriendo una transición de circulación anticiclónica en invierno y ciclónica en verano.

En la figura 5 se muestra el promedio espacial de T_m en las regiones norte, de las islas y sur del golfo y se observa nuevamente el marcado comportamiento estacional. Para los meses de verano se observa que las temperaturas máximas son estadísticamente iguales en todo el golfo. En invierno las temperaturas mínimas son diferentes entre regiones: la parte sur es aproximadamente 3°C más cálida que la región norte. Otra característica importante es que las diferencias espaciales de T_m vienen de las diferencias de temperaturas de invierno. Las regiones norte y de las islas presentan las más bajas temperaturas casi todo el año excepto en verano, cuando es similar a

summer months, the spatial structure of the temperature clearly shows the presence of warmer waters on the mainland side and colder waters on the peninsula side. This seasonal variation in temperature may be due to the wind that has a seasonal character (northwesterly during winter, at 8 to 12 $m s^{-1}$, and southeasterly during summer, at $\sim 5 m s^{-1}$; Lavín *et al.*, 1997b) and generates coastal upwelling on the mainland side in winter and on the peninsula side in summer. During autumn and spring, the structure of the isolines is similar, suggesting a transition from anticyclonic circulation in winter to cyclonic in summer.

Figure 5 shows the spatial average of T_m in the northern, island and southern regions of the gulf and, again, there is a marked seasonal behavior. The maximum temperatures in summer are statistically the same throughout the gulf. In winter, the minimum temperatures are different among regions: the southern part is approximately 3°C warmer than the northern region. Another important characteristic is that the spatial differences in T_m come from differences in winter temperatures. The northern and island regions have the lowest temperatures year-round, except during summer, when they are similar to the southern region. The climatology of the gulf is such that it cools in ~ 4 months and warms up in ~ 7 . The change or transition during spring is not as abrupt as that experienced by the California Current (Strub *et al.*, 1987).

In order to observe how the climatology and total average evolve in the gulf, a lateral average was calculated. Figure 6 clearly shows that the surface temperature oscillation is greater in the head than in the mouth, and the variation is mainly due to the annual variation. This is responsible for the great temporal variability associated with the total average, given as σ_T in figure 3. On the other hand, the coldest months are January, February and March, and the warmest months, August and September. In winter, the northern and island regions remain colder, compared to the other gulf regions, mainly due to the influence of tidal mixing at the islands and because it is very

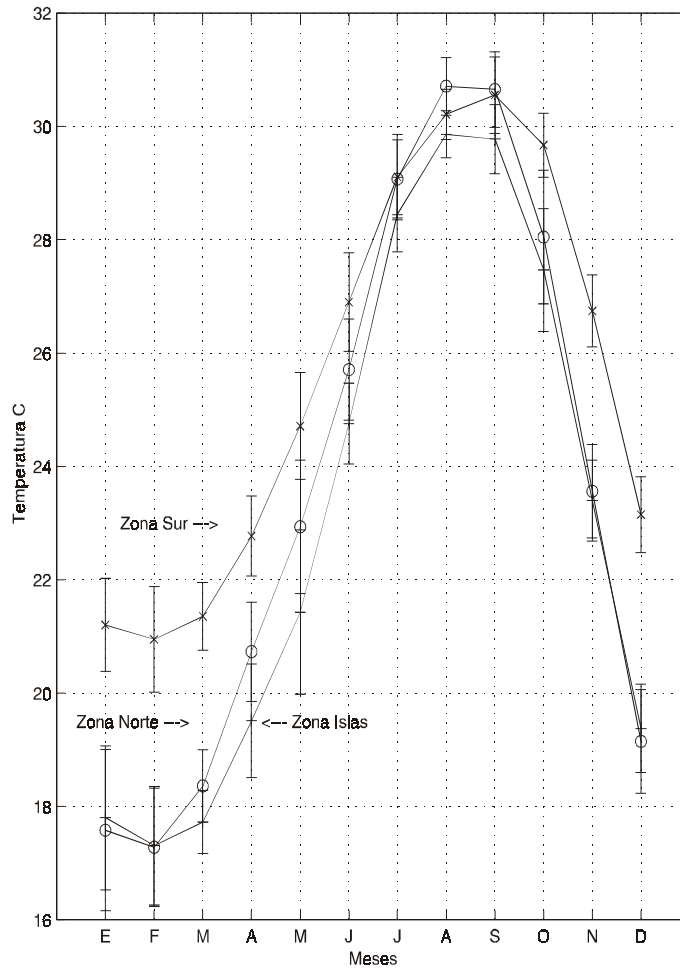


Figura 5. Serie temporal de los promedios espaciales de la climatología de la temperatura superficial del mar, del periodo 1983–1996, para las regiones norte, de las islas y sur del Golfo de California.

Figure 5. Time series of the spatial averages of the climatology of the sea surface temperature from 1983–1996, for the northern, island and southern regions of the Gulf of California.

la región sur. La climatología del golfo es tal que se enfría en ~4 meses y se calienta en ~7. El cambio o transición de primavera no es tan abrupto como el experimentado por la Corriente de California (Strub *et al.*, 1987).

Para observar como evolucionan la climatología y el promedio total a lo largo del golfo, se calculó un promedio integrado lateralmente. La figura 6 muestra claramente que la oscilación de

shallow in the north. However, during summer, the warming is so strong that the difference between these regions and the central and southern regions is lower.

Climatological anomalies (T'_m)

Figure 7 shows the maps of climatological anomalies (T'_m), obtained by subtracting the total

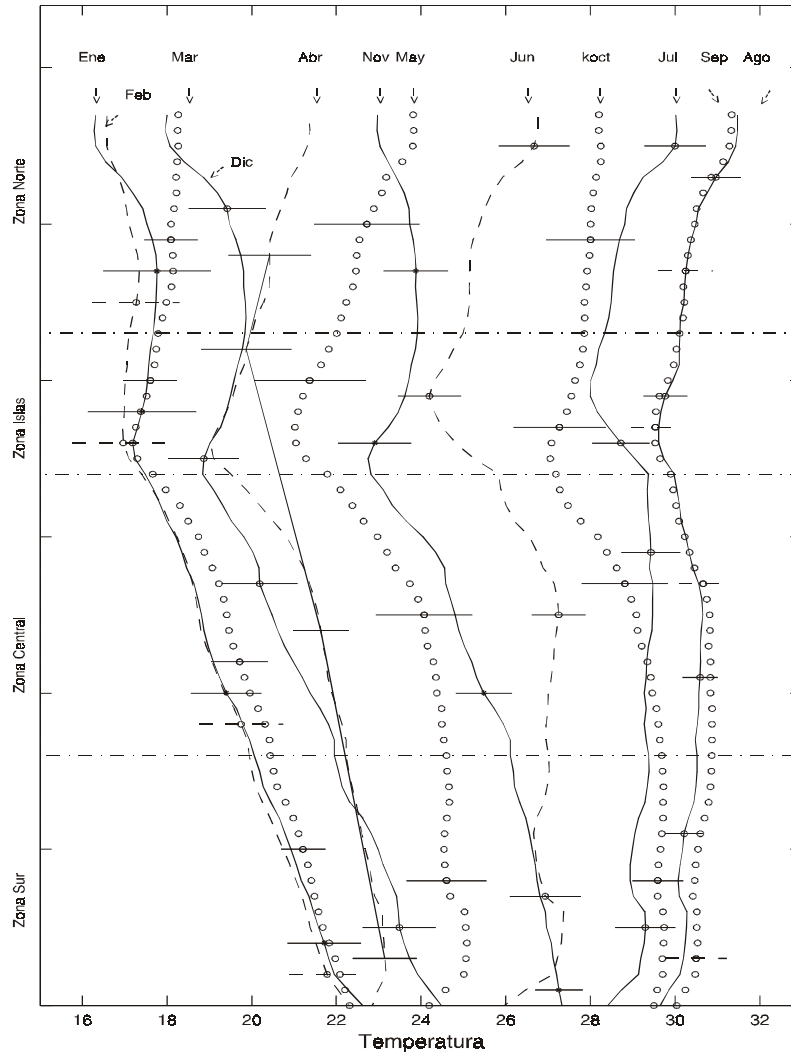


Figura 6. Climatología de la temperatura superficial del mar integrada lateralmente.
Figure 6. Climatology of sea surface temperature laterally integrated.

la temperatura superficial es mayor en la cabeza que en la boca y su variación es debida principalmente a la variación anual; esto explica y es responsable de la gran variabilidad temporal asociada con el promedio total, dado por σ_T , mostrado en la figura 3. Por otro lado, se muestra que

average (T_T) from each of the climatological monthly maps (T_m). The anomaly fields are negative from December to May and positive from June to November. The most important difference between the T'_m spatial structure and that of T_m is the absence of the temperature gradient south of

los meses más fríos son enero, febrero y marzo, y los más calientes, agosto y septiembre. En los meses de invierno, las regiones norte y de las islas permanecen más frías en comparación con el resto de las regiones del golfo, debido principalmente a la influencia de la mezcla por mareas en las islas y a que es muy somero en el norte. Sin embargo, en los meses de verano el calentamiento es tan fuerte que la diferencia entre estas regiones y las regiones central y sur es menor.

