

## Temperaturas superficiales en sitios cercanos a la costa en la Bahía de Antofagasta (Chile) y centros de surgencia adyacentes

### Nearshore surface temperatures in Antofagasta Bay (Chile) and adjacent upwelling centers

A Piñones<sup>1,2</sup>, JC Castilla<sup>1\*</sup>, R. Guíñez<sup>1,3</sup>, JL Largier<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Estación Costera de Investigaciones Marinas y Center for Advanced Studies in Ecology and Biodiversity (CASEB), Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 114-D, Santiago, 6513677, Chile. \* E-mail: jcastill@bio.puc.cl

<sup>2</sup> Center for Coastal Physical Oceanography, Department of Ocean, Earth, and Atmospheric Sciences, Old Dominion University, Crittenton Hall, 768 West 52nd Street, Norfolk, VA 23529, USA.

<sup>3</sup> Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Facultad de Recursos del Mar, Universidad de Antofagasta, Casilla 170, Antofagasta, Chile.

<sup>4</sup> Bodega Marine Laboratory, University of California, Davis, Bodega Bay, CA 94923, USA.

#### Resumen

Se analizaron varios años de registros (1997–2003) de la temperatura superficial del mar a lo largo de la costa de la Bahía de Antofagasta—un sistema de bahía semicerrado en la costa norte de Chile—con el propósito de investigar la naturaleza de un patrón de retención de aguas cálidas dentro de la bahía. Utilizando técnicas de análisis de series de tiempo, fue posible confirmar la presencia permanente de agua más cálida en la bahía. Esta característica particular se encontró en la dirección favorable al viento inmediatamente al norte de Punta Jorgillo, con temperaturas que promediaron 2–3°C más que las temperaturas observadas en los sitios de la costa expuesta de la bahía. Se determinaron patrones temporales y espaciales en la temperatura superficial del mar, los que estuvieron asociados a la variabilidad del viento, como lo indicó la correlación entre los primeros modos de las funciones empíricas ortogonales de la temperatura y el forzante viento. Finalmente se discute la importancia de este patrón de aguas cálidas dentro de la bahía y los gradientes térmicos asociados a este patrón, en términos del potencial rol que podría ejercer en la retención de larvas y otros organismos del plancton.

**Palabras clave:** bahías, surgencia, norte de Chile, “sombra de surgencia”, “trampa de surgencia”, retención larval.

#### Abstract

Several years of sea surface temperature data (1997–2003) for the coast of Antofagasta Bay—a semi-enclosed bay in northern Chile—were analyzed in order to further exploring the nature of a warm-water retention pattern inside the bay. Based on time series techniques, we were able to confirm the persistence of warm water in the bay. This warm feature was found immediately downwind of the upwelling center at Jorgillo Point, where temperatures averaged 2–3°C more than at the exposed upwelling sites outside and the bay. Temporal and spatial patterns in sea surface temperature were determined and showed being well associated with wind variability, indicated by the significant correlation between the first empirical orthogonal function modes of temperature variability and wind forcing. We discuss how the persistence of this warm feature and the thermal gradients or frontal structures associated with it are likely to play an important role in retaining larvae or other planktonic organisms in the bay.

**Key words:** bays, upwelling, northern Chile, “upwelling shadow”, “upwelling trap”, larval retention.

#### Introducción

Las surgencias costeras derivadas del viento se observan a lo largo de muchas costas del mundo. Son fuertes y persistentes en las principales regiones de surgencia frente a costas de latitudes medias de los mayores continentes (e.g., el Sistema de Humboldt frente a las costas de Chile y Perú), y resulta en el enfriamiento y el enriquecimiento del medio ambiente marino, el cual se caracteriza por altos niveles de productividad y biomasa (Fonseca y Farías 1987, Barbieri *et al.* 1995).

El fuerte transporte superficial y la mezcla profunda de plancton pueden influir negativamente en la productividad

#### Introduction

Wind-driven coastal upwelling is observed along many coasts worldwide. It is specifically strong and persistent in the major upwelling regions found off the mid-latitude west coasts of major continents (e.g., the Humboldt System off the coasts of Chile and Peru) and results in cold, nutrient-rich marine environments characterized by high levels of productivity and biomass (Fonseca and Farías 1987, Barbieri *et al.* 1995).

The strong offshore transport of surface waters and deep mixing of plankton may work against the high levels of nutrients and primary production associated with wind forcing

primaria y en los altos niveles de nutrientes en estas regiones de surgencia costera (Largier *et al.* 2006). El transporte superficial remueve plancton de la zona costera, reduciendo las posibilidades de un reclutamiento exitoso de larvas y reduciendo la cantidad de material orgánico particulado (e.g., fitoplancton) disponible para favorecer a los ecosistemas costeros. Este parece ser el caso de los sistemas a lo largo de costas con forma recta y vientos constantes. Sin embargo, las costas de surgencia están caracterizadas por áreas o periodos de refugio, ya sea bahías en las cuales la surgencia es débil o ausente, o periodos de calma en los cuales la surgencia se relaja o se disipa. Estos lugares y estas escalas de tiempo se caracterizan por un calentamiento de las aguas superficiales, a medida que el flujo de calor positivo hacia el océano calienta rápidamente la superficie del mar en la ausencia de vientos de surgencia y de mezcla vertical.

La Bahía de Antofagasta ( $23^{\circ}42'$  S,  $70^{\circ}27'$  W) es un sistema semicerrado, con orientación hacia el sur (fig. 1), en el cual se observan aguas más cálidas que las aguas de surgencia adyacentes a la bahía (fig. 2), donde los vientos son permanentes y favorables a las surgencias y soplan en dirección a la bahía. La bahía está delimitada por la Península de Mejillones hacia el lado norte (en la dirección del viento). El centro de Mejillones y la costa alrededor de Punta Jorgillo y El Cobre son dos importantes centros de surgencia en la costa del norte de Chile, con surgencia permanente durante todo el año (Strub *et al.* 1998, Escribano *et al.* 2004). La Bahía de Antofagasta es un ejemplo típico de bahía en una región de surgencia, con aguas superficiales mucho más cálidas en comparación con las de las costas adyacentes a la bahía (fig. 2). Este fenómeno ha sido notado por varios trabajos previos en el área (Castilla *et al.* 2002, Avendaño y Cantillán 2005). De gran importancia

in these regions (Largier *et al.* 2006). Offshore transport removes plankton from these coastal waters, reducing the chances of successful recruitment of larvae and reducing the amount of particulate organic matter (e.g., phytoplankton) available to support nearshore ecosystems. This appears to be the case along straight coasts with incessant winds. Most upwelling coasts, however, are characterized by spatial or temporal refuge, either bays in which upwelling is weak or absent, or calm periods during which upwelling relaxes and dissipates. These places and time scales are characterized by warm surface waters, as strong positive heat flux into the ocean rapidly warms surface waters in the absence of wind-driven upwelling and vertical mixing.

Antofagasta Bay ( $23^{\circ}42'$  S,  $70^{\circ}27'$  W) is a semi-enclosed, southward-facing bay (fig. 1), containing warmer waters than along the adjacent upwelling coasts (fig. 2). The prevailing upwelling winds blow into the bay, which is defined by the Mejillones Peninsula on the downwind side. The Mejillones area and the upwind coast around Jorgillo Point and El Cobre are two important upwelling centers in northern Chile, with upwelling occurring year round (Strub *et al.* 1998, Escribano *et al.* 2004). Antofagasta Bay is typical of bays in upwelling regions, with much warmer surface waters within it than along the coasts adjacent to it (fig. 2). This phenomenon has been noted in other earlier works (Castilla *et al.* 2002, Avendaño and Cantillán 2005). Of great importance is the interpretation that these surface waters are retained in the bay for several days, a time scale relevant to phytoplankton blooms and the larval dispersal of many marine organisms (Avendaño and Cantillán 2005). Castilla *et al.* (2002) suggest that the evident retention of surface waters in the bay is a key factor in the

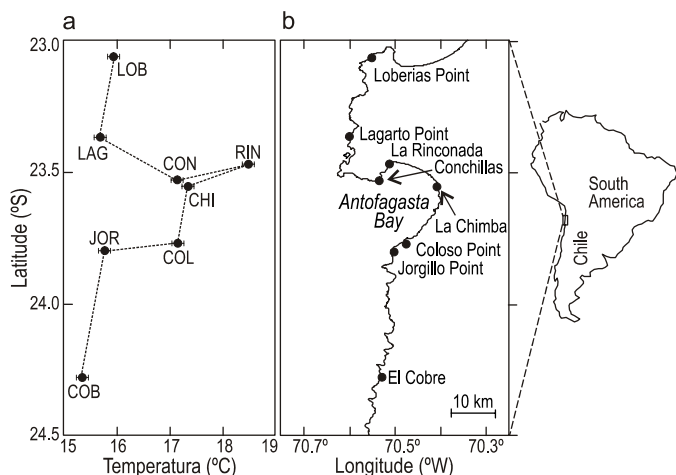


Figura 1. Área de estudio mostrando la posición de la Bahía de Antofagasta en el norte de Chile (a). En el panel izquierdo se muestran los promedios de temperatura (1997–2003), las líneas indican el valor del error estándar.

