

Surgencia costera en la zona central de Chile, durante el ciclo El Niño-La Niña 1997-1999.

Coastal upwelling in central Chile during El Niño-La Niña cycle 1997-1999.

MÓNICA BELLO^a
M^a ÁNGELA BARBIERI^{b/c}
SERGIO SALINAS^c
LUIS SOTO^d

^aServicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada.

^bInstituto de Fomento Pesquero.

^cPontificia Universidad Católica de Valparaíso.

^dUniversidad del Bío-Bío.

RESUMEN

Las variaciones espacio-temporales de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y series costeras de vientos y nivel del mar se analizaron desde octubre de 1997 a septiembre de 1999 en la zona central de Chile (32°-36° S, 71°-75° W). Durante este período el área de estudio estuvo afectada por el fenómeno El Niño 1997-98 y La Niña 1998-99, permitiendo identificar diferencias en las estructuras térmicas superficiales. En el evento cálido (El Niño), se presentaron isotermas de agua fría en la franja costera (surgencia) más cálidas que un período normal y menores gradientes de temperatura desde la costa hacia el océano que en el evento frío (La Niña). Los eventos de surgencia fueron más frecuentes en La Niña.

Se identificaron tres áreas de surgencia costera: Valparaíso (32,5°-33,1° S) con el foco en punta Curaumilla, al sur de San Antonio (33,5°-34,2° S) con el foco en punta Topocalma y al sur de Constitu-

ción (34,9°-35,9° S) con el foco en cabo Carranza y punta Nugurne. Los pulsos de viento produjeron descensos en el nivel del mar y enfriamientos costeros, con una duración de 3 a 15 días, donde las orientaciones de la lengua surgente de cada área, estaban asociadas a vientos del S y SW. En el evento cálido, el agua surgente del área de Valparaíso se orientó hacia el W y NW para vientos del S, mientras que al sur de San Antonio mantuvo una dirección predominante hacia el NW y al sur de Constitución principalmente hacia el W para vientos del S. Mientras que en un evento frío, la orientación predominante del agua surgente fue hacia el W con vientos del SW y al sur de San Antonio también hacia el W, pero con vientos del S más intensos que los observados durante El Niño.

ABSTRACT

Spatial and temporal variations of sea surface temperature (TSM) and coastal series of winds and sea level were analyzed from

Palabras claves: El Niño, La Niña, Surgencia, Temperatura, nivel de mar, viento.

Key words: El Niño, La Niña, upwelling, temperature, sea level, winds.

October from 1997 to September of 1999 in the central zone of Chile (32°-36° S, 71°-75° W). During this period the study area was affected by the El Niño 1997-98 and La Niña 1998-99 phenomena, allowing the identification of differences in surface thermal structures. During El Niño event warmer than normal waters were observed in the coastal margin, where typical upwelling cold waters dominate during normal periods. Smaller temperature gradients offshore than in the cold event (La Niña) were also observed. The upwelling events were more frequent during La Niña periods.

Three coastal upwelling cells were identified: Valparaíso (32,5°-33,1° S) with its focus at Punta Curaumilla, south of San Antonio (33,5°-34,2° S) with its focus at Punta Topocalma and south of Constitución (34,9°-35°,9° S) with its focus at Cabo Carranza and Punta Nugurne. Wind events of 3 to 15 days produced lowering in the sea level near the coast and coastal cooling. The orientation of the upwelling tongue at each cell, was associated to winds from the S and SW. During the warm event the tongue of upwelled water at Valparaíso was oriented toward the W and NW for winds from the S, while a predominant direction toward the NW was observed south of San Antonio and mainly toward the W south of Constitución for winds from the S. On the other hand, in the cold event the dominant orientation of the upwelled water in Valparaíso was toward the W for winds from the SW, and south of San Antonio it was also toward the W but for winds from the S and more intense than those observed during El Niño.

INTRODUCCIÓN

En los océanos, los centros de mayor productividad biológica se encuentran localizados a lo largo de los bordes orientales. En esas áreas se producen importantes centros de surgencia costera generados por la dirección dominante del viento, orientación de la costa y efecto de la rotación de la tierra (Smith, 1968; 1995). Este aflora-

miento de agua subsuperficial, provoca una disminución de temperatura superficial del mar y oxígeno disuelto, un aumento de nutrientes, logrando que estas zonas sean referilizadas, favoreciendo la productividad primaria (Glantz, 1996; Voituriez & Jacques, 2000).

A lo largo de la costa chilena, es usual la ocurrencia de surgencia costera entre las latitudes 18° S y 38° S debido a la orientación de la costa y al régimen de vientos, donde predominan los del S y SW, éstos son el resultado de la presencia del anticiclón subtropical del Pacífico sur oriental (Bakun & Nelson, 1991). Fonseca & Farías (1987) mencionan que en teoría la surgencia costera se puede presentar en toda la costa norte y central de Chile. Sin embargo, este proceso se ha observado en puntos específicos como bahías, puntas y cabos. En la zona central de Chile se ha identificado como un importante centro local de surgencia costera punta Curaumilla (33° S) (Brandhorst, 1971; Fonseca & Farías, 1987; Strub *et al.*, 1998) y al sur de San Antonio, donde se ha observado un notorio afloramiento de aguas frías que se extienden hacia el NW, abarcando la plataforma continental en un lapso de 3 a 4 días (Fonseca & Farías, 1987).

En términos generales, la variabilidad del sistema oceanográfico frente a las costas de Chile central, está determinada por surgencias costeras continuas, corrientes hacia el norte que llevan agua subantártica, como la intrusión de aguas subtropicales hacia el sur, la propagación de ondas atrapadas a la costa y un flujo subsuperficial hacia el polo. Desde el punto de vista dinámico, dicha variabilidad puede afectar a las corrientes, la mezcla de la columna de agua, la intensidad de las surgencias, como también la temperatura y nivel del mar sobre la plataforma y el talud continental a lo largo del sistema de la corriente de Humboldt (Shaffer *et al.*, 1997, 1999).