Anomalías climatológicas (T'_m).

La figura 7 muestra los mapas de anomalías climatológicas (T'_m), obtenidas de restar a cada uno de los mapas mensuales climatológicos (T_m) el promedio total (T_T). Los campos de anomalías son negativos de diciembre a mayo y positivos de junio a noviembre. La diferencia más importante entre la estructura espacial T'_m y de T_m es la ausencia del gradiente de temperatura al sur de las islas. Este gradiente es una característica del promedio total, es decir, es un proceso permanente y no estacional, pues es debido a la mezcla por mareas, las cuales tienen como periodo máximo el quincenal (ciclo de mareas vivas a muertas).

Anomalías interanuales (T'_i)

El campo de anomalías interanuales (T'_i) resulta de aplicar un promedio corrido de 12 meses tres veces consecutivas a la serie original y de restarle el promedio total (T_T). La figura 8 muestra la serie temporal de anomalías interanuales en las cuatro regiones del golfo. En las cuatro regiones se observa que ocurren eventos anómalos destacables: en 1985, 1987, 1988–1989 y 1992–1993 (note que el evento de 1982–1983 desaparece por el promedio corrido). El evento frío de 1985 muestra gran similitud en las cuatro regiones. El evento caliente de 1986–1987 se caracteriza por mostrar anomalías positivas en la región central antes que en cualquier otro lugar. El evento frío de 1988–1989 es más intenso que el de 1985 y ocurre simultáneamente en todo el golfo con la excepción de la zona norte que deja de

the islands. This gradient is a characteristic of the total average, i.e., it is a permanent and not a seasonal process, since it is due to tidal mixing that has a maximum period of two weeks (spring and neap tide cycle).

Interannual anomalies (T'_i)

The interannual anomaly field (T'_i) is obtained by applying a running average of 12 months three consecutive times to the original series and subtracting the total average (T_T). Figure 8 shows the time series of interannual anomalies in the four regions of the gulf. The occurrence of notable anomalous events is observed in the four regions: in 1985, 1987, 1988–1989 and 1992–1993 (note that the 1982–1983 event disappears because of the running average). The cold event of 1985 is very similar in the four regions. The warm event of 1986–1987 is characterized by showing positive anomalies in the central region before any other region. The cold event of 1988–1989 is more intense than that of 1985 and occurs simultaneously throughout the gulf, with the exception of the northern zone that stops cooling by mid-1988. The four regions are in phase during the 1992–1993 warm event. The anomalous events found in T'_i follow the same pattern as the El Niño index, given by the Climate Prediction Center of NOAA.

Figure 9a shows the spatial structure of interannual anomalies of the warm event of 1987. At the beginning of this event (January), positive anomalies are observed in the central region. In the mature phase (August), a meridional front trapped to the coast develops, extending along the mainland with maximum amplitudes in the central region; its decline phase is abrupt (~3 months), compared to its growth period (~6 months). Note that this anomalous event does not propagate towards the northern region, like the more intense warm events.

Figure 9b shows the spatial fields of interannual anomalies that allow us to see the initial (January) and mature (December) phases of the 1988–1989 cold event. From January 1988,

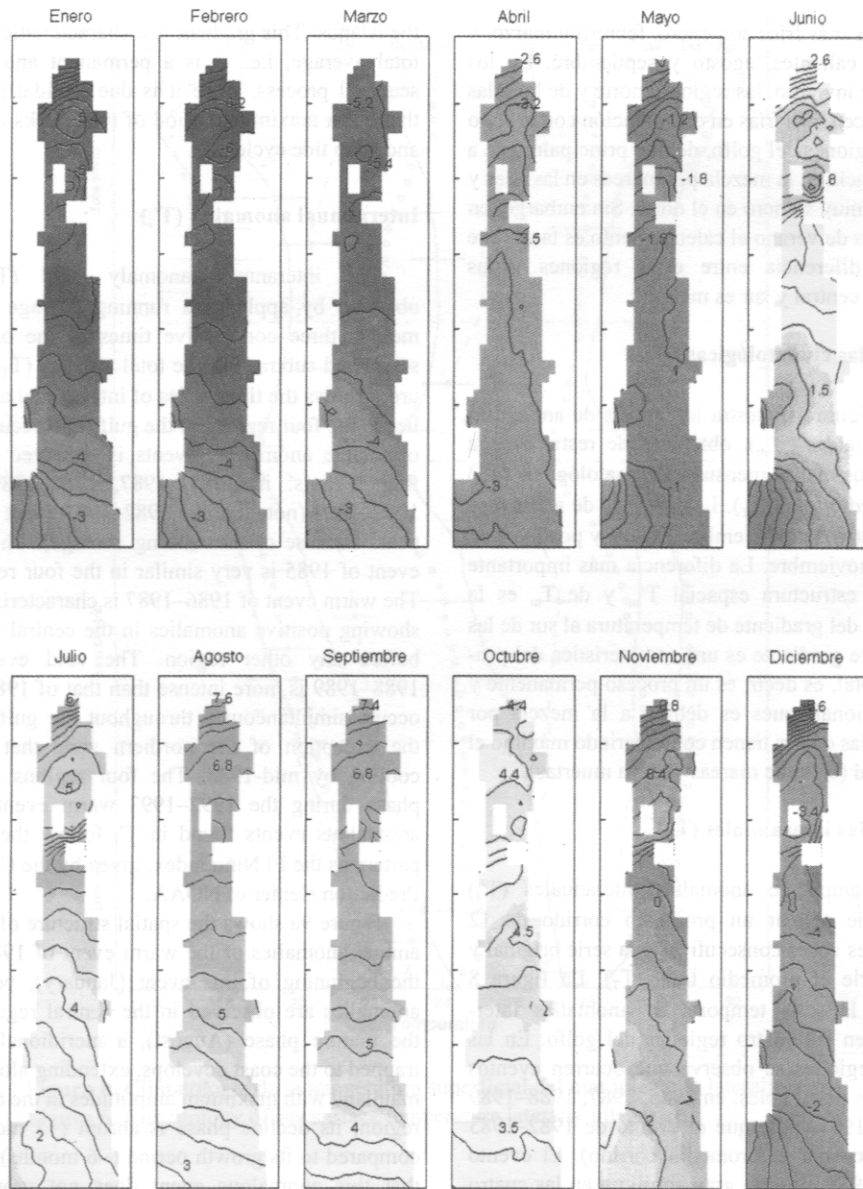


Figura 7. Estructura espacial de las anomalías de la temperatura superficial del mar. Note que para las regiones sur y central el intervalo de contorno es de 0.5°C y para las regiones norte y de las islas es de 0.2°C.

Figure 7. Spatial structure of sea surface temperature anomalies. Note that the contour interval is 0.5°C for the southern and central regions and 0.2°C for the northern and island regions.

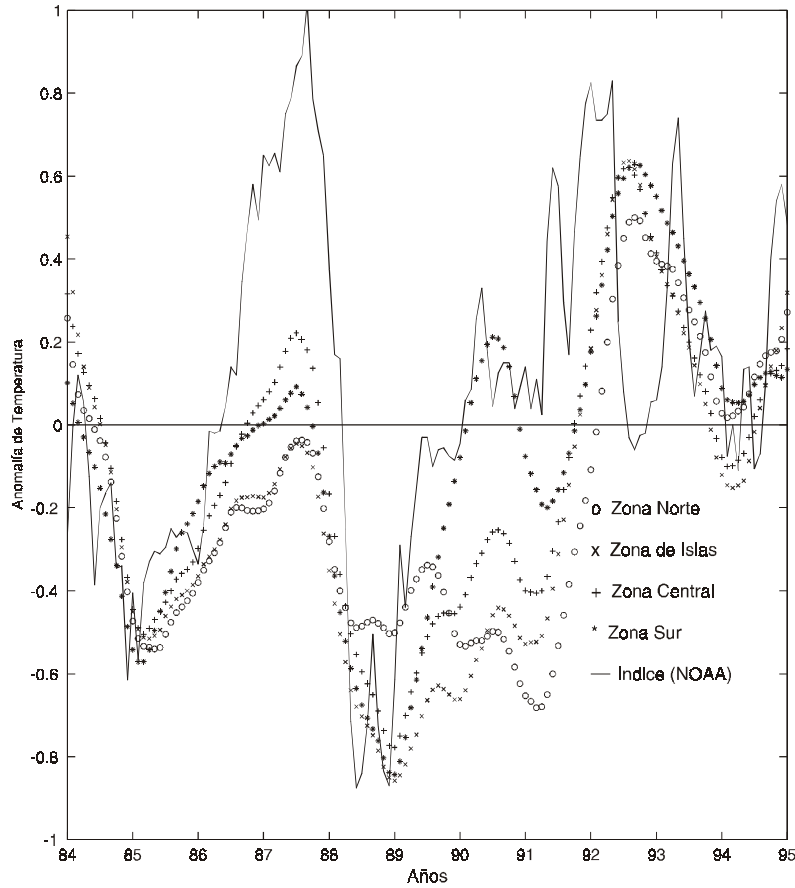


Figura 8. Serie temporal de anomalías de la temperatura superficial del mar para las cuatro regiones del Golfo de California y el índice de anomalías de la temperatura superficial en la región 5°N–5°S, 150°W–90°W, del Centro de Predicción del Clima de la NOAA.