Figure 1. (a) Mean sea temperatures (1997–2003) for each of the sample sites along Antofagasta Bay (northern Chile). (b) Study area showing the location of sample sites in Antofagasta Bay. Standard error bars are also shown.

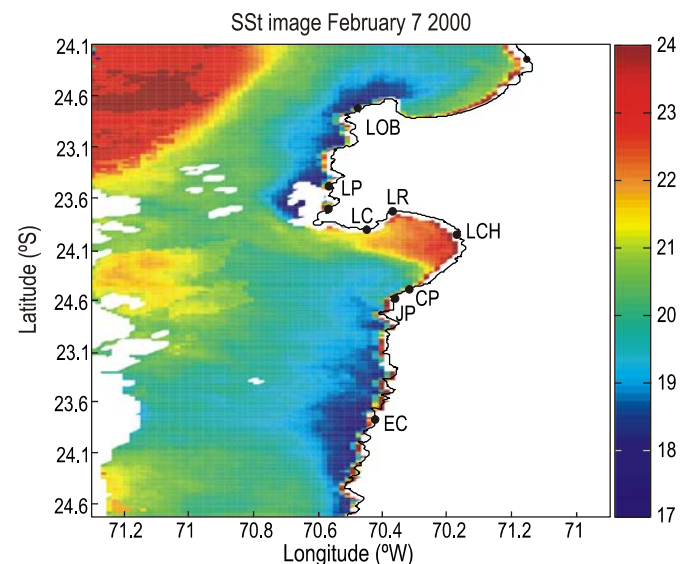


Figura 2. Imagen satelital de la temperatura superficial media del mar (en °C) dentro y alrededor de la Bahía de Antofagasta. Se muestran los sitios de emplazamiento de los termistores (cf. fig. 1).

Figure 2. Satellite image of mean sea surface temperature (°C) inside and around Antofagasta Bay. Thermistor sites are shown (cf. fig. 1).

resulta la interpretación de que estas aguas cálidas superficiales son retenidas dentro de la bahía por varios días, en una escala de tiempo que es relevante para los florecimientos de fitoplankton y para la dispersión de larvas de organismos marinos (Avendaño y Cantillán 2005). Castilla *et al.* (2002) sugieren que la evidente retención de aguas cálidas en la bahía es un factor clave en la retención de larvas del tunicado *Pyura praeputialis* en la Bahía de Antofagasta y además un factor clave para explicar el por qué la distribución de *P. praeputialis* está estrictamente limitado a esta bahía.

Para explorar aún más la naturaleza de esta retención se instalaron termistores en varios sitios a lo largo de la costa de la Bahía de Antofagasta y a lo largo de la costa expuesta, inmediatamente hacia el norte y sur de la bahía. Varios años de datos confirman la persistencia de aguas cálidas en la bahía, las cuales exhiben una señal estacional, sinóptica y diurna, características de temperaturas de aguas costeras. En este manuscrito se describe la variabilidad temporal y espacial de la temperatura del mar en la costa, lo cual se relaciona a forzantes oceanográficos y a los efectos ecológicos que producen estos patrones de temperatura.

## Materiales y métodos

Se midió la temperatura superficial del mar en ocho sitios a lo largo de la costa de Antofagasta en el norte de Chile, desde junio de 1997 hasta julio de 2003 (fig. 1). La temperatura fue obtenida mediante de termistores Onset Stoway (precisión de  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ), instalados sobre superficie rocosa y sumergidos a aproximadamente 0.5 m por debajo del nivel de marea baja. La temperatura fue registrada cada 30 min, y cada tres meses se realizó la recuperación y reinstalación de los termistores. Se calcularon promedios diarios de temperatura del mar y las brechas sin datos de entre uno y tres días fueron interpoladas linealmente. En conjunto con los datos de temperatura del mar a lo largo de la Bahía de Antofagasta se obtuvieron datos semanales de la región El Niño 1+2, los cuales fueron bajados directamente de la página del proyecto TOGA-TAO.

Se obtuvieron observaciones de la velocidad y dirección del viento cada seis horas (0, 6, 12, 18 UTC) de la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto Cerro Moreno de Antofagasta. El vector del viento fue descompuesto en sus componentes este-oeste (transversal a la costa) y norte-sur (a lo largo de la costa). Según Pizarro *et al.* (1994), y reconociendo que el viento tiene un máximo durante las horas de la tarde, se calcularon promedios diarios del viento utilizando los datos durante horas de la tarde. Una vez más, las brechas sin datos de entre uno y tres días fueron llenadas utilizando interpolación lineal. Finalmente, se calcularon promedios diarios del estrés del viento para las dos componentes del viento (este-oeste y norte-sur) utilizando un coeficiente de arrastre de  $1.3 \times 10^{-3}$  y una densidad del aire de  $1.2 \text{ kg m}^{-3}$  (Bakun y Nelson 1991).

Se obtuvieron datos de temperatura superficial del mar (TSM) de NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration), de los satélites que utilizan el radiómetro de

retention of larvae of the tunicate *Pyura praeputialis* and in explaining why the distribution of this species is so strictly limited to Antofagasta Bay.

To further explore the nature of this retention, we deployed thermistors at several sites along the shoreline of Antofagasta Bay and along the open coast immediately to the north and south of it. Several years of data confirm the persistence of warm waters within the bay, which exhibit characteristic seasonal, synoptic and diurnal fluctuations in shoreline temperatures. In this paper we first describe the temporal and spatial variability of sea surface temperature (SST) and then relate it to both the oceanographic causes and the ecological effects of these patterns.

## Material and methods

Nearshore surface temperatures were measured at eight sites along the coast of Antofagasta in northern Chile, from June 1997 to July 2003 (fig. 1). Data were obtained through deployment of Onset Stowaway temperature loggers (thermistors,  $\pm 0.3^\circ\text{C}$  accuracy) on submerged rock surfaces about 0.8–1.5 m below extreme low-tide water levels. Temperature was recorded every 30 min and thermistors were recovered, serviced and redeployed approximately every 3–5 months. For daily mean temperatures, gaps of 1–3 days were linearly interpolated. In addition to temperatures measured directly at the bay, weekly offshore SST averages from June 1997 to July 2003 were downloaded from the website of the TOGA-TAO project (El Niño 1+2 region).

Six-hourly observations of wind speed and direction were obtained from the meteorological station at Antofagasta airport (Cerro Moreno) at 0, 6, 12 and 18 UTC (Universal Time Code). Wind vector data were decomposed into east-west (cross-shore) and north-south (alongshore) components. Following Pizarro *et al.* (1994), and recognizing that winds peaked in the afternoon, daily wind data were obtained with afternoon wind averages. Again, gaps of 1–3 days were filled by linear interpolation. Daily mean wind stress for both east-west and north-south components was calculated, using a drag coefficient of  $1.3 \times 10^{-3}$  and air density of  $1.2 \text{ kg m}^{-3}$  (Bakun and Nelson 1991).

Satellite SST data were obtained by National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) satellites carrying the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). These SST data have a resolution (pixel size) of about 1 km. The SST images were acquired and processed at the University of Chile Center for Spatial Studies (e.g., Lagos *et al.* 2002). They covered an area from  $22.9^\circ\text{S}$  to  $25.6^\circ\text{S}$  and from  $70.2^\circ\text{W}$  to  $71.2^\circ\text{W}$ , containing a total of  $333 \times 355$  pixels.

Temperature data analyses were conducted to determine temporal and spatial patterns, as well as association with wind variability. First, for each site the decorrelation time scale was determined from autocorrelations. According to Emery and Thomson (1998), the decorrelation scale is the time lag at

alta resolución (AVHRR). Estos datos de TSM tienen una resolución del orden de 1 km (tamaño del pixel). Las imágenes de TSM fueron obtenidas y procesadas en el Centro de Estudios Espaciales de la Universidad de Chile (e.g., Lagos *et al.* 2002). Estas imágenes cubren el área desde 22.9°S hasta 25.6°S y desde 70.2°W hasta 71.2°W, conteniendo un total de  $333 \times 355$  pixeles.