Durante el período de estudio, la costa de Chile fue afectada por un evento El Niño, que registró considerables anomalías

positivas de temperatura entre abril de 1997 y junio de 1998 en el océano Pacífico ecuatorial central y este (McPhaden, 1999), lo que provocó alteraciones en las pesquerías e inundaciones en la zona norte y centro del país. El Niño 1997-98 fue relativamente breve, en comparación a la condición fría (La Niña), que se desarrolló entre septiembre de 1998 y mayo del 2000 de características débil a moderado.

Este estudio tiene como objetivo identificar áreas de surgencia entre las latitudes 32° S y 36° S, analizar su variación espacial y temporal, desde octubre de 1997 a septiembre de 1999. Asimismo, identificar diferencias en las estructuras térmicas superficiales entre un evento cálido (El Niño) y frío (La Niña), y determinar las relaciones existentes entre el viento, temperatura y nivel del mar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio se dispusieron de imágenes diarias de Temperatura Superficial del Mar (TSM), provenientes del Radiómetro Avanzado de Alta Resolución (AVHRR) satélite NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), facilitadas por el Laboratorio de Percepción Remota de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Se dispuso de 452 imágenes de TSM, de las cuales se utilizaron 357, debido a que 95 imágenes tenían una cobertura de nubes sobre un 90%. El período de estudio fue separado en dos, el primero comprendió desde octubre de 1997 a septiembre de 1998 y el segundo desde octubre de 1998 a septiembre de 1999. Las imágenes de TSM abarcaron un área de 32° S a 36° S y de 71° W a 75° W, con una resolución espacial de 1 milla x 1 milla.

A partir de las imágenes diarias de TSM se calculó el promedio total y mensual para el período de estudio. De la serie mensual se obtuvieron perfiles de temperatura

provenientes de franjas paralelas a la costa a 3, 10, 30 y 60 millas. Estas señales fueron filtradas para eliminar las fluctuaciones de alta frecuencia y graficadas en función del tiempo y espacio con el fin de identificar zonas frías, cálidas y sus extensiones desde la costa a estas distancias (Barbieri *et al.*, 1995).

De cada imagen diaria de TSM se identificaron las isotermas asociadas a la franja costera y se obtuvo el rango de temperatura deseado con una precisión menor a 1 °C. Las isotermas más frecuentes para el primer y segundo período fueron de 15 °C y 13 °C respectivamente, las que fueron consideradas como indicadores de aguas de menor temperatura (surgencia). Además, se calcularon las frecuencias de estas isotermas a una distancia de 3, 10 y 30 millas de la costa. La extensión espacial y orientación de la surgencia se obtuvo midiendo la distancia más alejada desde la línea costera hacia la zona oceánica de la lengua surgente, incluyendo el ángulo que formaba sobre un eje virtual en la costa con dirección norte-sur.

La información de viento fue obtenida de las estaciones meteorológicas de punta Ángeles (33,0° S; 71,6° W), punta Panul (33,6° S; 71,6° W), cabo Carranza (35,3° S; 72,4° W) (Servicio Meteorológico de la Armada de Chile) y Bellavista (36,7° S; 73,0° W) (Universidad de Concepción).

A los datos de viento se realizó un análisis de estadística básica, frecuencia de dirección y magnitud. Se obtuvo el ciclo diario del viento y, a partir de éste, se seleccionaron las observaciones de las 14 y 20 horas, debido a que el viento en ese horario muestra una mayor persistencia en dirección y magnitud (Pizarro *et al.*, 1994). Se calcularon las componentes U y V, los ejes de máxima y mínima varianza, por medio de la matriz varianza-covarianza, y el seudo esfuerzo del viento (SES), ya que representa la señal del índice de surgencia (Letelier, 1998).

$$SES = V \cdot (V^2 + U^2)^{1/2}$$

donde, V y U son las componentes del viento en la dirección norte (V) y oeste (U).

Los datos del nivel del mar para Valparaíso fueron obtenidos en la página web University of Hawaii Sea Level Center (<http://uhslc.soest.hawaii.edu/uhslc/datai.html>), que se caracterizaron por estar referidos a un mismo nivel y sin información faltante. Estos fueron corregidos por el efecto del barómetro invertido para eliminar las fluctuaciones debido a cambios en la presión y filtrados (coseno-Lanczos de 121 pesos) para remover la marea.

Los datos de temperatura del mar medidos en la costa para Valparaíso (33,03° S; 71,63° W), fueron proporcionados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). La información faltante fue mínima, e interpolada linealmente. Para identificar y describir eventos de enfriamientos se calcularon las anomalías de temperatura, restando el promedio histórico de temperatura que fue facilitado por el SHOA (20 años de información, 1980-2000).

Para determinar la asociación entre las variables de TSM y la temperatura medida en la costa frente a Valparaíso se empleó el análisis estadístico de correlación (Bendat & Pierson, 1986). Se obtuvo una máxima correlación de 0,77, y un rezago de cero días, indicando que las series poseen un alto grado de interrelación. De esta forma los datos de TSM quedarán validados con una confianza del 90% (Pizarro, 1991).

Las series costeras de nivel del mar, seudo esfuerzo del viento y anomalía de temperatura para Valparaíso, fueron analizadas en el dominio de la frecuencia y relacionadas entre sí en las distintas bandas de frecuencias mediante un análisis de coherencia-fase (Bendat & Pierson, 1986; Jenkins & Watts, 1968).

RESULTADOS

VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA TSM

En la figura 1 se observa la distribución espacial del promedio total de la TSM. Se reportaron isotermas que fluctuaron entre 13 °C y 16 °C, y se observó un aumento de la TSM desde el sector costero al oceánico. Esta variabilidad se debió principalmente a la señal anual y el aporte de aguas frías provenientes de eventos de surgencias costeras localizadas en la zona centro-sur del área de estudio.