Figure 8. Time series of sea surface temperature anomalies for the four regions of the Gulf of California and the index of surface temperature anomalies for the region 5°N–5°S, 150°W–90°W, from the Climate Prediction Center of NOAA.

enfriarse a mediados de 1988. En el evento caliente de 1992–1993 las cuatro regiones están en fase. Los eventos anómalos encontrados en T'_i siguen el mismo patrón que el índice de El Niño dado por el Centro de Predicción del Clima de la NOAA.

La figura 9a muestra la estructura espacial de anomalías interanuales del evento cálido de 1987.

there is a simultaneous anomalous signal in the mouth and island regions. From February, the signal propagates from the mouth as a latitudinal front, with the greatest amplitudes on the mainland and intensifies in the island region. At the end of 1988, the anomalous signal intensifies and extends towards the island region, reaching its maximum in December 1988 and January 1989.

Se observa desde el comienzo de este evento (enero), la presencia de anomalías positivas en la región central. Para la fase madura (agosto) se desarrolla un frente meridional atrapado a la costa, extendido a lo largo del continente con amplitudes máximas en la zona central; su fase de decaimiento es brusca (~3 meses) en comparación con su etapa de crecimiento (~6 meses). Note que este evento anómalo no se propaga hacia la región norte, como los eventos cálidos de mayor intensidad.

En la figura 9b se muestran los campos espaciales de anomalías interanuales, que permiten ver la fase inicial (enero) y la madura (diciembre) del evento frío de 1988–1989. A partir de enero de 1988 se observa la señal anómala simultáneamente en la región de la boca e islas. Desde febrero la señal se propaga de la boca como un frente latitudinal, con las mayores amplitudes en el continente, intensificándose en la región de las islas. A fines de 1988 la señal anómala se intensifica y se extiende hasta la región de las islas, alcanzando su máximo en diciembre de 1988 y enero de 1989. La característica más importante de esta señal es que durante toda su evolución, la región de las islas y la boca permanecen más frías que el resto del golfo. La fase final de esta señal fría aparece a partir de febrero de 1989 como un frente latitudinal que se propaga hacia la boca y con una cierta tendencia a propagarse hacia la península sur desde junio a noviembre.

La figura 9c muestra la evolución espacial y temporal de anomalías positivas durante la fase inicial (enero) y la madura (junio) durante 1990, donde se observa que esta anomalía sólo ingresa hasta la región central, mientras que los eventos de 1988–1989 y 1992–1993 sí penetran hasta la cabeza.

La figura 9d muestra los campos espaciales de anomalías correspondientes a los meses de noviembre de 1991, marzo y junio de 1992, respectivamente. El mes de noviembre de 1991 se podría señalar como el principio del evento de 1992–1993, con la presencia de anomalías positivas en las zonas de las islas y de la boca del lado continental. De noviembre en adelante, se observa

The most important characteristic of this signal is that during its entire evolution, the island and mouth regions are colder than the rest of the gulf. The final phase of this cold signal appears in February 1989 as a latitudinal front that propagates towards the mouth, and from June to November, it tends to propagate towards the southern peninsula.

Figure 9c shows the spatial and temporal evolution of positive anomalies during the initial (January) and mature (June) phases in 1990. It can be observed that this anomaly only reaches the central region, whereas the 1988–1989 and 1992–1993 events reach the head.

Figure 9d shows the spatial anomaly fields corresponding to November 1991, March and June 1992, respectively. November 1991 could indicate the beginning of the 1992–1993 event, with the presence of positive anomalies in the island and mouth regions along the mainland. From November onwards, there is a positive anomaly gradient that propagates trapped to the coast along the mainland, up to the island region, where it intensifies. This signal is more marked during March and June 1992, and in summer it already covers the entire gulf. An interesting point regarding this event is that the anomalous signal reaches the northern region in March 1992 before the mature phase that we recorded in June 1992. Finally, this event retreats as a latitudinal front.

A repetition of the analysis of the interannual anomaly (T'_i) was conducted excluding El Niño years from the calculation of the climatology (T_m) and from the total average (T_T). The same trends as those observed in figures 7 and 8 were found, the only difference being a slight increase in the amplitudes. In other words, whether or not the anomalous years are included in this 14-year series does not produce significant differences in the patterns described.

Lastly, the strongest warm events (1987 and 1992–1993) associated with the ENSO phenomenon show different behaviors: in the first one a signal appears in the south and propagates towards the interior of the gulf, and in the second

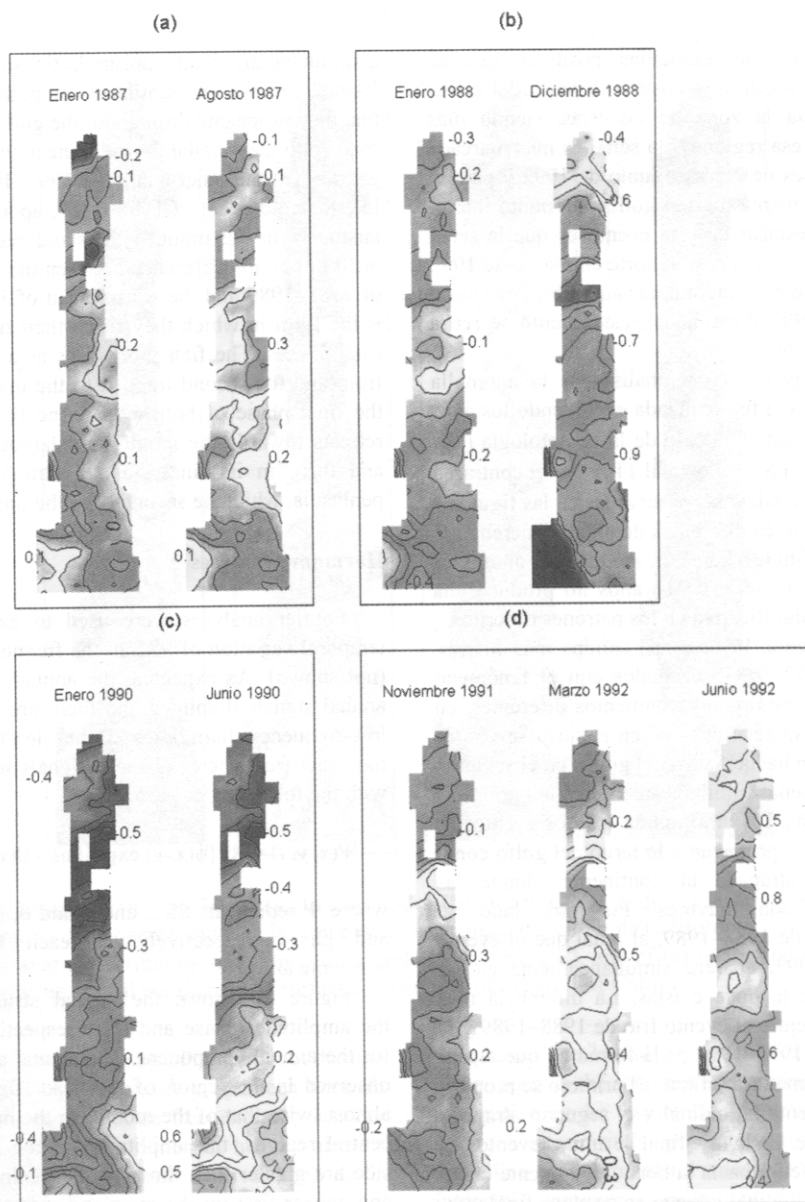


Figura 9. Estructura espacial de anomalías interanuales de la temperatura superficial del mar durante (a) 1987, (b) 1988, (c) 1990 y (d) 1991–1992. El intervalo de contornos es de 0.1°C.