Para determinar los patrones espaciales y temporales de temperatura se realizaron análisis de series de tiempo a los datos de temperatura del mar, así como también a las series de viento. Primero, para cada sitio se determinaron escalas de decorrelación a partir de las funciones de autocorrelación. Según Emery y Thomson (1998), la escala de decorrelación es el rezago en tiempo en el cual la función no está significativamente correlacionada consigo misma y ésta representa la escala de tiempo típica de variabilidad. Segundo, para investigar patrones espaciales en la variabilidad temporal, es decir cuales sitios muestran fluctuaciones concurrentes en temperatura, se realizaron análisis de funciones empíricas ortogonales (FEO) para seis sitios que contenían datos continuos (brechas sin datos) de 581 días, desde diciembre de 2000 hasta junio de 2002. Debido a que estos registros sólo contienen un ciclo anual completo y debido a que el principal interés de este estudio ha sido la variabilidad sinóptica, se removió el ciclo anual de las series de temperatura antes de realizar el análisis de FEO. Finalmente, para explorar la relación entre los modos de variabilidad dominantes y el viento, se realizó un análisis de correlación cruzada entre las series de tiempo de los modos y el estrés del viento, utilizando un intervalo de confianza de 99% (Emery y Thompson 1998). Adicionalmente, las series de tiempo horarias se suavizaron utilizando un filtro Hanning de 41 h, esto sólo con el propósito de mostrar al lector una mejor representación de las largas series de temperatura (i.e., fig. 3).

## Resultados

### *Patrón medio espacial*

La temperatura superficial del mar en la costa exhibe un patrón que es coherente con aguas más cálidas dentro de la bahía (entre Las Conchillas y Punta Coloso) y un máximo superior a 18°C en La Rinconada, por el sector norte de la bahía (figs. 1a, 2). Las áreas adyacentes hacia el norte (Lagarto y Punta Loberías) y sur (El Cobre y Punta Jorgillo) de la Bahía de Antofagasta son más frías, con promedios de temperatura entre 15°C y 16°C (figs. 1a, 2). Se observó una diferencia de pequeña escala en la temperatura media entre Punta Coloso y Punta Jorgillo, en la entrada sur de la bahía. La presencia de frentes de temperatura en dicha área ha sido descrita previamente utilizando imágenes de satélite (Castilla *et al.* 2002, Lagos *et al.* 2002). En este contexto, el patrón espacial de la temperatura superficial se observa a partir de la distribución de la TSM obtenida del promedio de seis imágenes de TSM (sin condiciones de nubes) entre 1998 y 2000 (fig. 2). Se observó que existe coherencia entre la TSM (obtenida con satélite) y la

which the function is not significantly correlated with itself and this represents the typical time scale of variability. Second, to determine the spatial patterns in temporal variability (i.e., which sites show concurrent fluctuations in temperature), an empirical orthogonal function (EOF) analysis was performed for six sites for which there is a 581-day gap-free record (December 2000 to June 2002). As this only contains one full annual cycle and given a primary interest in synoptic variability, an annual (seasonal) signal was removed from the temperature time series prior to performing the EOF analysis. Finally, to explore the relationship between the dominant modes of variability and wind, the EOF time-series were correlated against wind stress, using a 99% confidence interval (Emery and Thomson 1998). Additionally, smoothing of daily SST time series was performed using a Hanning filter of 41 h in order to give the reader a better representation of the long time series (i.e., fig. 3).

## Results

### *Mean spatial pattern*

The SST measured along the coast exhibits a coherent pattern, with warmer waters within Antofagasta Bay (between Conchillas and Coloso Point) and a maximum above 18°C at La Rinconada, in the northern part of the bay (downwind; figs. 1a, 2). Adjacent areas to the north (Lagarto Point and Loberías Point) and south (El Cobre and Jorgillo Point) of Antofagasta Bay are cooler, with average temperatures between 15°C and 16°C (figs. 1a, 2). A marked small-scale difference in mean surface temperature is observed between Coloso Point and Jorgillo Point, at the southern entrance to the bay. The presence of thermal fronts here has previously been observed in satellite imagery (Castilla *et al.* 2002, Lagos *et al.* 2002). Within this context, the spatial pattern of surface temperature is also observed from a mean SST distribution obtained through the average of six SST satellite images with clear sky condition between 1998 and 2000 (fig. 2). The SSTs (from satellite imagery) are coherent with coastal sea temperatures (from thermistors), showing warm bay waters (>21°C) and cold upwelled waters towards the northern and southern ends of the bay.

This pattern of averages appears to be persistent. La Rinconada is the warmest site most of the time, while open-coast sites at Loberías Point, Lagarto Point, Jorgillo Point and El Cobre are usually the coolest, despite strong seasonal and synoptic variability (fig. 3). At opposite thermal extremes, La Rinconada is seldom cooler than 15°C, whereas El Cobre is seldom warmer than 16°C. On the other hand, La Rinconada and other bay sites often exceed 20°C, while outer coast sites have 14°C and cooler waters.

A preliminary view of the offshore and vertical extent of this warm-surface-layer is available from a boat-based survey conducted in January 2000 along the two offshore transects shown in figure 4. Within 5 km of the shoreline, surface

temperatura del mar en la costa (obtenida con los termistores), en la que la bahía aparece con temperaturas más cálidas ( $>21^{\circ}\text{C}$ ) que las temperaturas observadas en los sitios hacia el norte y sur de la bahía.

Este patrón en los promedios de temperatura se observa de forma permanente, con La Rinconada como el sitio de máxima temperatura la mayor parte del tiempo, y los sitios en la costa expuesta (como Punta Loberías, Punta Lagarto, Punta Jorgillo y El Cobre) presentan las temperaturas más bajas, a pesar de la fuerte señal estacional y variabilidad sinóptica (fig. 3). Como extremos de temperatura, en La Rinconada ésta es ligeramente menor a  $15^{\circ}\text{C}$ , mientras que en El Cobre es ligeramente mayor a  $16^{\circ}\text{C}$ . Por otra parte, mientras que la temperatura en La Rinconada y los otros sitios de la bahía supera los  $20^{\circ}\text{C}$  en varias ocasiones, los sitios fuera de la bahía muestran temperaturas iguales o menores a  $14^{\circ}\text{C}$ .

Una vista preliminar de la extensión vertical y hacia fuera de la costa de esta capa de agua superficial más cálida fue obtenida a través de un crucero conducido en enero de 2000, donde se muestrearon dos transectas paralelas entre sí y perpendiculares a la costa que se muestran en la figura 4. Dentro de los primeros 5 km de la costa se observaron temperaturas superficiales por encima de  $20^{\circ}\text{C}$  mientras que a 20 m de profundidad se encontraron aguas con menos de  $14^{\circ}\text{C}$ . La estratificación cercana a la superficie se extiende hacia fuera de la costa; sin embargo, se debilita a 20 km de la costa donde las temperaturas superficiales son menores a  $18^{\circ}\text{C}$ .

#### *Patrón estacional e interanual*

Las temperaturas en todos los sitios muestran un marcado ciclo estacional, específicamente dentro de la bahía, donde las temperaturas de aproximadamente  $15^{\circ}\text{C}$  aumentan a valores de  $22\text{--}24^{\circ}\text{C}$  a mediados del verano (e.g., enero de 2002, fig. 3); mientras que, durante la surgencia de verano, las temperaturas en la costa expuesta pueden alcanzar un mínimo (aproximadamente  $13^{\circ}\text{C}$ )—incluso más frías que las temperaturas de invierno—y donde además existen periodos durante el verano en los que las aguas del centro de surgencia de El Cobre alcanzan hasta  $16^{\circ}\text{C}$ .

Además del ciclo estacional regular, es posible observar diferencias interanuales débiles pero notables (fig. 5). Con respecto a esto, las anomalías de temperatura del mar en la región de El Niño 1+2 son graficadas en la figura 5. Este índice provee una buena representación del comienzo del evento El Niño en el Pacífico suroriental. Por ejemplo, las altas temperaturas a lo largo de la costa expuesta durante 1997–98 están relacionadas con el evento El Niño 1997–98. Durante este periodo la temperatura del mar en la costa alcanza valores tan altos como  $5^{\circ}\text{C}$  por encima de lo observado para otros años.

#### *Variabilidad sinóptica*

Resulta importante la variabilidad sinóptica (banda meteorológica) de la temperatura del mar en la costa, con fluctuaciones de hasta  $5^{\circ}\text{C}$  se pueden observar en la mayoría de

temperaturas are over  $20^{\circ}\text{C}$ , while waters cooler than  $14^{\circ}\text{C}$  are found at 20 m. This near-surface stratification extends well offshore; however, it weakens at distances of 20 km offshore where surface temperatures are less than  $18^{\circ}\text{C}$ .