Las temperaturas máximas y medias para cada mes se obtuvieron de las imágenes mensuales (Fig. 2), donde se apreció claramente el dominio de la señal anual (Soto, 1999). La serie de temperatura media mensual mostró el patrón estacional, con temperaturas máximas en los meses de verano. Entre el segundo y primer período se observó una diferencia de 1,8 °C, debido fundamentalmente a que la zona de estudio estuvo afectada por El Niño 1997-1998 y La Niña 1998-99.

La figura 3 muestra la notable variabilidad de la TSM mensual en función del tiempo y espacio a 3 millas de la costa, evidenciando la clara señal anual descrita anteriormente. Desde enero a mayo de 1998, se registraron las máximas temperaturas entre los 32° S y 24° S, oscilando entre 16 °C y 19 °C, debidas principalmente al desarrollo de El Niño 1997-98. Mientras que en el segundo período las máximas temperaturas (16 °C) se presentaron en los meses de enero y febrero de 1999 durante La Niña 1998-1999.

Al comparar los perfiles de TSM mensual en función del tiempo y espacio a 3, 10, 30 y 60 millas de la costa, en términos de períodos más cálidos y fríos se distinguió una distribución de temperatura semejante. Asimismo, se observó que las temperaturas fueron aumentando gradualmente en la franja de 3 a 60 millas de la costa (Fig. 3).

ÁREAS DE SURGENCIA COSTERA

Las isotermas de 15 °C y 13 °C fueron las más frecuentes para el primer y segundo período respectivamente. Para estas isotermas se determinó la distribución latitudinal y se calculó la frecuencia de ocurrencia a 3, 10 y 30 millas desde la costa (Fig. 4). Se pudo apreciar zonas que indicaron la presencia de agua más fría, permitiendo identificar tres áreas de surgencia para la zona de estudio (Tabla I).

Tabla I. Ubicación geográfica de las áreas de surgencia.

Table I. Geographic location of upwelling cells.

Área	Latitud (° S)
1	32,5 - 33,1
2	33,5 - 34,2
3	34,9 - 35,9

En ambos períodos, el área menos frecuente fue la ubicada al norte de la zona de estudio (Fig. 4). En tanto que, durante el primer período, la segunda área de surgencia mostró frecuencias similares con la tercera área. En el segundo período, el área situada al sur presentó mayores frecuencias.

ORIENTACIÓN Y EXTENSIÓN ESPACIAL DE LA SURGENCIA COSTERA ASOCIADA CON EL VIENTO

La figura 5 muestra los vectores promedios mensuales del viento y los ejes de máxima y mínima varianza para cada estación meteorológica, apreciándose que las elipses asociadas a la varianza fueron angostas y se alinearon notablemente a la costa con más del 80% de la varianza en esta dirección.

En las estaciones de punta Ángeles y cabo Carranza, el viento reportó características similares, con valores máximos en los meses de octubre a marzo, y mínimos entre mayo y julio. En el primer período, se dis-

tinguió una importante componente favorable a la surgencia, siendo más intensa en el segundo período.

El viento mensual de punta Panul, fue el menos intenso de todas las observaciones meteorológicas y no superó los 4 m/s. Este viento débil se debió principalmente a la ubicación geográfica de la estación, debiéndose excluir esta información en los próximos análisis. El viento mensual de Talcahuano, también presentó intensidades menores que las descritas en punta Ángeles y cabo Carranza, caracterizándose por mantener la tendencia de mayores valores en primavera-verano y menores en invierno.

La orientación más frecuente de las lenguas surgentes para la primera área de surgencia, fue hacia el W en ambos períodos, siendo mayor en el segundo (Fig. 6). Estas orientaciones fueron comparadas con el viento de punta Ángeles, observándose vientos predominantes del S (46,7%) (Fig. 7) y extensiones longitudinales de las lenguas surgentes hacia el W, NW y SW con frecuencias del orden de 30%, siendo mayor hacia el W, con el 37% (Fig. 6). En el segundo período, el viento se caracterizó por presentar mayores porcentajes de vientos del SW (43,9%), distinguiéndose un aumento en las extensiones longitudinales hacia el W con el 50%.

Durante el primer período, la orientación más frecuente de las lenguas surgentes en la segunda área de surgencia, fue hacia el NW (50%) (Fig. 6), en cambio para el segundo período fue hacia el W (45%). Comparando estas orientaciones con el viento de cabo Carranza, se observó que la dirección predominante fue del S (52%) en ambos períodos (Fig. 7). Sin embargo, en el segundo período se registraron intensidades mayores del viento.

La orientación más frecuente de las lenguas surgentes en la tercera área de surgencia fue hacia el W, con 62 y 56% para el primer y segundo período respectivamente (Fig. 6). Al ser comparada con las

frecuencias de dirección del viento de cabo Carranza coincidió con los vientos predominantes del S (Fig. 7). Asimismo, en la estación de Talcahuano se distinguieron vientos predominantes del SW, con 33,3 y 41,2% para cada período. Estos resultados fueron coincidentes con la orientación de la línea de costa y la ubicación geográfica de la estación.

DURACIÓN DE LA SURGENCIA COSTERA ASOCIADA CON EL VIENTO Y NIVEL DEL MAR

Tomando como base las anomalías diarias de temperatura de la estación costera de Valparaíso (Fig. 8a), se realizó un seguimiento de los eventos de enfriamientos presentados durante el período de estudio. Se distinguieron 19 eventos de enfriamientos que variaron de un año a otro y se caracterizaron por ser alternados con períodos de relajamiento.

En el primer período se registraron 10 eventos de enfriamientos, mientras que en el segundo se distinguieron 9. Si bien, durante el período frío (La Niña 1998-99) se observa una menor cantidad de eventos de enfriamientos, estos registraron una mayor duración en el tiempo y mayores magnitudes en las anomalías negativas de temperatura. Es así como la máxima anomalía negativa de temperatura fue de $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, que correspondió al evento N° 17 que tuvo una duración aproximada de 30 días, porque incluyó tres eventos que no alcanzaron a finalizar cuando ya comenzaba el otro (Fig. 8a).