Figure 9. Spatial structure of the interannual anomalies of sea surface temperature during (a) 1987, (b) 1988, (c) 1990 and (d) 1991–1992. The contour interval is 0.1°C.

un gradiente de anomalías positivas que se propaga atrapado a la costa a lo largo del continente, hasta la zona de las islas, siendo más intensa en esa región. Esta señal es más marcada en los meses de marzo a junio de 1992 y para el verano ya abarca todo el golfo. Un punto interesante de destacar de este evento es que la señal anómala llega a la región norte en marzo de 1992 antes de la etapa madura, que aquí ubicamos hasta junio de 1992. Finalmente, este evento se retira como un frente latitudinal.

Una repetición del análisis de la anomalía interanual (T') fue realizada excluyendo los años Niños tanto en el cálculo de la climatología (T_m) como en el promedio total (T_T). Se encontraron las mismas tendencias observadas en las figuras 7 y 8, con la única diferencia de un leve incremento en las amplitudes. Es decir, incluir o no años anómalos en esta serie de 14 años no produce una diferencia significativa en los patrones descritos.

Finalmente, los eventos cálidos más fuertes, 1987 y 1992–1993, asociados con el fenómeno ENOA muestran comportamientos diferentes: en el primero aparece la señal en el sur y se ve una propagación hacia dentro del golfo; en el segundo aparece la señal simultáneamente en la región sur y en las islas. La similitud en los dos eventos es que ambas se propagan a lo largo del golfo como una señal atrapada al continente, donde las amplitudes son mayores. Por otro lado, el evento frío de 1988–1989, al igual que el evento de 1992–1993, aparece simultáneamente en las regiones de la boca e islas. La diferencia más importante entre el evento frío de 1988–1989 y el caliente de 1992–1993 es la forma en que alcanzan su fase madura y final. El primero se propaga como un frente latitudinal y el segundo atrapado al continente. En la fase final de ambos eventos, el primero se retira hacia la boca inicialmente como un frente latitudinal y luego en su etapa final atrapado a la península, mientras que el segundo lo hace al revés.

Análisis armónico

Se usó el análisis de Fourier para explorar la variación temporal de la TSM en el espacio de

a simultaneous signal appears in the southern and island regions. The similarity of both events is that they propagate throughout the gulf as a signal trapped to the mainland, where the amplitudes are greater. On the other hand, the 1992–1993 event, like the cold event of 1988–1989, appears simultaneously in the mouth and island regions. The most important difference between the cold event of 1988–1989 and the warm event of 1992–1993 is the form in which they reach their mature and final phases. The first propagates as a latitudinal front and the second trapped to the mainland. In the final phase of both events, the first initially retreats towards the mouth as a latitudinal front and then, in its final stage, is trapped to the peninsula, while the second does the opposite.

Harmonic analyses

Fourier analyses were used to explore the temporal variation of SST in the frequency space (not shown). As expected, the annual and semi-annual signals dominate and there are important low-frequency harmonics. Using least squares, the exact frequencies of these signals were fitted with the following equation:

$$\Psi(x, y, t) = \text{Re}\{\phi(x, y) \exp(i[\omega t - \theta(x, y)])\}$$

where Ψ represents SST, and ϕ and θ , amplitude and phase, respectively, of each frequency harmonic ω .

Figure 10 shows the spatial structures of the amplitude, phase and their respective errors for the annual component. The annual amplitude observed in the region of the head (fig. 10a) is almost twice that of the mouth. In the mouth and central regions, the amplitudes of the mainland side are greater than those of the peninsula side and appear first on the mainland side (fig. 10c). The error of the amplitude (fig. 10b) increases from the mouth towards the head, with a relative maximum in the island region. In the northern region, there is one closed nucleus, denoting the presence of a well-defined seasonal eddy. For the island region, there is a slight decrease in the amplitudes (0.1°C), contrary to that produced in

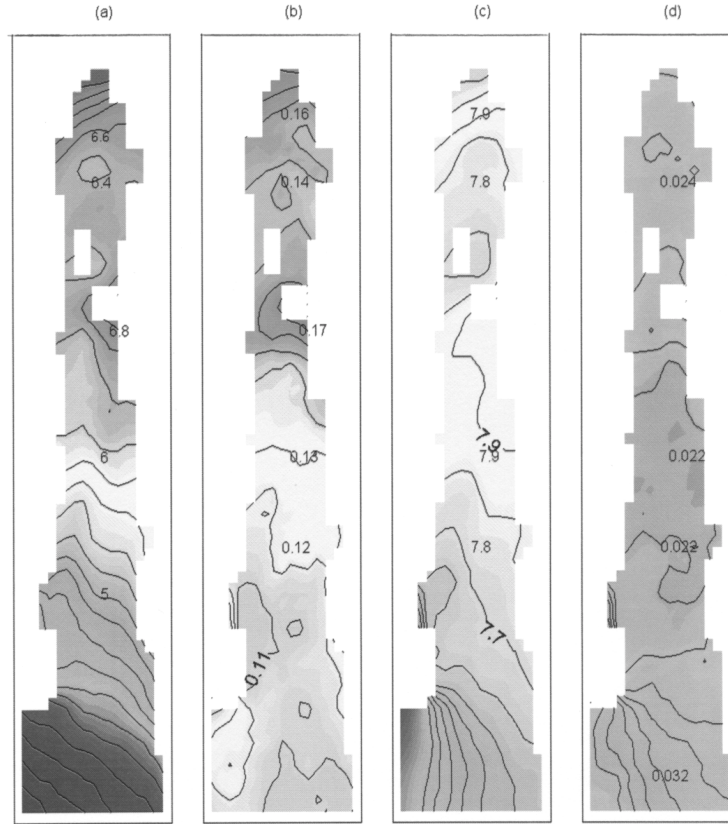


Figura 10. Distribución espacial de **(a)** la amplitud y **(b)** su error (°C), y de **(c)** la fase y **(d)** su error (meses), para la componente anual de la temperatura superficial del Golfo de California.

Figure 10. Spatial distribution of **(a)** amplitude and **(b)** its error (°C), and of **(c)** phase and **(d)** its error (months), for the annual component of surface temperature of the Gulf of California.

frecuencias (no se muestra). Por supuesto, domina la señal anual y semianual, y aparecen también armónicos importantes de frecuencias bajas. Por medio de cuadrados mínimos, se hizo un ajuste a las frecuencias exactas de estas señales de la siguiente forma:

$$\Psi(x, y, t) = \text{Re}\{\phi(x, y) \exp(i[\omega t - \theta(x, y)])\}$$

donde Ψ representa la TSM, y ϕ y θ la amplitud y fase, respectivamente, de cada armónico de frecuencia ω .

the phase. The lateral asymmetry of the amplitudes found in the southern and central regions of the gulf may be explained by upwelling; the strong winter winds generate intense coastal upwelling on the mainland side, whereas the low intensity summer winds produce coastal upwelling of a lower magnitude on the peninsula side. Figure 10d presents the errors associated with the annual phase, and shows that this value is similar in almost all the gulf, except in the central region where it is lower. Lastly, the spatial structure of the annual amplitude is similar to that of the standard deviation (see fig. 4).

La figura 10 muestra las estructuras espaciales de la amplitud, fase y sus respectivos errores para la componente anual. Se observa que en la zona de la cabeza, la amplitud anual (fig. 10a) es aproximadamente el doble de la boca. En las zonas de la boca y central, las amplitudes del lado del continente son mayores que del lado de la península y aparecen primero en el lado del continente (fig. 10c). El error de la amplitud (fig. 10b) crece desde la boca hacia la cabeza con un máximo relativo en la región de las islas. En la zona norte, se observa la estructura de un núcleo cerrado, denotando con ello la presencia de un giro estacional bien definido. Para la zona de las islas, se produce un leve descenso de las amplitudes (0.1°C), al contrario de lo que se produce en la fase. La asimetría lateral de las amplitudes encontradas en las regiones sur y central del golfo es posiblemente explicable desde el punto de vista de las surgencias; los fuertes vientos de invierno generan surgencias costeras intensas en el lado del continente, en cambio, los vientos de verano de menor intensidad provocan surgencias costeras de menor magnitud por el lado de la península. La figura 10d presenta los errores asociados con la fase anual, observándose que su valor es similar en casi todo el golfo con excepción de la región central, donde es menor. Finalmente, la estructura espacial de la amplitud anual es similar a la de la desviación estándar (ver fig. 4).