#### *Seasonal and interannual pattern*

Temperatures at all sites showed a marked seasonal cycle, specifically within the bay where winter temperatures of about  $15^{\circ}\text{C}$  increase to mid-summer values of  $22\text{--}24^{\circ}\text{C}$  (e.g., January 2002, fig. 3). While open coast temperatures may be minimum during summer upwelling (about  $13^{\circ}\text{C}$ )—and colder than winter surface temperatures—there are periods in summer when waters in the upstream upwelling center at El Cobre reach  $16^{\circ}\text{C}$ .

In addition to the regular seasonal cycle, one can also see weaker but notable interannual differences (fig. 5). In relation to this, sea temperature anomalies in the El Niño 1+2 region are plotted in figure 5. This index provides a good representation of the onset of El Niño conditions in the southeastern Pacific Ocean. For example, the high temperatures along the open coast in 1997–1998 are clearly related to the 1997–1998 El Niño event. During this period, coastal temperatures are as much as  $5^{\circ}\text{C}$  above those observed in other years.

#### *Synoptic variability*

Synoptic (weather band) variability in shoreline temperatures is important, with fluctuations of up to  $5^{\circ}\text{C}$  at most sites (figs. 3, 5). Defining synoptic variability as fluctuations in time scales between 2 and 7 days, the proportional strength of synoptic variability is calculated for the six main sites. Along the open coast, synoptic variability accounts for about 10% of total variability (fig. 6), whereas in the bay it is relatively weaker (partly due to the strong seasonal signal in the bay). However, strong synoptic variability is observed in the frontal zone around Coloso Point and Jorgillo Point (about 20% of the total). This suggestion of less synoptic variability in the bay is supported by the longer decorrelation time scales found there—e.g., 12 days at La Rinconada and 10 days at Conchillas (fig. 7). In contrast, exposed upwelling sites such as El Cobre, Loberías Point and Jorgillo Point exhibited short time scales ( $<5$  days), as did Coloso Point at the southern entrance of the bay. So, while upwelling winds control temperature variability at open coast sites, it appears that surface waters are retained in the bay for periods of one or two weeks.

#### *Spatial covariability*

To further explore the spatial patterns in synoptic variability, in particular the differences between bay and open ocean sites, we conducted an EOF analysis on the temperature with the seasonal cycle removed. Half (51%) of the non-seasonal variability at all sites is explained by the first EOF mode, which shows all sites fluctuating in unison (fig. 8) and strongest fluctuations at long time scales (40 to 60 days). This is

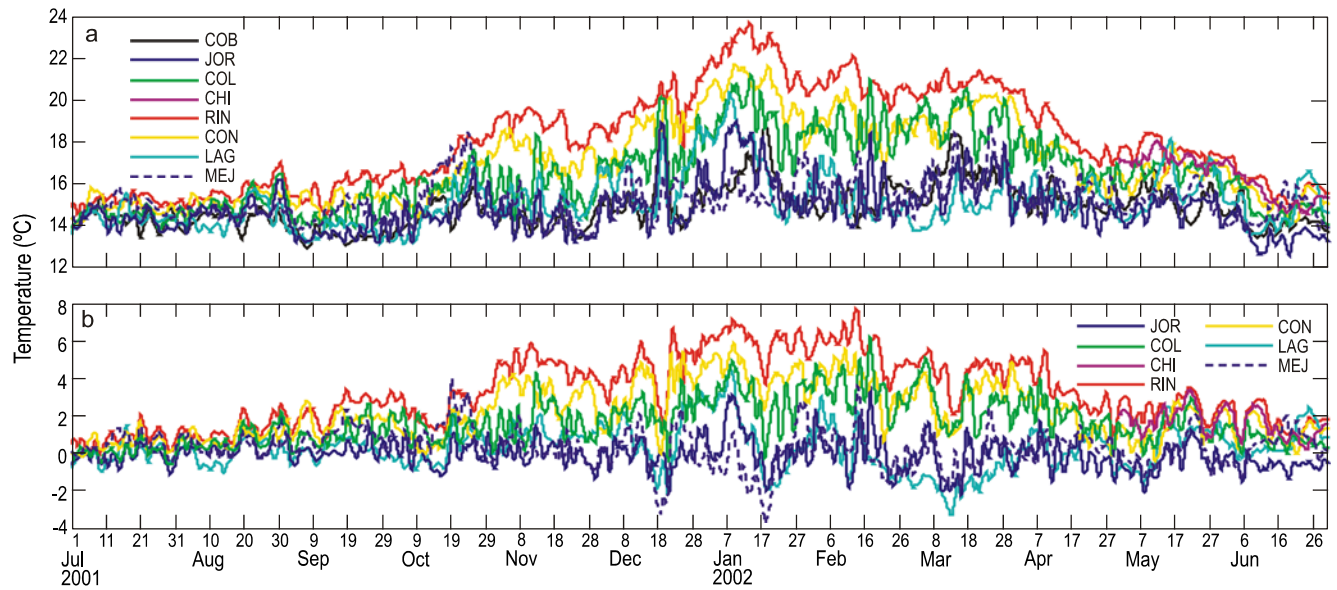


Figura 3. (a) Temperatura horaria para todos los sitios, del 1 de julio de 2001 al 30 de junio de 2002; este periodo corresponde a un segmento con datos continuos. (b) Diferencias de temperatura entre los diferentes sitios y El Cobre, bajo el supuesto de que las aguas dentro de la bahía son aguas de surgencia más cálidas. Las series de temperaturas fueron suavizadas utilizando un filtro Hanning de 41 h.

Figure 3. (a) Hourly temperature at all sites from July 1, 2001 to June 30, 2002; this period corresponds to a gap-free data segment. (b) Temperature differences between individual sites and El Cobre, assuming that the bay waters are warmed upwelled waters. Time series were smoothed with a Hanning filter of 41 hours.

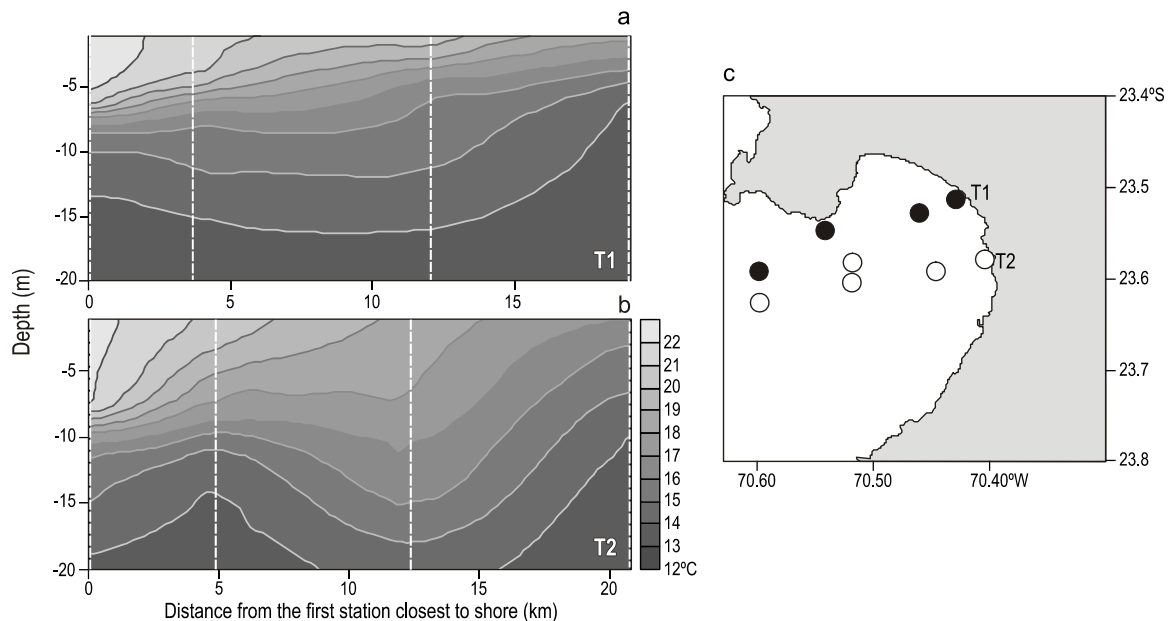


Figura 4. Transectas de temperatura obtenidas en un crucero en enero de 2000, mostrando la estructura vertical o estratificación de la temperatura. (a) Transecta 1. (b) Transecta 2. (c) Ubicación de las transectas del crucero.