Al comparar las anomalías de temperatura con el pseudo esfuerzo del viento (SES) (Fig. 8b) y nivel del mar (Fig. 8c), en general se observó un SES favorable a la surgencia antes de una anomalía negativa de temperatura y disminución en el nivel del mar. Sin embargo, a mediados de mayo de 1998 el nivel del mar presentó un máximo de 12 cm y anomalías positivas de temperatura, como respuesta al desarrollo del fenómeno El Niño 1997-98.

En el segundo período, los eventos de enfriamiento fueron más frecuentes y registraron mayores anomalías negativas de temperatura que el primer período, principalmente porque estuvieron modulados por La Niña 1998-1999.

ANÁLISIS ESPECTRAL Y COHERENCIA-FASE

Se obtuvieron los espectros de frecuencia de las series costeras de Valparaíso correspondientes al nivel del mar, la anomalía de temperatura y el pseudo esfuerzo del viento (SES) (Figs. 9a, b y c), desde el 1° de octubre de 1997 al 30 de septiembre de 1999. La serie de nivel del mar tuvo un máximo significativo en la banda de los 0,02 cpd, frecuencia asociada al período de 50 días, en cambio la temperatura y el SES presentó un pico en la banda de los 0,03 cpd (33 días) y un aumento de densidad espectral cercano a 0,06 cpd (16 días).

Las tres series mostraron simultáneamente energía asociada en las bandas cercanas a 0,11 cpd (9 días) y 0,41 cpd (2,4 días). Además, se apreció en el nivel del mar una banda de frecuencia centrada en 0,2 cpd (5 días), mientras que en el SES se reconoció un pico en esta frecuencia. Cabe señalar que en esta frecuencia, la temperatura también mostró un aumento de densidad espectral. No obstante, el nivel del mar y SES reportan un aumento en la frecuencia de 0,27 cpd (3,7 días). En tanto que el SES y temperatura mostraron energía asociada a la frecuencia de 0,46 cpd (2,1 días).

Los resultados del análisis de coherencia cuadrada entre las series de SES y temperatura, mostraron 8 picos significativos al 95% (Fig. 10a).

El primer pico se distinguió en la frecuencia de 0,03 cpd (33 días), con una fase de -45° y un retardo en la temperatura de 3 días. En torno a la frecuencia de 0,06 (16 días), el rezago de la temperatura fue del orden de 3 días. Las frecuencias cercanas

0,11 cpd (9 días), 0,2 cpd (5 días), 0,42 cpd (2,4 días) y 0,46 cpd (2,1 días), reportaron la coherencia con un retraso en la temperatura de 1 día aproximadamente. Cabe señalar que la coherencia encontrada a la frecuencia en torno a 0,11 cpd, fue significativa al 90%, aproximadamente.

Entre las series de SES y nivel del mar, se observaron 7 picos significativos al 95% (Fig. 10b). Las coherencias encontradas en las frecuencias 0,03 cpd (33 días) y 0,04 cpd (25 días), presentaron una fase de 10° y -19° respectivamente. Las frecuencias en torno a 0,11 cpd (9 días), 0,2 cpd (5 días), 0,27 cpd (3,7 días) y 0,41 cpd (2,4 días), mostraron coherencia entre ambas series con un retraso en el nivel del mar de 1 día aproximadamente en el período de 5 y 6 días. No obstante, menor a este período casi no hubo desfase entre las series.

Entre las series del nivel del mar y temperatura, se observaron 4 máximos significativos al 95% (Fig. 10c). Las coherencias encontradas en torno a la frecuencia de 0,04 cpd (25 días), presentaron un retardo de 3 días. Mientras que las frecuencias de 0,11 cpd (9 días) y 0,42 cpd (2,4 días), mostraron que las series respondieron casi en fase.

DISCUSIÓN

Desde octubre de 1997 hasta mayo de 1998, la estructura superficial de la temperatura fue más cálida que un año normal, debiéndose principalmente a los efectos del fenómeno El Niño 1997-1998 que estaba en desarrollo. Este evento cálido fue descrito por McPhaden (1999) como uno de los más intensos, generando mayor impacto climático, que se sintió alrededor de todo el mundo. Sin embargo, en junio 1998 comenzó el término de El Niño, dando paso a una estructura superficial más fría de lo normal que se mantuvo hasta el final del período de estudio. La Niña 1998-99, fue más importante por

duración que por intensidad (Fedorov & Philander, 2000) y de características débiles a moderados.

La distribución mensual de las temperaturas medias reportó una diferencia de 2°C aproximadamente entre ambos períodos, siendo más cálido el primer período (evento cálido). Esta diferencia es coherente con la selección de las isoterms representativas para cada período (15°C y 13°C) que permitió identificar tres áreas de surgencia en la zona de estudio.

La primera área de surgencia incluyó un importante centro local de surgencia en punta Curaumilla (Valparaíso, 33°S), que ha sido reconocido por diversos autores (Johnson *et al.*, 1980; Fonseca & Farías, 1987). En ambos períodos reportó menores frecuencias que las identificadas al sur. Durante La Niña 1998-99, se observaron mayores frecuencias de la isoterma representativa hasta 10 millas de la costa.

Al sur de San Antonio ($33^\circ 30' \text{S}$) hasta punta Topocalma ($34^\circ 07' \text{S}$), se ubicó la segunda área de surgencia (Fonseca & Farías, 1987). En términos de frecuencia, durante el evento cálido alcanzó porcentajes similares a la tercera área. Mientras que en La Niña 1998-99, se pudo diferenciar como la segunda área más frecuente.

La tercera área de surgencia se extendió desde punta Duao ($34^\circ 53' \text{S}$) hasta punta Nugurne ($35^\circ 57' \text{S}$). Brandhorst (1971) y Kelly & Blanco (1984) han descrito a punta Nugurne como un centro de surgencia. Durante el evento frío (La Niña 1998-99), se pudo distinguir a esta área como la más frecuente y la que presentó mayores extensiones longitudinales del agua surgente.