Para la componente semianual (no se muestra), se encuentra que la amplitud es mucho menor que la amplitud de la señal anual. Igual que la componente anual, la amplitud en la cabeza es el doble que en la boca. Sin embargo, las amplitudes en la zona de la boca y central son menores en el continente que en la península, y en la zona de las islas se produce un leve aumento de las amplitudes y una disminución en sus fases. Tanto en la amplitud anual como en la semianual, la parte central de la cuenca norte se caracteriza por tener una disminución en sus amplitudes. En la zona sur y central, la propagación de ambas señales es completamente diferente; por un lado la señal semianual es aproximadamente meridional (con las máximas amplitudes en la península), en

The amplitude of the semiannual component (not shown) is much lower than the amplitude of the annual signal. Similar to the annual component, the amplitude at the head is double that at the mouth. However, the amplitudes of the mouth and central regions are lower along the mainland than along the peninsula, and in the island region there is a slight increase in the amplitudes and a decrease in their phases. In both the annual and semiannual amplitudes, the central region of the northern basin is characterized by a decrease in amplitude. In the southern and central regions, the propagation of both signals is completely different; the semiannual signal is almost southerly (with the maximum amplitudes on the peninsula), whereas the variation of the annual signal is almost latitudinal.

The Fourier spectra indicate that the interannual signal occurs in an interval of approximately 18 to 54 months. Figure 11 shows the amplitude, phase and error associated with the 38-month harmonic (the Fourier harmonic of greatest amplitude). The greatest amplitudes (fig. 11a) are found along the mainland as a southern front trapped to this side of the island region. Furthermore, the amplitudes of the island region are the same as the mainland and mouth. This behavior is similar to that observed in the variations of the interannual anomalies.

In order to synthesize the information, the amplitude and phase of the different harmonics were laterally averaged throughout the gulf. Figures 12a and b show these averages for the annual component, and it is observed that the amplitude and phase are lowest in the mouth and greatest in the head, with a difference of $\sim 3.5^{\circ}\text{C}$ and 1.1 months, respectively. Note that there is a relative maximum in the area off the islands that interrupts the monotonic increase towards the north.

Figure 12c shows the 38-month harmonic, which demonstrates more clearly the variability in amplitude throughout the gulf. The greatest amplitude was observed at the islands with respect to the rest of the gulf; however, the error associated with the component indicates a

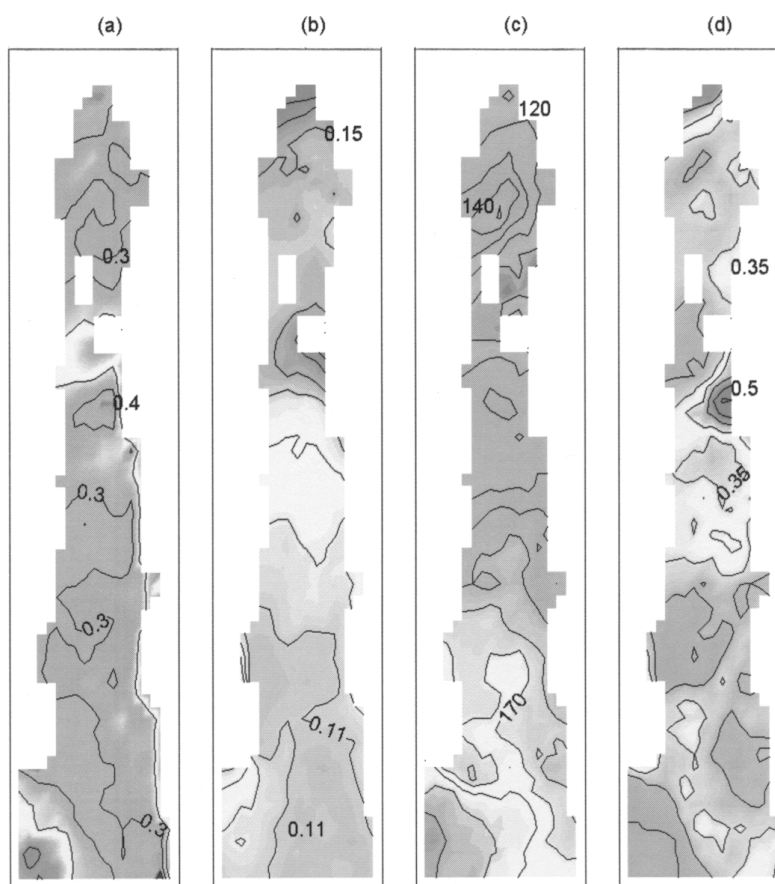


Figura 11. Distribución espacial de (a) la amplitud y (b) su error ($^{\circ}\text{C}$), y de (c) la fase y (d) su error (meses), para la componente interanual de la temperatura superficial del Golfo de California.

Figure 11. Spatial distribution of (a) amplitude and (b) its error ($^{\circ}\text{C}$), and of (c) phase and (d) its error (months), for the interannual component of surface temperature of the Gulf of California.

cambio la variación de la señal anual es casi latitudinal.

Para la señal interanual, notamos en los espectros de Fourier que ésta existe en un intervalo aproximado de 18 a 54 meses. En la figura 11 se muestra la amplitud, fase y el error asociado con el armónico de 38 meses (el armónico de Fourier de mayor amplitud). Las mayores amplitudes (fig. 11a) se encuentran a lo largo del continente como un frente meridional atrapado de ese lado hasta la zona de las islas. Se observa, además, que en la

simultaneous warming throughout the gulf, since the amplitudes are not significantly different. The phase of the interannual signal (fig. 12d) shows that it decreases from the mouth region towards the head, with a relative minimum in the island region.

In summary, the harmonic analyses clearly show the presence of semiannual, annual and interannual signals. The percentage of variance explained by each one of these harmonics throughout the gulf are, on average,

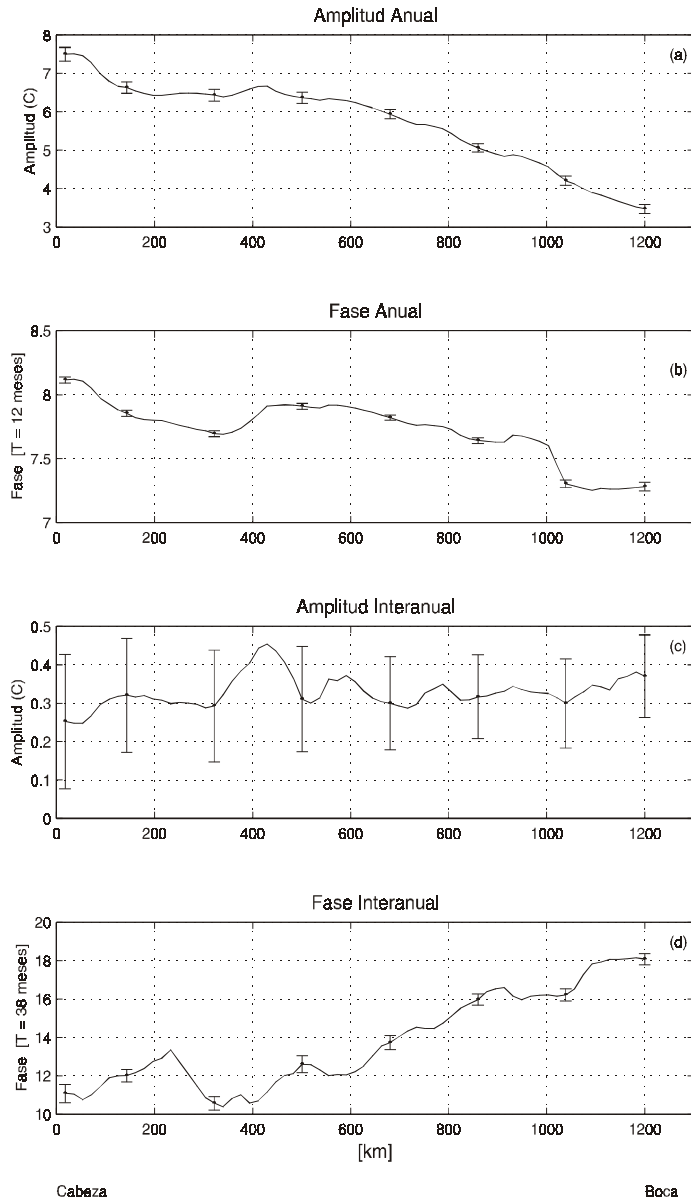


Figura 12. Promedio transversal de la (a) amplitud y (b) fase anual, y de la (c) amplitud y (d) fase interanual.