Figure 4. Boat-based transects of vertical temperature structure (January 2000), showing vertical stratification. (a) Transect 1. (b) Transect 2. (c) Location of boat-based transects.

los sitios (figs. 3, 5). Si definimos la variabilidad sinóptica como las fluctuaciones entre dos y siete días, es posible calcular la influencia relacionada con esta variabilidad sinóptica para seis de los sitios más importantes. A lo largo de la costa expuesta la variabilidad sinóptica explica aproximadamente el 10% de la variabilidad total (fig. 6), mientras que dentro de la bahía esta escala de variabilidad es relativamente más débil (en parte gracias a la fuerte señal estacional dentro de la bahía). Sin embargo, la fuerte variabilidad sinóptica es observada en la zona de frentes alrededor de Punta Coloso y Punta Jorgillo (aproximadamente 20% del total). La idea de menor variabilidad sinóptica dentro de la bahía está apoyada por las largas escalas de tiempo que muestra la escala de decorrelación en la bahía—e.g. 12 días en La Rinconada y 10 días en Las Conchillas (fig. 7). En contraste, los sitios expuestos a surgencia tales como El Cobre, Punta Loberías y Punta Jorgillo exhibieron escalas de tiempo menores (<5 días), así como también Punta Coloso, en la entrada sur de la bahía, de tal forma que mientras los vientos de surgencia controlan la variabilidad en la temperatura en los sitios de la costa expuesta, al parecer las aguas superficiales dentro de la bahía son retenidas por periodos de una o dos semanas.

#### Covariabilidad espacial

Para explorar el patrón espacial en la variabilidad sinóptica, y de forma notable las diferencias entre los sitios dentro de la bahía y los sitios expuestos, realizamos un análisis de FEO a las series de temperatura del mar con el ciclo anual removido. Aproximadamente 51% de la variabilidad no estacional se explica por el primer modo de FEO, el cual muestra todos los sitios fluctuando al unísono (fig. 8) y que corresponden a fluctuaciones de baja frecuencia (periodos de 40–60 días) consistentes con ondas Kelvin intraestacionales observadas a lo largo de la costa norte de Chile (Shaffer *et al.* 1997, Ulloa *et al.* 2001). En contraste, el segundo modo de FEO explica 20% de la varianza y toma en cuenta las diferencias entre los sitios de aguas cálidas al interior de la bahía (Las Conchillas y La Rinconada) y los otros sitios. Las fluctuaciones con esta estructura espacial son más intensas en la banda sinóptica (aproximadamente 5 días). Estos resultados son consistentes con la observación de que la bahía permanece más cálida a medida que la costa expuesta se enfría, apoyando la idea de que la bahía retiene aguas y exhibe un carácter térmico que es diferente a la costa expuesta.

#### Viento como forzante

Los vientos son favorables a la surgencia durante todo el año, pero son más intensos durante los meses de verano (fig. 9). Éstos muestran una fuerte variabilidad sinóptica. Mientras el primer modo de FEO de la variabilidad en la temperatura está dominado por fluctuaciones de baja frecuencia, ésta no muestra relación con el estrés del viento. Sin embargo, el segundo modo de FEO muestra una fuerte variabilidad sinóptica que está significativamente relacionada con el estrés

consistent with the remotely forced intraseasonal Kelvin waves observed along the northern Chilean coast (Schaffer *et al.* 1997, Ulloa *et al.* 2001). In contrast, the second EOF mode explains 20% of the variance and accounts for differences between the warmest bay sites (Conchillas, Rinconada) and other sites. Fluctuations with this spatial structure are strong in the synoptic band (around 5 days). This result is consistent with the observation that the bay remains warm as the open coast cools, supporting the idea that the bay retains waters and exhibits a thermal character that is distinctly different from open coasts.

#### Wind forcing

In the study area winds are upwelling favorable year-round, but strongest during the summer months (fig. 9). They show strong synoptic scale variability. The first EOF mode of temperature variability is dominated by low frequency fluctuations and does not exhibit a strong relation to wind forcing, whereas the second EOF mode shows strong synoptic variability and is significantly related to alongshore wind stress (99% confidence). The sign of the correlation (and of the second EOF eigen values) indicates that an increase in southerly (upwelling) winds produces a drop in temperature along the open coast and an increase in the bay shoreline temperatures, and that this response lags the wind by 0 to 1 day (fig. 10).

#### Discussion

The warm waters of Antofagasta Bay are clearly evident in satellite imagery (fig. 2; Lagos *et al.* 2002, Castilla *et al.* 2002). Here we have shown that this is a permanent feature, with surface waters persistently warmer than along the open coast. Though this warm feature is found immediately downwind of Jorgillo Point (the upwelling center at the mouth of the bay), the maximum temperatures are found at La Rinconada at the downstream end (sac) of the bay. Therefore, while this warm bay feature appears to be an upwelling shadow (*sensu* Graham and Largier 1997), additional dynamics and a variation on this theme are introduced by the marked downstream peninsula and the apparent trapping of wind-driven surface waters in the northern bay. Furthermore, we have shown that coastline orientation plays an important role in the upwelling dynamics of this region. The role of coastline geometry has been described for other upwelling regimes (Narváez *et al.* 2004, Rodrigues and Lorenzetti 2001) and to an extended spatial scale (Figueroa and Moffat 2000, Soto-Mardones *et al.* 2004). The orientation of Antofagasta Bay to wind forcing and the presence of the Mejillones Peninsula enhance retention of warm waters within the bay, creating an enclosure that traps surface waters inside the bay (Castilla *et al.* 2002) forming an upwelling trap". Upwelled waters south of Jorgillo Point are observed to the north across the mouth of Antofagasta Bay, and between the cold upwelling plume and the warm waters within it, there is a persistent thermal gradient structure, which is spatially variable (see figs. 2, 4).

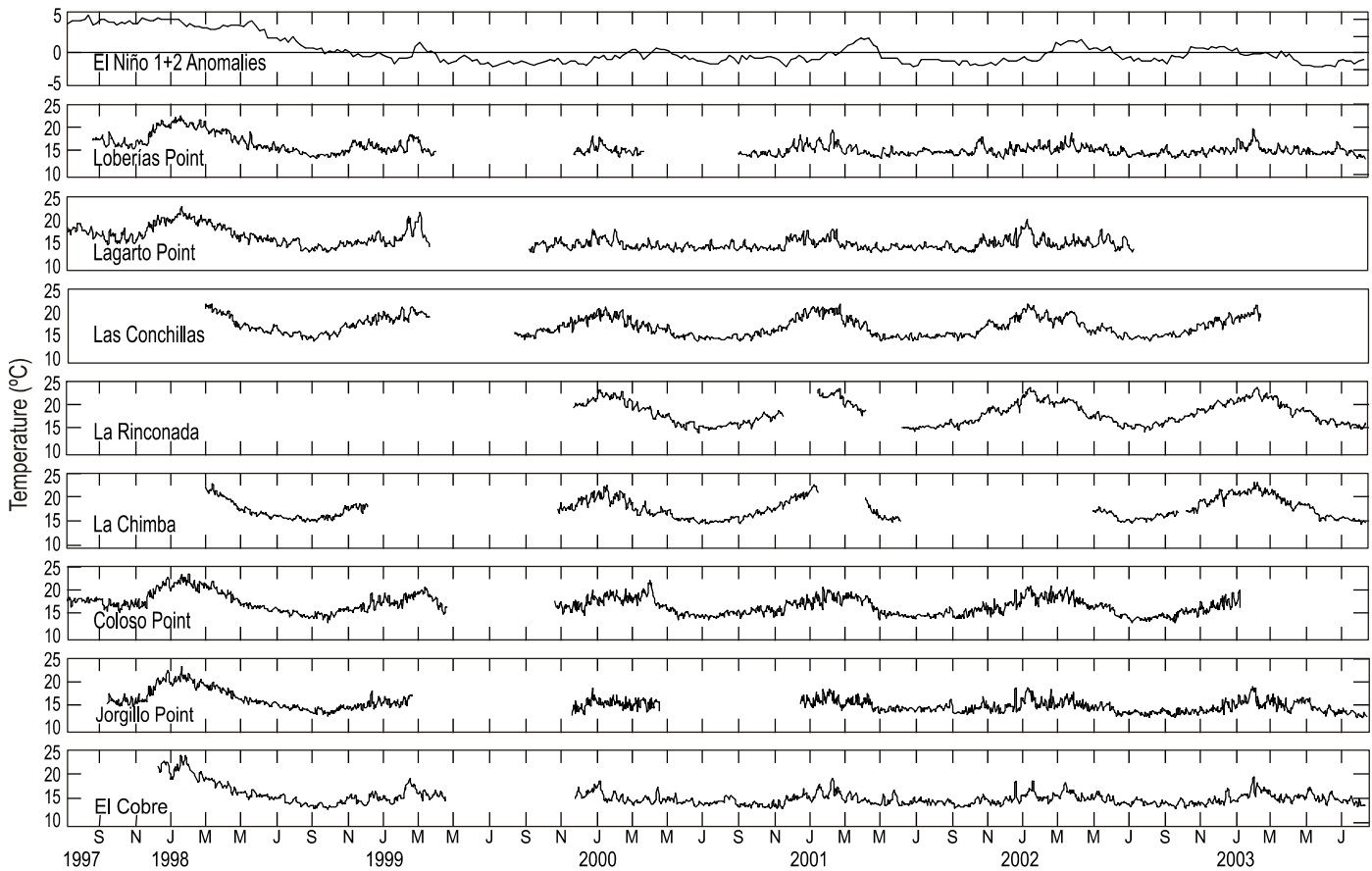


Figura 5. Series de tiempo de la temperatura del mar para la región El Niño 1+2 (promedios semanales) en el panel de arriba, y promedios diarios de temperatura del mar para ocho sitios de junio de 1997 a julio de 2003.