A una distancia de 3 millas de la costa, las tres áreas de surgencia reportaron mayores frecuencias en su tercio central. Sin embargo, a 10 millas de la costa el área de surgencia de Valparaíso y al sur de San Antonio mostraron que este centro de

máxima frecuencia se desplazó hacia el norte, siendo más evidente al sur de San Antonio, que además presentó un remanente con la misma tendencia a 30 millas de la costa.

Si bien, existió una diferencia en términos de frecuencias de las isotermas representativas del agua surgente durante El Niño 1997-98 y La Niña 1998-99, cabe destacar que en el evento cálido no implicó una ausencia de agua surgente en la franja costera. Este resultado coincide con el estudio realizado por Huyer *et al.* (1987), sobre la surgencia costera en Perú entre los años 1981 y 1984, considerando un período normal y un evento de El Niño. Durante El Niño 1982-83 se reportaron vientos favorables a la surgencia que generaron un ascenso de aguas subsuperficiales, caracterizándose por ser más cálidas que un año normal.

Gran parte de la variabilidad de baja frecuencia intraestacional (período de 50 días) presentes en los registros de temperaturas superficial del mar, nivel del mar y corrientes frente a las costas de Perú y de la zona norte-centro de Chile, posee un origen ecuatorial (Huyer *et al.*, 1991, Shaffer *et al.*, 1997 y Pizarro, 1999). En la escala interanual esta influencia ecuatorial se encuentra fuertemente modulada por el ciclo El Niño-La Niña (Castillo, 2003).

Tal como se indicó en los resultados, los espectros de energía de las series costeras de nivel del mar y temperatura frente a Valparaíso mostraron picos altamente significativos a períodos de 30 y 60 días, los cuales estarían asociados a fluctuaciones de origen remoto tal como lo han descrito para el nivel del mar y corrientes Huyer *et al.* (1987) en las costas de Perú y Shaffer *et al.* (1997), Pizarro (1999) y Castillo (2003) en las costas norte y centro de Chile. Mientras que esta influencia intraestacional en la temperatura ha sido documentada por Hormazábal (1999) y Bello (2001).

A mayores frecuencias, el viento y la temperatura mostraron una alta coherencia

en la banda de 0,06 cpd (16 días) con un rezago de 3 días. En tanto que el viento, la temperatura y el nivel del mar se relacionaron en las bandas centradas en 0,11 cpd (9 días) y 0,41 cpd (2,4 días). Estas bandas de frecuencia han sido relacionadas a la influencia local del viento (Shaffer *et al.*, 1997), especialmente en la banda de 2 días. Sin embargo, la banda de 10 días además de presentar un forzamiento local puede tener relación con un origen remoto (Enfield *et al.*, 1987, Shaffer *et al.*, 1997, Pizarro, 1999 y Shaffer *et al.*, 1999) asociado a ondas mezcladas de Rossby-Gravedad (Enfield *et al.*, 1987, Pizarro, 1999 y Castillo, 2003).

La señal anual del viento a lo largo de la costa estuvo caracterizada por vientos predominantemente del S y SW. Las variaciones de amplitud en los pulsos de viento, reportaron valores máximos en verano y mínimos en invierno, siendo consistente con lo observado por Pizarro (1991), Pizarro *et al.* (1994) y Letelier (1998) en la zona norte de Chile. Las variaciones del viento, pueden ser explicadas por el desplazamiento estacional del anticiclón del Pacífico Sur (Fuenzalida, 1990; Pizarro *et al.*, 1994).

La ubicación de las estaciones meteorológicas juega un rol importante, debido a que el eje principal sobre el cual ocurren las perturbaciones se orientó en una dirección aproximadamente norte-sur paralelo a la costa con una componente favorable a la surgencia, que prevaleció casi todo el año, siendo más intensa y estable en verano, coincidiendo con los resultados obtenidos por Pizarro *et al.* (1994) en la zona norte de Chile.

Las orientaciones de la lengua surgente de las tres áreas de surgencia estaban asociadas a vientos del S y SW. En el área de Valparaíso, el agua surgente se orientó hacia el W con vientos del SW. Mientras que al sur de San Antonio, se desplazó preferentemente hacia el NW con vientos del S y magnitudes frecuentes en el rango de 1 a 4,9 m/s. Este resultado coincidió con lo descrito por Fonseca & Farías (1987),

quienes distinguieron una lengua surgente bastante notoria al sur de San Antonio, extendiéndose hacia el NW y ocupando toda la plataforma continental en sólo 3 a 4 días. Sin embargo, el agua surgente de esta área se orientó hacia el W cuando aumentó la frecuencia de magnitud en el rango de 5 a 8,9 m/s. No obstante, el agua surgente del área al sur de Constitución, se orientó hacia el W con vientos del S.

CONCLUSIONES

Estudios de fluctuaciones intraestacionales, han mostrado que perturbaciones de origen ecuatorial como el fenómeno El Niño y La Niña, pueden llegar a dominar la variabilidad de las temperaturas y el nivel del mar de las costas de Perú y Chile. Es así, como las imágenes diarias de Temperatura Superficial del Mar (TSM), permitieron observar diferencias en los valores de TSM y en las estructuras térmicas superficiales entre un evento cálido (El Niño 1997-98) y evento frío (La Niña 1998-99).

Durante El Niño, se presentaron isotermas de agua fría en la franja costera, que estaban asociadas a procesos locales como surgencia, caracterizándose por ser más cálidas que un período normal y reportar menores gradientes de temperatura desde la región costera hacia la oceánica que durante La Niña.

Se identificaron tres áreas de surgencia en el área de estudio: Valparaíso (32°,5-33°,1 S) con el foco en punta Curaumilla, al sur de San Antonio (33,5°-34,2° S) con el foco en punta Topocalma y al sur de Constitución (34,9°-35,9° S) con el foco en cabo Carranza y punta Nugurne, donde las orientaciones del agua surgente estaban asociadas a vientos del S y SW. Durante La Niña los eventos de surgencia son más frecuentes y se registran mayores extensiones longitudinales desde la costa hacia el océano.