Figure 12. Lateral average of (a) amplitude and (b) annual phase, and of (c) amplitude and (d) inter-annual phase.

Tabla 1. Distribución de la varianza total contenida en la serie de datos mensuales.**Table 1.** Distribution of the total variance contained in the series of monthly data.

Modo No.	Individual (%)	Acumulado (%)
1	96.6	96.6
2	1.9	98.5

región de las islas, las amplitudes son del mismo orden que en el continente y la boca. Este comportamiento es similar al encontrado en las variaciones de las anomalías interanuales.

Para sintetizar la información, se promedió lateralmente la amplitud y fase de los diferentes armónicos a lo largo del golfo. Las figuras 12a y b muestran estos promedios para la componente anual, donde se observa que la amplitud y fase son mínimas en la boca y máximas en la cabeza, con una diferencia de $\sim 3.5^\circ\text{C}$ y 1.1 meses, respectivamente. Note que en la zona adyacente a las islas, ocurre un máximo relativo que interrumpe el monótono incremento hacia el norte.

En la figura 12c se muestra el armónico de 38 meses, el cual permite observar con mayor claridad la variabilidad de la amplitud a lo largo del golfo. Destaca la mayor amplitud en las islas con respecto al resto del golfo; sin embargo, el error asociado con esta componente indica que todo el golfo se calienta en forma simultánea, pues las amplitudes a lo largo del golfo no son significativamente diferentes. La fase de la señal interanual (fig. 12d) muestra que ésta disminuye desde la región de la boca hacia la cabeza, con un mínimo relativo en la región de las islas.

En resumen, a partir de los análisis armónicos obtenemos la evidencia clara de la presencia de señales semianual, anual e interanual. El porcentaje de varianza explicado por cada uno de estos armónicos, en promedio en todo el golfo, son aproximadamente de 2%, 90% y 0.5%, respectivamente. Otro punto interesante es la aparición de un máximo relativo de estas señales en la región de las islas, las cuales fueron detectadas en la climatología y en las de anomalías interanuales.

approximately 2%, 90% and 0.5%, respectively. Another interesting point is the appearance of a relative maximum of these signals in the island region, which was detected in the climatology and in the interannual anomalies.

Empirical orthogonal functions

Another way of extracting the spatial structure and temporal variability of the surface temperature field is using empirical orthogonal functions (EOFs), whose application only depends on statistical considerations (Barnett and Patzer, 1980; Kelly, 1985). EOFs quantify the total variance of the temperature series in orthogonal modes. In this manner, modes or structures are obtained that contain the greatest percentage of variance, and probably represent the dominant temperature signals in the study area; the contributions associated with other types of processes or scales are left in inferior modes.

The application of EOFs to the monthly sequence of SST images shows the presence of a dominant signal, represented by the first mode that corresponds to the seasonal variation and contains most of the variance, explaining 96.6% of the variability (table 1). Figure 13 shows the spatial and temporal structure of the first and second modes. The first mode has an almost uniform amplitude in space, which implies a simultaneous warming and cooling of the entire gulf (fig. 13a). Also, note the similarity between the temporal structure (fig. 13c, broken line) and that shown in figure 2. The second mode contributes 1.9% of the total variance, and the temporal structure is also annual (fig. 13c, solid line),

Funciones empíricas ortogonales

Otra forma de extraer la estructura espacial y la variabilidad temporal del campo de temperatura superficial es mediante el uso de funciones empíricas ortogonales (FEOs), cuya aplicación sólo depende de consideraciones estadísticas (Barnett y Patzert, 1980; Kelly, 1985). Las FEOs permiten cuantificar la varianza total de las series de temperatura en modos ortogonales o independientes entre sí. De esta manera obtenemos modos o estructuras que contienen el mayor porcentaje de la varianza, y los cuales probablemente representen a las señales de temperaturas dominantes en la región de estudio, quedando en los modos inferiores las contribuciones asociadas con otro tipo de procesos o escalas.

La aplicación de las FEOs a la secuencia mensual de imágenes de TSM muestra la presencia de una señal dominante, representada por el primer modo, que corresponde a la variación estacional y contiene la mayor parte de la varianza explicando el 96.6% de su variabilidad (tabla 1). La figura 13 muestra la estructura espacial y temporal del primer y segundo modo. El primer modo tiene una amplitud casi uniforme en el espacio, lo que implica un calentamiento y enfriamiento simultáneo de todo el golfo (fig. 13a). Note además, la similitud de estructura temporal (fig. 13c en línea segmentada) con la mostrada en la figura 2. El segundo modo contribuye con el 1.9% de la varianza total, y la estructura temporal es también anual (fig. 13c en línea sólida), pero desfasado aproximadamente 4 meses con respecto al primer modo. Por otro lado, la estructura espacial (fig. 13b) indica que el golfo tiene una oscilación de norte a sur en esta escala.

En resumen, las FEOs de los datos mensuales muestran en ambos modos la influencia de la escala anual, con la única diferencia que el primero describe un calentamiento-enfriamiento uniforme en todo el golfo y el segundo muestra un comportamiento oscilante.

Para obtener información de escalas interanuales se calculan las FEOs a los datos filtrados,

but out-of-phase by about 4 months with respect to the first mode. On the other hand, the spatial structure (fig. 13b) indicates that the gulf has a north-south oscillation on this scale.

In summary, EOFs of the monthly data show the influence of the annual scale in both modes. The only difference is that the first describes a uniform warming-cooling in the entire gulf and the second an oscillating behavior.

In order to obtain information on interannual scales, EOFs were calculated to the filtered data, i.e., T'_i . Table 2 presents the contribution of the first three modes to the variance.

Figure 14 shows the spatial and temporal structure of the three first modes. The temporal structure (fig. 14d, broken lines with dots), which modulates the spatial pattern (fig. 14a), clearly represents the behavior of the interannual events that occurred from 1984 to 1995. The greatest amplitudes occur in the mature phase of the cold event (1988–1989) and in the decline phase of the El Niño (1992–1993). The presence of these anomalous events had already been detected in the analysis of the interannual anomaly field. Note that the temporal evolution of this mode is the same as that shown in figure 8. The spatial structure is almost homogenous from the mouth to the island region and then decreases slightly. The temporal evolution of SST associated with this mode also indicates a simultaneous warming and cooling in the entire gulf and coincides with the results of the harmonic analyses.

The spatial structure corresponding to the second mode shows a north-south oscillation (fig. 14b). The temporal structure (fig. 14d, broken line), which modulates the spatial structure, indicates that maximum oscillation occurs in 1990, but at a lower amplitude than the events of mode one. Note that this maximum is associated with the occurrence of a positive anomaly that only reached part of the central region (see fig. 9c).

The third mode has a richer spatial structure along the gulf (fig. 14c). The temporal structure (fig. 14d, solid line) indicates that the maximum