Figure 5. Time series of 7-day mean sea temperature for El Niño 1+2 region and daily mean sea temperature at eight sites, from June 1997 to July 2003.

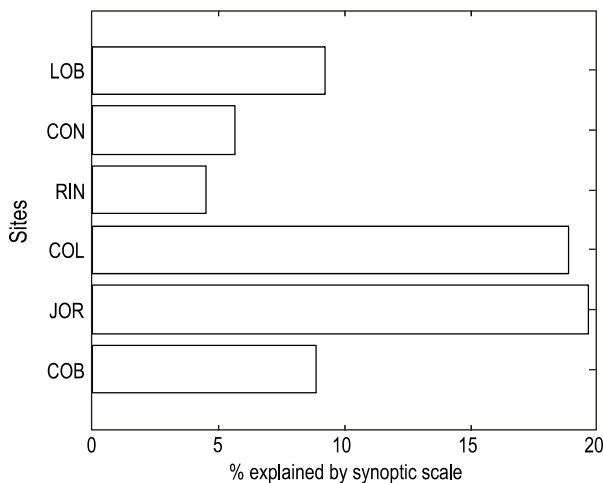


Figura 6. Porcentajes de varianza explicados por la variabilidad sinóptica de la temperatura del mar para cada sitio, la que está definida por la variabilidad a escalas de tiempo entre 2 y 7 días.

Figure 6. Percentage of temperature variability at each site explained by synoptic variability, here defined as variability at time scales of 2–7 days.

del viento a lo largo de la costa (99% de confianza). El signo de la correlación (y de los vectores propios del segundo modo de

This thermal gradient between Antofagasta Bay and the open coast never breaks down. Throughout the seasons and throughout the upwelling-relaxation cycles, La Rinconada and other bay sites are persistently warmer than upwelling sites at El Cobre and Lagarto Point. The long time scale of temperature variability at La Rinconada suggests that the center of this warm feature has a long residence time, significantly longer than the typical synoptic variability. So, in contrast to the example of Monterey Bay (USA), where the warm waters are mixed away during relaxation (Graham and Largier 1997), in Antofagasta Bay the occurrence of warm waters persists during upwelling and relaxation events. Nevertheless, the EOF analysis suggests that while the bay as a whole warms and cools in unison with the waters along the open coast, there is an element of variability shown by an increase in bay temperatures during enhanced upwelling winds and cooling of waters along the open coast (i.e., upwelling). In other words, Antofagasta Bay becomes more retentive (or more shallowly stratified) during periods of active upwelling. All this needs to be explained through future circulation and stratification studies in the bay (see Escribano *et al.* 2002, 2004).

With the persistence of the warm feature, one can expect the strong thermal gradients (thermal fronts) to persist at the northern and southern ends of the mouth of the bay (near

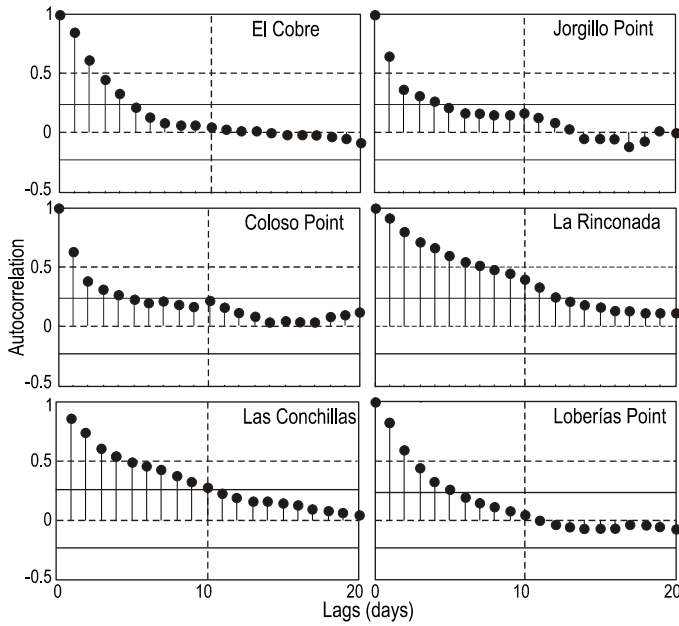


Figura 7. Funciones de autocorrelación para la temperatura del mar en seis de los principales sitios de estudio. La línea continua indica el intervalo de confianza de 99% y determina el rezago en tiempo al cual no existe correlación (i.e., la escala de decorrelación).

Figure 7. Autocorrelation functions for sea temperature at six sites. The continuous line indicates the 99% confidence interval and defines the lag at which there is no longer correlation (i.e., the decorrelation time scale).

FEO) indican que un aumento en los vientos del sur (vientos de surgencia) produce una caída en la temperatura a lo largo de la costa expuesta y un aumento en la temperatura del mar dentro de la bahía, y que la caída en la temperatura responde al viento con un rezago de 0 y 1 días (fig. 10).

## Discusión

Las aguas más cálidas en la Bahía de Antofagasta son claramente evidentes en imágenes de satélite (fig. 2, Lagos *et al.* 2002, Castilla *et al.* 2000). Aquí hemos mostrado que ésta es una característica permanente, en la que de forma persistente las aguas superficiales dentro de la bahía son más cálidas que las aguas observadas a lo largo de la costa expuesta. Mientras esta característica se encuentra inmediatamente en el área a favor del viento desde Punta Jorgillo (el centro de surgencia en la boca de la bahía), las máximas temperaturas se encuentran en La Rinconada al extremo norte de la bahía. Por lo tanto, mientras esta bahía presenta aguas más cálidas con características de una sombra de surgencia (*sensu* Graham y Largier 1997), una dinámica adicional y algunas variaciones en este tema son introducidas por la notoria península que actúa como frontera hacia el norte y también debido a la aparente retención (como trampa de surgencia) de aguas superficiales que se produce en el sector norte de la bahía. Hemos mostrado que la orientación de la línea de costa juega un rol importante en la dinámica de los procesos de surgencia en la región. El rol que

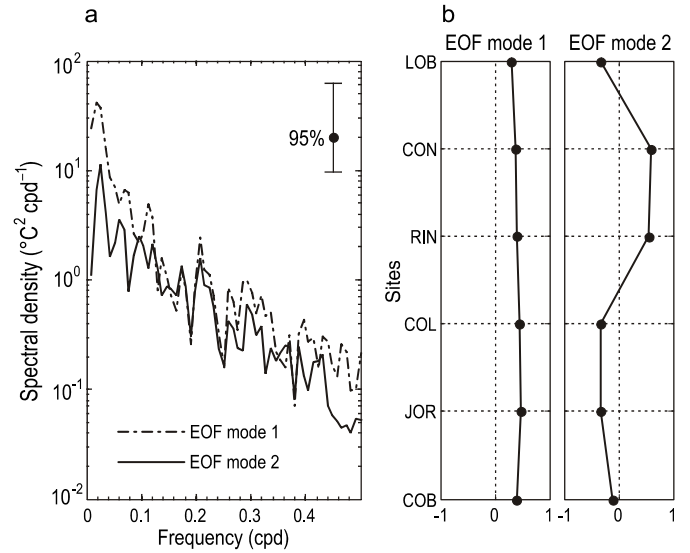


Figura 8. Los dos primeros modos de variabilidad de la temperatura del mar determinados a partir del análisis de funciones empíricas ortogonales (FEO) (ver texto). El panel derecho muestra los vectores propios y la estructura espacial de los modos. El panel izquierdo muestra la naturaleza espectral de variabilidad de cada modo. El modo 1 explica 51% y el modo 2 20% de la variabilidad total.