En la banda intraestacional, las series costeras de nivel del mar y temperatura fue-

ron moduladas por oscilaciones de baja frecuencia de origen ecuatorial. A frecuencias más altas, el viento y la temperatura fue altamente coherente en la banda de 16 días con un rezago de 3 días. Por otra parte, la relación entre la temperatura y el nivel del mar, estuvo centrada en la banda de 9 y 2 días, respondiendo a pulsos de viento con un retraso entre 1 y 2 días. Estos pulsos de viento produjeron descensos en el nivel del mar y enfriamientos costeros, con una duración de 3 a 15 días.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue realizado dentro del marco del proyecto Fondef D9811022 "Mejoramiento de la eficiencia de flotas pesqueras industriales de cerco mediante el uso de cartas satelitales de zonas probables de pesca en la zona norte de Chile" a cargo del Dr. Eleuterio Yáñez. Agradecemos al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), al Servicio Meteorológico de la Armada de Chile (SMA) y la Universidad de Concepción por las facilidades prestada en la adquisición de datos. Asimismo, al Laboratorio de Percepción Remota de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso por la disponibilidad de imágenes diarias de satélite de temperatura superficial del mar.

REFERENCIAS

- Bakun, A. & C. Nelson. 1991. The seasonal cycle of wind stress curl in sub-subtropical eastern boundary current regions. *J. Phys. Oceanogr.*, 21: 1.815-1.834.
- Barbieri, M. A., M. Bravo, M. Farías, A. González, O. Pizarro & E. Yáñez. 1995. Fenómenos asociados a la estructura térmica superficial del mar observados a través de imágenes satelitales en la zona norte de Chile. *Invest. Mar., Valparaíso*, 23: 99-122.

- Bello, M. 2001. Variabilidad espacial y temporal de los eventos de surgencia costera en la zona central de Chile (32-36° S, 71-75° W), octubre 1997-septiembre 1999. Tesis para optar al Título de Oceanógrafo, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 88 pp.
- Bendat J. & A. Pierson, 1986. Random data, analysis and measurement procedures. John Wiley & Sons, New York, 566 pp.
- Brandhorst, W., 1971. Condiciones oceanográficas estivales frente a la costa de Chile. Rev. Biol. Mar., Valparaíso, 14(3): 45-84.
- Castillo, M. 2003. Influencia de oscilaciones oceánicas de origen ecuatorial en las fluctuaciones de baja frecuencia de las corrientes y nivel del mar a lo largo de la costa de Chile central. Tesis para optar al Título de Oceanógrafo, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 103 pp.
- Enfield, D., M. del P. Cornejo-Rodríguez, R. Smith & P. Newberger. 1987. The equatorial source of propagating variability along the Peru coast during the 1982-1983 El Niño. J. Geophys. Res., 92: 14.335-14.346.
- Fedorov, A. & S. Philander. 2000. Is El Niño Changing? Science, 288: 1997-2002.
- Fonseca, T. & M. Farías. 1987. Estudio del proceso de surgencia en la costa chilena utilizando percepción remota. Invest. Pesq., 34: 33-46.
- Fuenzalida, R. 1990. Variabilidad temporal de un índice de surgencia para la zona de Iquique (Lat. 20° S). Invest. Cient. y Technol., Ser. Cienc. Mar, 1: 37-47.
- Glantz, M. 1996. Corrientes de Cambio: El Impacto de "El Niño" sobre el Clima y la Sociedad. Cambridge University Press, Cambridge, 141 pp.
- Hormazábal, S. 1999. Propagación de ondas de baja frecuencia a lo largo de la costa centro-norte de Chile: modulación de las propiedades físicas del océano costero. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias con mención en Física. Universidad de Concepción, 79 pp.
- Huyer, A., R. Smith & T. Paluszkiwes. 1987. Coastal upwelling off Perú during normal and El Niño times, 1981-1984. J. Geophys. Res., 92(13): 14.297-14.307.
- Huyer, A., M. Krull, T. Paluszkiwes & R. Smith. 1991. The Perú undercurrent: A study in variability. Deep. Sea. Res., 38 (1): 247-271.
- Jenkins, G. & M. Watts. 1968. Spectral analysis and its applications, Holden-Day, San Francisco, 525 pp.
- Johnson, D., T. Fonseca & H. Sievers. 1980. Upwelling in the Humboldt coastal current near Valparaíso, Chile. J. Mar. Res., 38 (1): 1-16.
- Kelly, R. & J. Blanco. 1984. Proceso de surgencia en punta Nugurne (Lat. 36° S). Invest. Pesq., 31: 89-94.
- Letelier, J. 1998. Estudio de la variabilidad de los eventos de surgencia, entre Arica (18° 29' S, 70° 19' W) y Tocopilla (22° 05' S, 70° 11' W), observado en imágenes de satélite durante febrero y marzo de 1991 y 1992. Tesis para optar al Título de Oceanógrafo, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 66 pp.
- McPhaden, M. 1999. Genesis and Evolution of the 1997-98 El Niño. Science, 283: 950-954.
- Pizarro, O. 1991. Propagación y forzamiento de perturbaciones de baja frecuencia del nivel del mar en la costa norte de Chile. Tesis para optar al Título