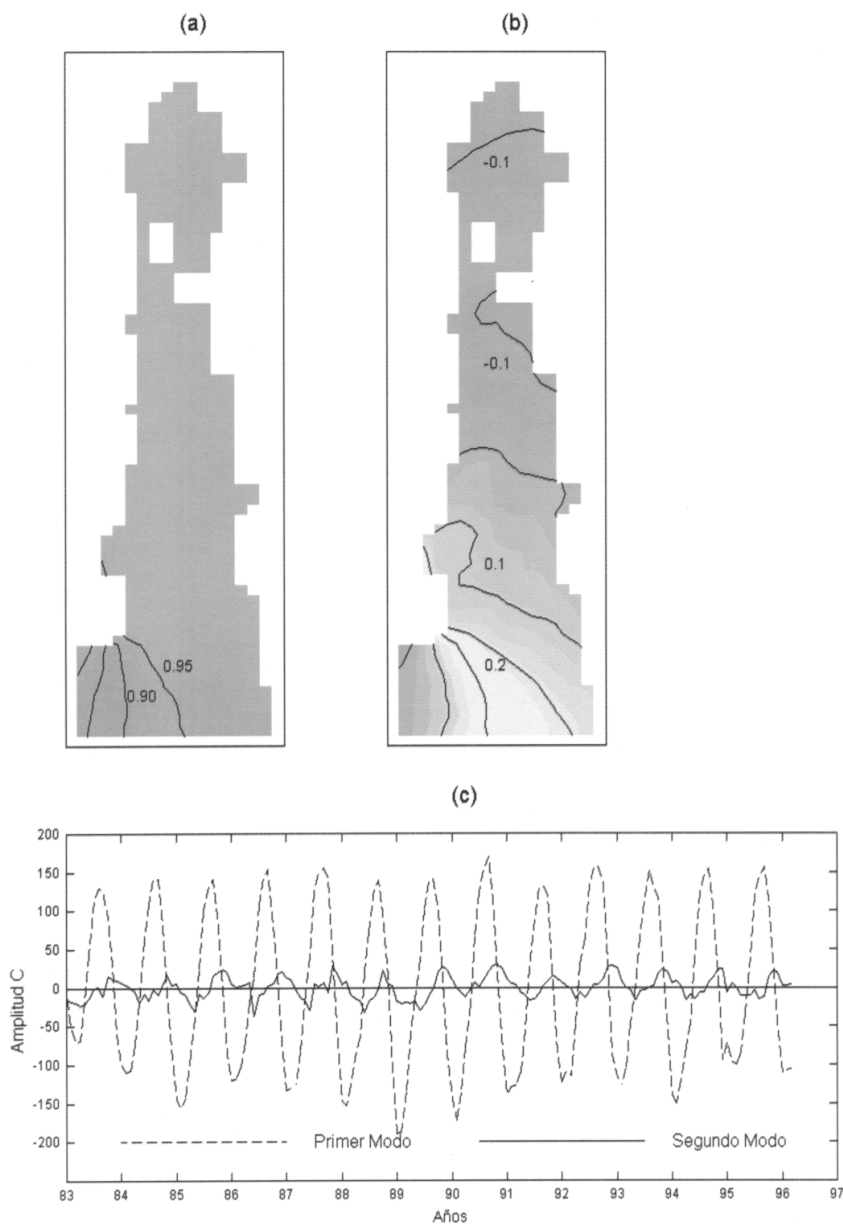


Figura 13. Funciones empíricas ortogonales del promedio mensual de la temperatura superficial del Golfo de California; (a) y (b) muestran la estructura espacial de los dos primeros modos y (c) la estructura temporal de ellos.

Figure 13. Empirical orthogonal functions of the monthly average of surface temperature of the Gulf of California; (a) and (b) show the spatial structure of the first two modes and (c) their temporal structure.

Tabla 2. Distribución de la varianza total contenida en la serie de datos filtrados.

Table 2. Distribution of the total variance contained in the series of filtered data.

Modo No.	Individual (%)	Acumulado (%)
1	82.2	82.2
2	11.0	93.2
3	2.4	95.6

es decir, T'_i . La tabla 2 presenta la contribución a la varianza de los tres primeros modos.

La figura 14 presenta la estructura espacial y temporal de los tres primeros modos. La estructura temporal (fig. 14d en línea segmentada con puntos), que modula el patrón espacial (fig. 14a), representa claramente el comportamiento de los eventos interanuales ocurridos durante el periodo de 1984 a 1995. Las amplitudes mayores se presentan en los eventos asociados con la fase madura y de decaimiento del evento frío (1988–1989) y de El Niño (1992–1993), respectivamente. La presencia de estos eventos anómalos ya había sido detectado en el análisis del campo de anomalías interanuales. Note que la evolución temporal de este modo es igual al mostrado en la figura 8. La estructura espacial es casi homogénea desde la zona de la boca hasta las islas y después disminuye un poco. La evolución temporal de la TSM asociada con este modo nos indica también un calentamiento y enfriamiento simultáneo en todo el golfo y coincide con los resultados del análisis armónico.

La estructura espacial correspondiente al segundo modo muestra una oscilación de norte a sur (fig. 14b). La estructura temporal (fig. 14d en línea segmentada), que modula la estructura espacial, indica que la máxima oscilación ocurre en el año de 1990, aunque de menor amplitud que los eventos del modo uno. Note que este máximo está asociado con la entrada de una anomalía positiva que sólo ingresó hasta parte de la región central (ver fig. 9c).

fluctuations between the northern basin and the islands are produced in the decline phase of the cold event (1988–1989) and in the mature phase of the warm event (1992–1993).

In summary, the variability of the spatial structure of the interannual signal is shown in three different forms: a uniform warming-cooling of the entire gulf, a north-south oscillation and as an oscillation that transforms from concave to convex.

CONCLUSIONS

The Gulf of California was divided into four regions in order to obtain a more detailed description of the variability of surface temperature. The dominance of an annual signal was detected in the temporal evolution of SST in the four regions, with a clear difference in amplitude from north to south.

Average SST was observed to decrease towards the head of the gulf and its variability increased, with the annual scale being responsible for most of this variability. Two oscillation modes describe this signal: one in phase throughout the gulf and another, of lower amplitude, with a north-south oscillation.

The analysis of the satellite images suggests a permanent eddy system in the northern region of the gulf. In this region, there is an evolution and formation of warm nuclei in winter, associated with anticyclonic eddies, and cold ones in

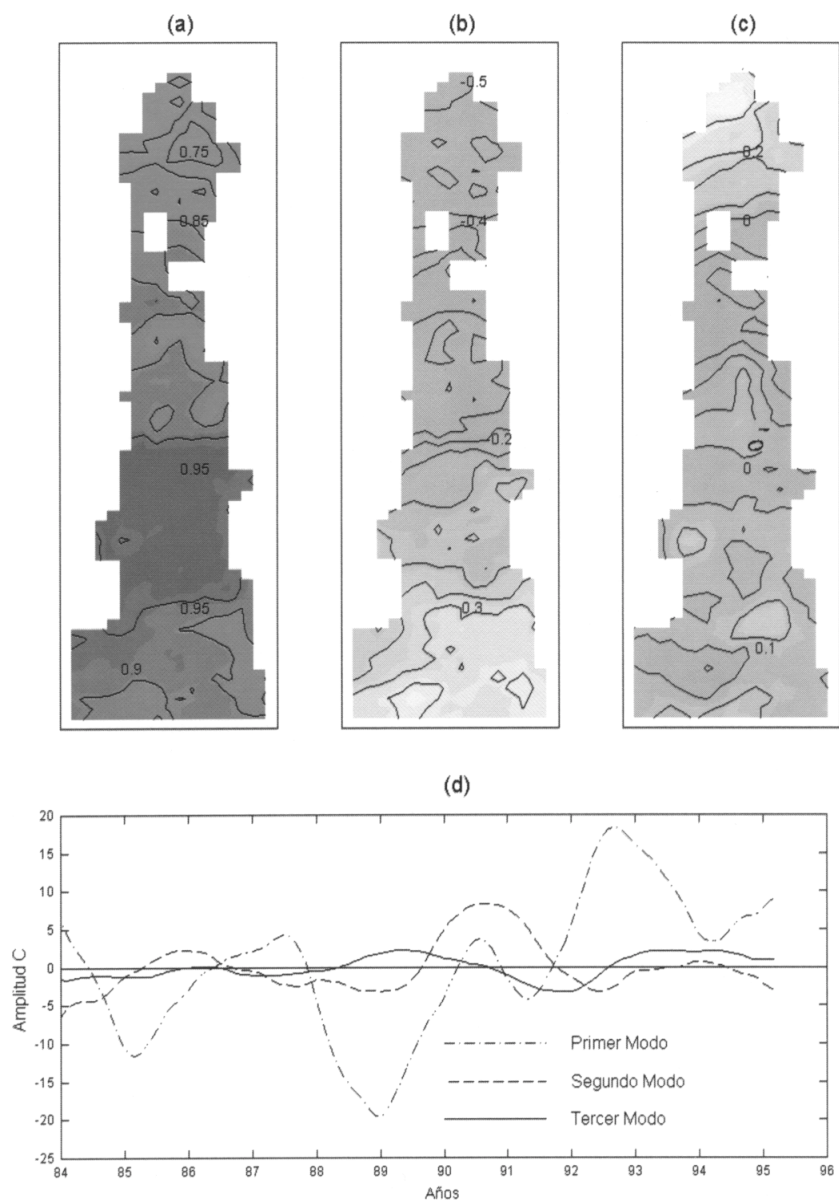


Figura 14. Funciones empíricas ortogonales de las anomalías interanuales de la temperatura superficial del mar del Golfo de California; **(a)**, **(b)** y **(c)** muestran la estructura espacial de los tres primeros modos y **(d)** la estructura temporal de ellos.

Figure 14. Empirical orthogonal functions of the interannual anomalies of sea surface temperature of the Gulf of California; **(a)**, **(b)** and **(c)** show the spatial structure of the first three modes and **(d)** their temporal structure.

El tercer modo tiene una estructura espacial a lo largo del golfo más rica (fig. 14c). La estructura temporal (fig. 14d en línea sólida) indica que las máximas fluctuaciones entre la cuenca norte e islas se producen en la fase de decaimiento del evento frío (1988–1989) y en la fase madura del evento caliente (1992–1993).

En resumen, la variabilidad de la estructura espacial de la señal interanual se presenta de tres formas diferentes: como un calentamiento-enfriamiento uniforme de todo el golfo, como una oscilación de norte a sur y como una oscilación que pasa de cóncava a convexa.