Figure 8. The two primary modes of temperature variability determined by empirical orthogonal function (EOF) analysis (see text). The right panel shows the eigen values and the spatial structure of the modes, while the left panel shows the spectral nature of variability of each mode. Mode 1 accounts for 51% and mode 2 for 20% of the total variability

Conchillas and Coloso Point, respectively). Following the above discussion, these fronts may strengthen during periods of active upwelling along the open coast. These frontal structures are likely to be very important in retaining buoyant larvae and other plankton in the bay. Also of importance to plankton is the high-frequency variability in temperatures as indicated by internal tide activity and diurnal forcing, either of which could play an important role in the transport between nearshore waters and the shoreline.

Residence times can be estimated by assuming that the bay is filled with waters originally upwelled at El Cobre and then by interpreting the temperature difference as an indication of retention. Following heat flux estimates of Kaplan *et al.* (2003) and others (e.g., Send *et al.* 1987, Graham and Largier 1997), and estimating a shallow surface layer (only a few meters thick), one obtains heating rates of 0.5–1°C per day. Figure 3b shows that bay waters at La Rinconada are 6–7°C warmer during the summer months of January and February, suggesting residence times of about two weeks. This agrees well with the decorrelation time scale estimates of residence time (12 days) inside Antofagasta Bay.

The present study postulates that the warm waters of Antofagasta Bay, which are clearly evident in satellite imagery (Castilla *et al.* 2002, Lagos *et al.* 2002), are a permanent feature within the bay, with surface water temperatures persistently warmer than along the open coast. Additionally, a

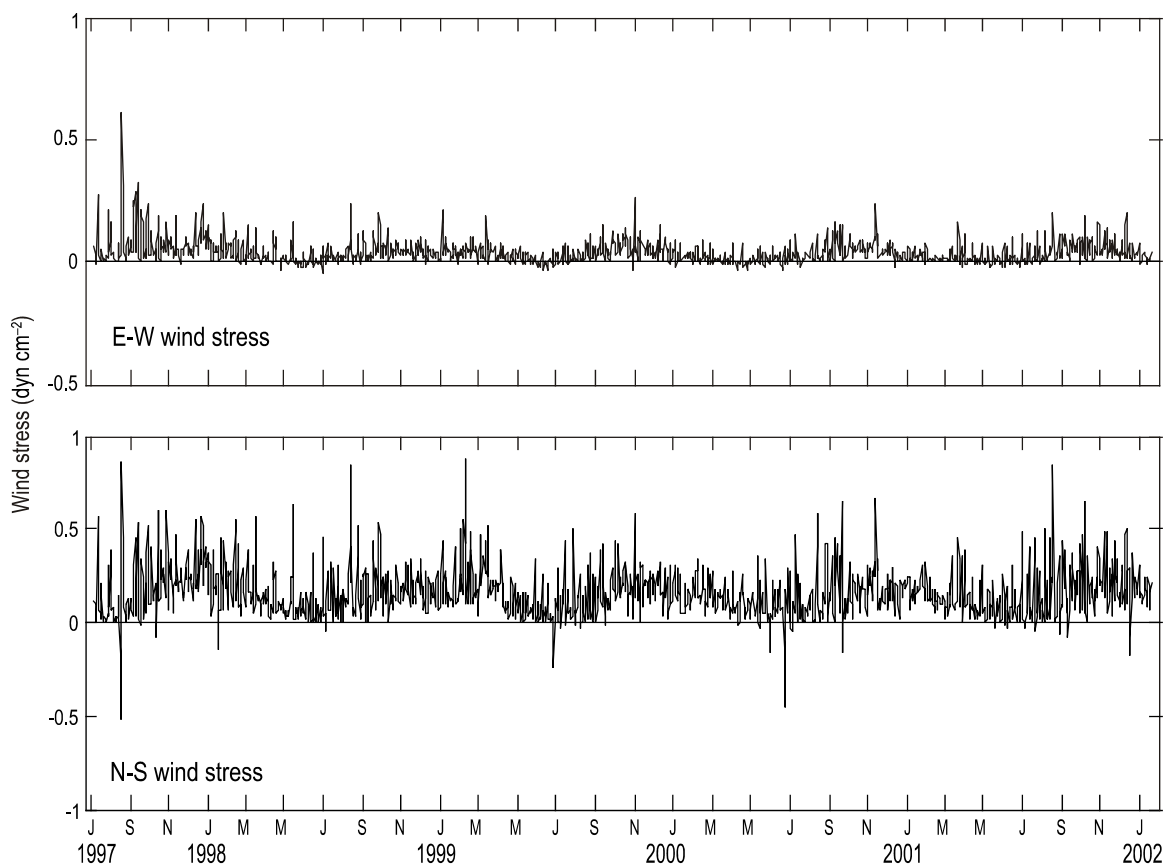


Figura 9. Estrés del viento para las componentes este-oeste (positivos hacia el este) y norte-sur (positivo hacia el norte) medido en el Aeropuerto de Cerro Moreno (ver texto). El máximo durante los meses de verano resulta evidente.  
 Figure 9. Wind stress for the east-west (positive eastward) and north-south (positive northward) components observed at Cerro Moreno Airport (see text). A summer maximum in northward upwelling winds is evident.

posee la geometría de la línea de costa ha sido descrito previamente para otros sistemas de surgencia (Narváez *et al.* 2004, Rodrigues y Lorenzetti 2001) y para una escala espacial más grande (Figueroa y Moffat 2000, Soto-Mardones *et al.* 2004). La orientación que tiene la Bahía de Antofagasta para recibir el viento como forzante y la presencia de la Península de Mejillones, aumentan la retención de aguas más cálidas dentro de la bahía, creando un refugio para que las aguas superficiales queden atrapadas dentro de la bahía (Castilla *et al.* 2002) formando una “trampa de surgencia”. Aguas de surgencia con origen hacia el sur de Punta Jorgillo se observan hacia el norte a lo largo de la boca de la Bahía de Antofagasta, además entre la pluma de aguas frías con origen de surgencia y las aguas cálidas dentro de la bahía existe un gradiente térmico persistente, el cual es espacialmente variable (ver figs. 2, 4).

Este gradiente térmico entre la Bahía de Antofagasta y la costa abierta es una característica permanente que nunca se rompe, ni a lo largo de las estaciones ni de los ciclos de surgencia-relajación. La Rinconada y otros sitios de la bahía están permanentemente más cálidos que los sitios de surgencia de El Cobre y Punta Lagarto. Las mayores escalas de tiempo observadas en la variabilidad de la temperatura del mar en La Rinconada sugieren que el centro de estas aguas cálidas tiene

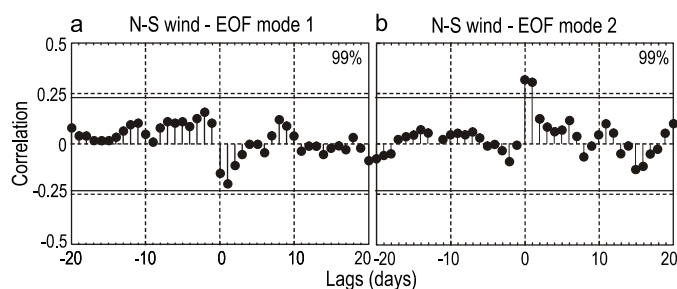


Figura 10. Correlación cruzada entre el estrés del viento norte-sur y el modo 1 (a) y entre el estrés del viento y el modo 2 (b) de la variabilidad de la temperatura. El nivel de confianza utilizado es 99%, sólo la correlación entre el estrés del viento y el segundo modo de FEO muestra valores significativos.

Figure 10. Cross-correlation between northward winds and mode 1 (a) and mode 2 (b) of temperature variability. The 99% confidence interval is shown and only attained in the relationship between wind and the second EOF mode.

persistent and spatially variable upwelling front is found at the bay mouth, and associated with this front there may be a cyclonic circulation in the bay (Escribano *et al.* 2002, 2004). A major implication of this hydrographic feature is the role it plays in the retention of plankton and, therefore, in the

un periodo largo de residencia, significativamente más largo que la escala típica de variabilidad sinóptica. De esta forma, en contraste con el ejemplo de Bahía Monterey (EUA), donde las aguas cálidas de la bahía se mezclan durante los procesos de relajación, para el caso de la Bahía de Antofagasta la presencia de aguas cálidas es una característica persistente durante eventos de surgencia y de relajación. Sin embargo, el análisis de FEO sugiere que mientras la bahía como un todo se calienta y se enfría al unísono con las aguas de la costa expuesta, existe un elemento de variabilidad que se observa en un incremento en las temperaturas de la bahía durante vientos favorables a surgencia y el enfriamiento de aguas a lo largo de la costa expuesta (i.e., surgencia). En otras palabras, la bahía es más retentiva (o más estratificada cerca de la superficie) durante los periodos de surgencia activa. Todo esto necesita ser explicado con mayor detalle mediante estudios futuros de circulación y estratificación en la bahía (ver Escribano *et al.* 2002, 2004).