- lo de Oceanógrafo, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 110 pp.
- Pizarro, O., S. Hormazábal, A. González & E. Yáñez, 1994. Variabilidad del viento, nivel del mar y temperatura en la costa norte de Chile. *Invest. Mar.*, Valparaíso, 22: 83-101.
 - Pizarro, O. 1999. Low frequency fluctuations in the Eastern Boundary Current off South America: Remote and local forcing. Ph. D. Thesis. Earth Sciences Centre, Göteborg, 102 pp.
 - Shaffer, G., O. Pizarro, L. Djurfeldt, S. Salinas & J. Rutllant. 1997. Circulation and low-frequency variability near the Chilean coast: Remotely forced fluctuations during the 1991-92 El Niño. *J. Phys. Oceanogr.*, 27 (2): 217-235.
 - Shaffer, G., S. Hormazábal, O. Pizarro & S. Salinas. 1999. Seasonal and interannual variability of current and temperature off center Chile. *J. Geophys. Res.*, 104: 29.951-29.961.
 - Silva, N. 1973. Variaciones estacionales de temperatura, salinidad y contenido de oxígeno en la zona costera de Valparaíso. *Invest. Mar.*, Valparaíso, 4 (3): 89-112.
 - Smith, R., 1968. Upwelling. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 6: 11-46.
 - Smith, R. 1995. The Physical processes of coastal ocean upwelling systems. In: C. Summerhayes, K. Emeis, M. Angel, R. Smith and B. Zeitzschel (eds.). *Upwelling in the ocean: Modern processes and ancient records*. John Wiley & Sons, pp. 39-64.
 - Soto, L. 1999. Variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar en el golfo de California. *Ciencias Marinas*, 25 (1): 1:30.
 - Strub, T., M. Mesías, V. Montecino, J. Rutllant & S. Salinas. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. In: A. Robinson and K. Brink (eds.). *The Sea*. John Wiley & Sons, 11: 273-313.
 - Voituriez, B. & G. Jacques. 2000. *El Niño: Fact and Fiction*, UNESCO, Francia, 142 pp.

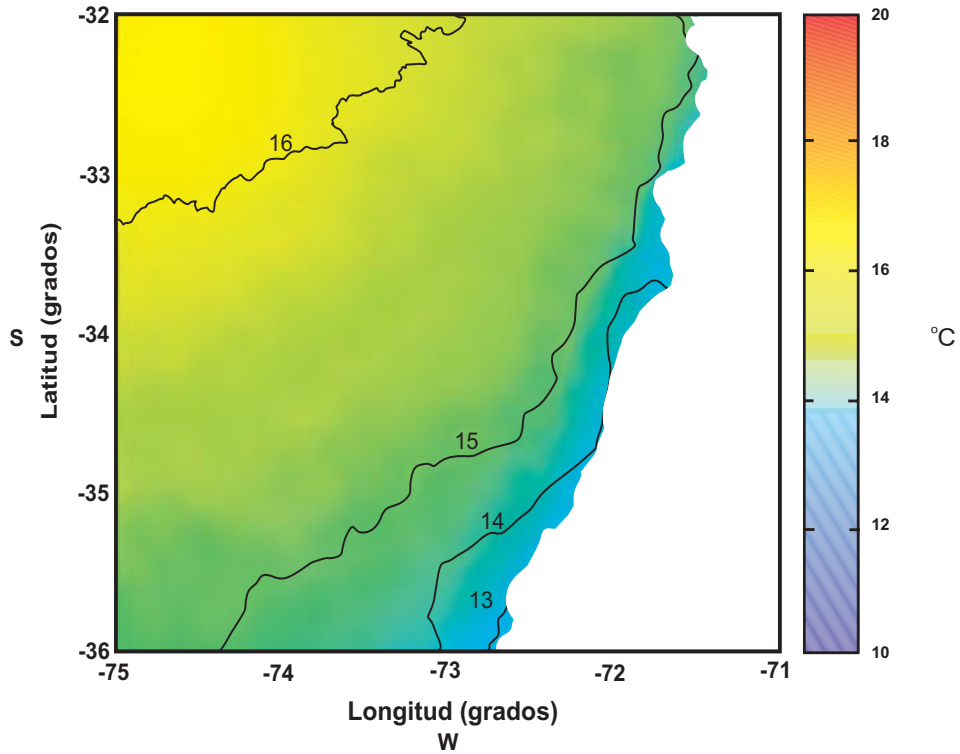


Fig. 1: Temperatura superficial del mar promedio.

Fig. 1: Mean sea surface temperature.

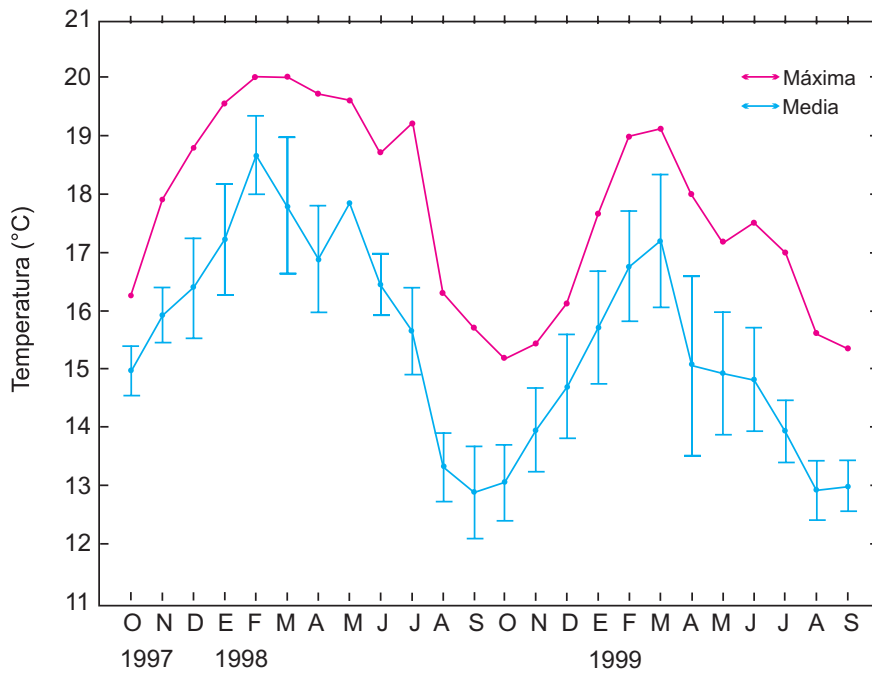


Fig. 2: Serie mensual de temperaturas máximas y medias.