CONCLUSIONES

Para analizar con más detalle la variabilidad de la temperatura superficial del Golfo de California, se le dividió en cuatro regiones. En la evolución temporal de la TSM de las cuatro regiones se detectó la dominancia de la señal anual, con una evidente diferencia de amplitud de norte a sur.

Se encontró que el promedio de TSM disminuye hacia la cabeza del golfo y su variabilidad aumenta, siendo la escala anual la responsable de la mayor parte de esta variabilidad. Dos modos de oscilación describen esta señal: uno en fase en todo el golfo y otro, de menor amplitud, con una oscilación de norte a sur.

El análisis de las imágenes de satélite sugiere un carácter permanente del sistema de giros en la región norte del golfo. En esta región se observa la evolución y formación de núcleos cálidos en invierno asociados con giros anticiclónicos y fríos en verano asociados con giros ciclónicos. La época de transición muestra un giro ciclónico en primavera.

La estructura lateral de la TSM en la región central y sur muestra amplitudes diferentes lo cual puede estar asociado con procesos de surgencias, con amplitudes mayores durante invierno en el lado continental.

La escala semianual presenta una estructura espacial igual que la componente anual, esto es, aumenta hacia la cabeza.

En la escala interanual se detectaron eventos

summer, associated with cyclonic eddies. The transition season shows a cyclonic eddy in spring.

The lateral structure of SST in the central and southern regions shows different amplitudes that can be associated to upwelling processes of greater amplitudes during winter on the mainland side.

The semiannual scale shows a spatial structure similar to the annual component, i.e., it increases towards the head.

Events associated with El Niño were detected on the interannual scale. The analysis conducted showed two types of behavior or modes in the evolution of interannual anomalies: first, a clear invasion of warm waters from the mouth up to the central region and second, a simultaneous warming in the mouth and island regions. In this last mode, the invasion of warm waters reaches the northern region. The island region shows an intensification of the cold and warm events in the interannual scale, in addition to being the coldest region in general.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work received financial support from CICESE and from CONACYT project 4300P-T to S.G. Marinone. Luis Soto thanks the Secretaría de Relaciones Exteriores for a scholarship. We thank Emilio Beier and Miguel Lavín for their comments on the first version of the manuscript.

English translation by Jennifer Davis.

asociados con El Niño. Los análisis realizados mostraron dos tipos de comportamiento o modos en la evolución de anomalías interanuales: primero, una clara invasión de aguas cálidas de la boca hasta la región central y segundo, un calentamiento simultáneo en la región de la boca e islas. En este último modo, la invasión de aguas cálidas llega hasta la región norte. La región de las islas muestra una intensificación de los eventos fríos y calientes en la escala interanual, además de ser la zona más fría en general.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue elaborado con el presupuesto normal de CICESE y del proyecto 4300P-T de CONACYT de S.G. Marinone. Luis Soto agradece a la Secretaría de Relaciones Exteriores una beca otorgada a él. Agradecemos a Emilio Beier y Miguel Lavín sus valiosos comentarios a la primera versión del manuscrito.

REFERENCIAS

- Álvarez-Borrego, S. and Schwartzlose, S.R. (1979). Water masses of the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 6: 43–63.
- Argote, M.L., Amador, A. y Morales, C. (1985). Variación estacional de la estratificación en la región norte del Golfo de California. En: J. Urrutia-Fucugauchi y J.F. Valdés-Galindo (eds.), *Memoria de la Reunión Anual 1985, Unión Geofísica Mexicana*, México, DF, 437 pp.
- Barnett, T.P. and Patzert, W.C. (1980). Scales of thermal variability in the tropical Pacific. *J. Geophys. Res.*, 10: 529–540.
- Baumgartner, T.R. and Christensen, N. Jr. (1985). Coupling of the Gulf of California to large-scale interannual climatic variability. *J. Mar. Res.*, 43: 825–848.
- Beier, E. (1997). A numerical of the annual variability in the Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 27: 615–632.
- Beier, E. and Ripa, P. (1998). Seasonal gyres in the northern Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 29: 305–311.
- Bray, N.A. (1988). Thermohaline circulation in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 93: 4993–5020.
- Bray, N.A. and Robles, J.M. (1991). Physical oceanography of the Gulf of California. Invited review paper, Part V, Chap. 25. In: J.P. Douphin and B.R. Simoneit (eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. Am. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa, Oklahoma. *Memoir* 47, pp. 511–553.
- Carrillo-Briebezca, L. (1996). Circulación geostrofica en la región norte del Golfo de California. Tesis de maestría, CICESE, Ensenada, Baja California, México, 64 pp.
- Kelly, K.A. (1985). The influence of winds and topography on the surface temperature patterns over the northern California slope. *J. Geophys. Res.*, 90: 11,783–11,798.
- Lavín, M.F. and Organista, S. (1988). Surface heat flux in the northern Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 93: 14,033–14,038.
- Lavín, M.F., Durazo, R., Palacios, E., Argote, M.L. and Carrillo, L. (1997a). Lagrangian observations of the circulation in the northern Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 27: 2298–2305.
- Lavín, M.F., Beier, E. y Badan, A. (1997b). Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. En: M.F. Lavín (ed.), *Monografía No. 3, Unión Geofísica Mexicana*, pp. 141–172.
- Marinone, S.G. and Ripa, P. (1988). Geostrophic flow in the Guaymas Basin, central Gulf of California. *Cont. Shelf Res.*, 8: 159–166.
- Paden, C.A., Abbott, M.R. and Winant, C.D. (1991). Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California. Part I. Sea surface temperature variability. *J. Geophys. Res.*, 96: 18,337–18,359.
- Ripa, P. (1990). Seasonal circulation in the Gulf of California. *Ann. Geophys.*, 8: 559–564.
- Ripa, P. (1997). Towards a physical explanation of the seasonal dynamics and thermodynamics of the Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 27: 597–614.
- Ripa, P. and Marinone, S.G. (1989). Seasonal variability of temperature, salinity, velocity, vorticity and sea level in the central Gulf of California, as inferred from historical data. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 115: 887–913.
- Robles, J.M. and Marinone, S.G. (1987). Seasonal and interannual thermohaline variability in the Guaymas Basin in the Gulf of California. *Cont. Shelf Res.*, 7: 715–733.
- Roden, G.I. (1958). Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pac. Sci.*, 12: 21–45.
- Roden, G.I. (1964). Oceanographic aspects of the Gulf of California. In: Tj.H. Van Andel and G.G. Shor Jr. (eds.), *Marine Geology in the Gulf California*. *Mem. Am. Petrol. Geol.*, 3: 30–58.
- Roden, G.I. (1972). Thermohaline structure and baroclinic flow across the Gulf of California entrance and in the Revillagigedo Islands region. I. *J. Phys. Oceanogr.*, 2: 117–183.
- Roden, G.I. and Groves, G.W. (1959). Recent oceanographic investigations in the Gulf of California. *J. Mar. Res.*, 18: 10–35.

- Romero-Centeno, R. (1995). Comportamiento de los campos hidrográficos y flujos de calor y masa en el Canal de Ballenas. Tesis de maestría, CICESE, Ensenada, Baja California, México, 126 pp.
- Rosas-Cota, A. (1976). Corrientes geostróficas en el Golfo de California en la superficie y a 200 m durante estaciones de invierno y verano. *CalCOFI Rep.*, 19: 89–106.
- Soto, L. (1997). Variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California. Tesis de maestría, CICESE, Ensenada, Baja California, México, 108 pp.
- Strub, P.T., Allen, J.S., Huyer, A., Smith, R.L. and Beardsley, R.C. (1987). Large-scale structure of the spring transition in the coastal ocean off western North America. *J. Geophys. Res.*, 92: 1527–1544.
- Sverdrup, H.U. (1941). The Gulf of California: preliminary discussion on the cruise of the E.W. Scripps in February and March 1939. *Proc. 6th Pac. Sci. Congr.*, 3: 161–166.
- Thorade, H. (1909). Über die Kalifornische Meeresströmung. *Hidrog. Marit. Met. Ann.*, 37: 17–34, 63–76.
- Torres, E. (1993). Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California, Tesis de maestría, CICESE, Ensenada, Baja California, México, 80 pp.
- US Hydrographic Office (1947). Atlas of Surface Currents: Northeastern Pacific Ocean, H.O. Publ. 570, US Hydrogr. Office, 12 map, Washington, DC.
- Wyrtki, K. (1966). Oceanography of the Eastern Equatorial Pacific Ocean. *Oceanogr. Mar. Biol. Am. Rev.*, 4: 33–68.