Con esta característica permanente, se podría esperar que persistieran fuertes gradientes térmicos (frentes de temperatura) en los extremos norte y sur de la boca de la bahía (cerca de Las Conchillas y Punta Coloso, respectivamente). Siguiendo la discusión anterior, estos frentes podrían fortalecerse durante periodos de surgencia activa a lo largo de la costa expuesta, siendo probable que estas estructuras (frentes) sean importantes en la retención de larvas y otros organismos planctónicos en la bahía. Además, para el plancton es importante la variabilidad de alta frecuencia en la temperatura así como lo indica la actividad de mareas internas y forzantes diurnos, donde cualquiera de éstos podría jugar un rol importante en el transporte entre aguas cercanas a la costa y la costa.

Se pueden estimar tiempos de residencia suponiendo que la bahía está cubierta con aguas originadas por surgencia frente a El Cobre y luego interpretar las diferencias en temperaturas como un índice de retención. Siguiendo las estimaciones de flujos de calor realizadas por Kaplan *et al.* (2001) y otros (e.g., Send *et al.* 1987, Graham y Largier 1997) y estimando que la capa superficial es somera (sólo unos metros de profundidad), uno obtiene una tasa de calentamiento del orden de 0.5–1°C por día. Con respecto a lo que se muestra en la figura 3b, es posible observar que las aguas dentro de la bahía en La Rinconada son del orden de 6–7°C más cálidas durante los meses de verano (enero y febrero), sugiriendo tiempos de residencia del orden de dos semanas, lo que concuerda bien con las estimaciones de tiempo de residencia a partir de las escalas de tiempo de la decorrelación (12 días) para los sitios al interior de la Bahía de Antofagasta.

El presente estudio postula que las aguas cálidas observadas dentro de la Bahía de Antofagasta, claramente evidentes en imágenes de satélite (Castilla *et al.* 2002, Lagos *et al.* 2002), son una característica permanente dentro de la bahía, con temperaturas superficiales mayores a las observadas a lo largo de la costa expuesta. Adicionalmente, en la boca de la bahía se observó la presencia de un frente de surgencia persistente y espacialmente variable que puede estar asociado con una circulación de carácter ciclónico dentro de la bahía (Escribano

dynamics and structure of pelagic and benthic communities. The presence of the frontal structure may enhance the retention of larvae within the bay (Shanks *et al.* 2000), increasing the probability of survival and retention for meroplankton species.

## Acknowledgements

This work was supported by Project Mellon/Pontificia Universidad Católica, Minera Escondida Ltd./Pontificia Universidad Católica, and FONDAP/CASEB (project 6). We would like to thank our colleagues M Cerda, A Delgado and A Caro for field assistance.

---

*et al.* 2002, 2004). Una implicación mayor de la presencia de esta característica hidrográfica es el rol que ésta puede jugar en la retención de plancton y, por lo tanto, en la dinámica y estructura de las comunidades pelágicas y bentónicas en la región. La presencia del frente puede incrementar la retención de larvas dentro de la bahía (Shanks *et al.* 2000), aumentando la probabilidad de supervivencia y de retención de las especies del meroplankton.

## Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Proyecto Mellon/Pontificia Universidad Católica, Minera Escondida Limitada/Pontificia Universidad Católica, y FONDAP/CASEB (Proyecto 6). Los autores agradecen la colaboración en terreno de nuestros colegas M Cerda, A Delgado y A Caro.

## Referencias

- Avendaño M, Cantillán M. 2005. Crecimiento y estructura demográfica de *Argopecten purpuratus* en la Reserva Marina La Rinconada, Antofagasta, Chile. *Cienc. Mar.* 31: 491–503.
- Bakun A, Nelson CS. 1991. The seasonal cycle of wind stress curl in subtropical eastern boundary current regions. *J. Phys. Oceanogr.* 21: 1815–1834.
- Barbieri MA, Bravo M, Farías M, González A, Pizarro O, Yáñez E. 1995. Fenómenos asociados a la estructura térmica superficial del mar observados a través de imágenes satelitales en la zona norte de Chile. *Invest. Mar.* 23: 99–122.
- Castilla JC, Lagos NA, Guíñez R, Largier JL. 2002. Embayments and nearshore retention of plankton: The Antofagasta Bay and other examples. In: Castilla JC, Largier JL (eds.), *The Oceanography and Ecology of the Nearshore and Bays in Chile*. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, pp. 179–203.
- Emery WJ, Thomson RE. 1998. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon, New York, 632 pp.
- Escribano R, Marín VH, Hidalgo P, Olivares G. 2002. Physical-biological interactions in the pelagic ecosystem of the nearshore zone of the northern Humboldt Current System. In: Castilla JC, Largier JL (eds.), *The Oceanography and Ecology of the Nearshore and Bays in Chile*. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, pp. 145–175.
- Escribano R, Rosales SA, Blanco JL. 2004. Understanding upwelling circulation off Antofagasta (northern Chile): A three-dimensional numerical-modeling approach. *Cont. Shelf Res.* 24: 37–53.

- Figueroa D, Moffat C. 2000. On the influence of topography in the induction of coastal upwelling along the Chilean coast. *Geophys. Res. Lett.* 27: 3905–3908.
- Fonseca T, Farías M. 1987. Estudio del proceso de surgencia en la costa chilena utilizando percepción remota. *Invest. Pesq.* 34: 33–46.
- Graham WM, Largier JL. 1997. Upwelling shadows as nearshore retention sites: The example of northern Monterey Bay. *Cont. Shelf Res.* 17: 509–532.
- Kaplan DM, Largier JL, Navarrete SA, Guiñez R, Castilla JC. 2003. Large diurnal temperature fluctuations in the nearshore water column. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 57: 385–398.
- Lagos NA, Barria ID, Paolini P. 2002. Upwelling ecosystem of northern Chile: Integrating benthic ecology and coastal oceanography through remote sensing. In: Castilla JC, Largier JL (eds.), *The Oceanography and Ecology of the Nearshore and Bays in Chile*. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, pp. 117–141.
- Largier JL, Lawrence CA, Roughan M, Kaplan DM, Dever EP, Dorman CE, Kudela RM, Bollens SM, Wilkerson FP, Dugdale RC, Botsford LW, Garfield N, Kuebel Cervantes B, Koracin D. 2006. WEST: A northern California study of the role of wind-driven transport in the productivity of coastal plankton communities. *Deep Sea Res. II*, *in press*.
- Narváez DA, Poulin E, Leiva G, Hernández E, Castilla JC, Navarrete SA. 2004. Seasonal and spatial variation of nearshore hydrographic conditions in central Chile. *Cont. Shelf Res.* 24: 279–292.
- Pizarro O, Hormazábal S, González A, Yáñez E. 1994. Variabilidad del viento, nivel del mar y temperatura en la costa norte de Chile. *Invest. Mar.* 22: 85–101.
- Rodrigues RR, Lorenzetti JA. 2001. A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the southeast Brazilian coastal upwelling. *Cont. Shelf Res.* 21: 371–394.
- Schaffer G, Pizarro O, Djurfeldt L, Salinas S, Rutllant J. 1997. Circulation and low frequency variability near the Chilean coast: Remotely forced fluctuations during the 1991–92 El Niño. *J. Phys. Oceanogr.* 27: 217–235.
- Send U, Beardsley RC, Winant CD. 1987. Relaxation from upwelling in the coastal ocean dynamics experiment. *J. Geophys. Res.* 92: 1683–1698.
- Shanks AL, Largier JL, Brink L, Brubaker J, Hooff R. 2000. Demonstration of the onshore transport of larval invertebrates by the shoreward movement of an upwelling front. *Limnol. Oceanogr.* 45: 230–236.
- Soto-Mardones L, Parés-Sierra A, Durazo R. 2004. Ekman modulation of the sea-surface temperature on the Eastern South Pacific. *Deep-Sea Res. II*, 51: 551–561.
- Strub PT, Mesías JM, Montecino V, Rutllant J, Salinas S. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. In: Robinson AR, Brink KH (eds.), *The Sea*. Vol. 11. Wiley, New York, pp. 273–313.
- Ulloa O, Escribano R, Hormazábal S, Quiñónez R, Ramos M, González R. 2001. Evolution and biological effects of the 1997–98 El Niño in northern Chile. *Geophys. Res. Lett.* 28: 1591–1594.

*Recibido en febrero de 2006;  
aceptado en noviembre de 2006*