Fig. 2: Montly series of maximum and mean temperatures.

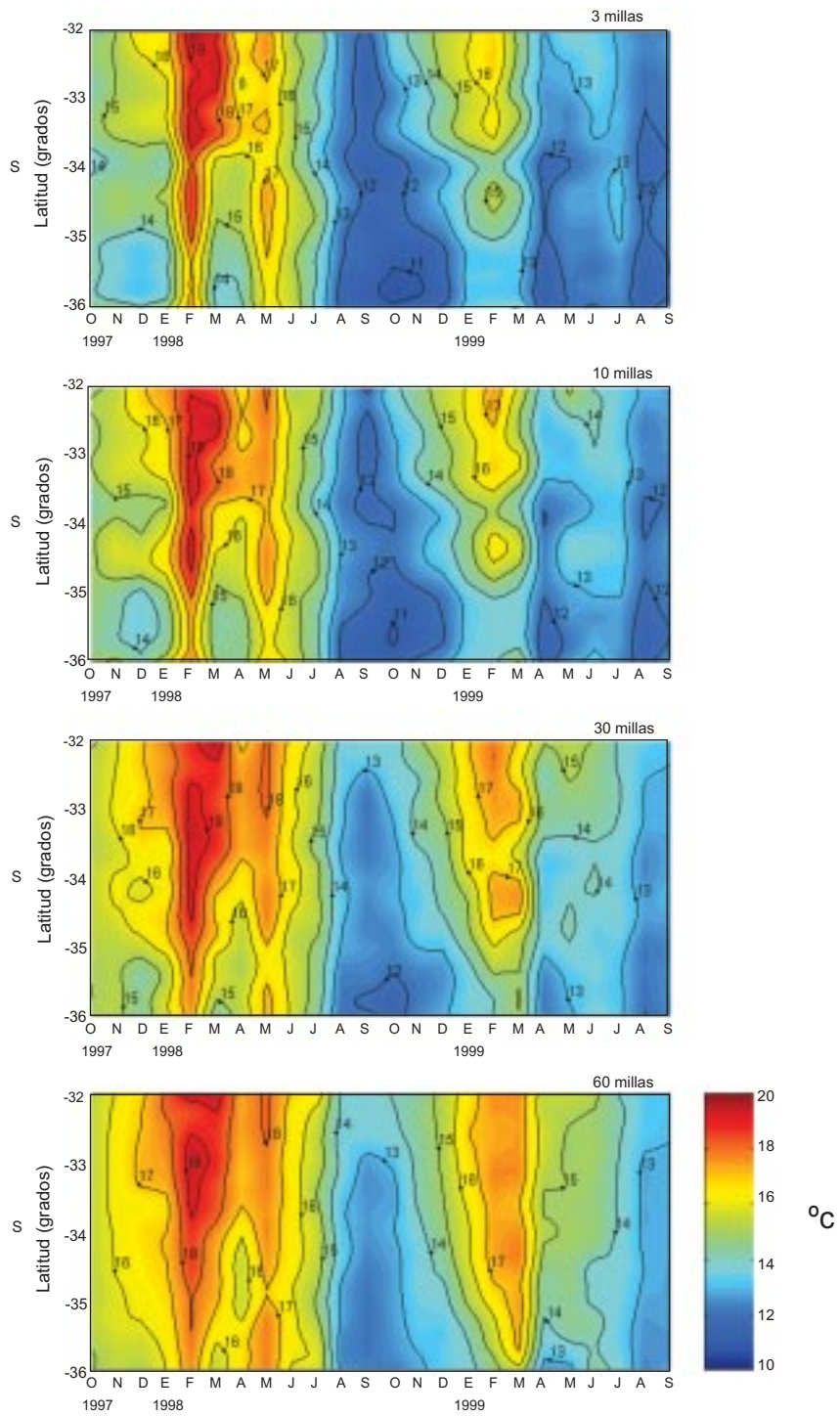


Fig. 3: Serie temporal y espacial de perfiles de temperatura a 3, 10, 30 y 60 millas desde la costa.

Fig. 3: Temporal and spatial series of temperature profiles at 3, 10, 30 and 60 nautical miles offshore.

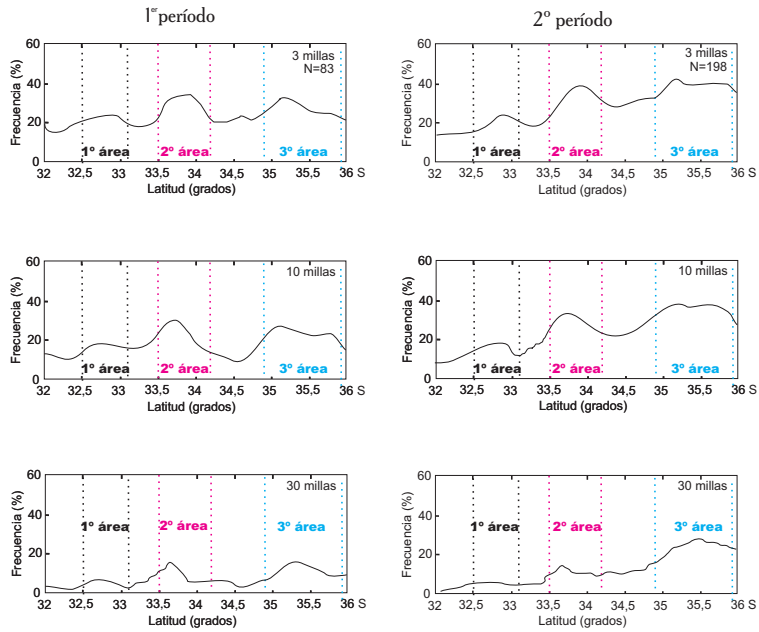


Fig. 4: Frecuencia latitudinal de isotermas representativas a 3, 10 y 30 millas desde la costa.

Fig. 4: Latitudinal frequency of representative isotherms at 3, 10, and 30 nautical miles offshore.

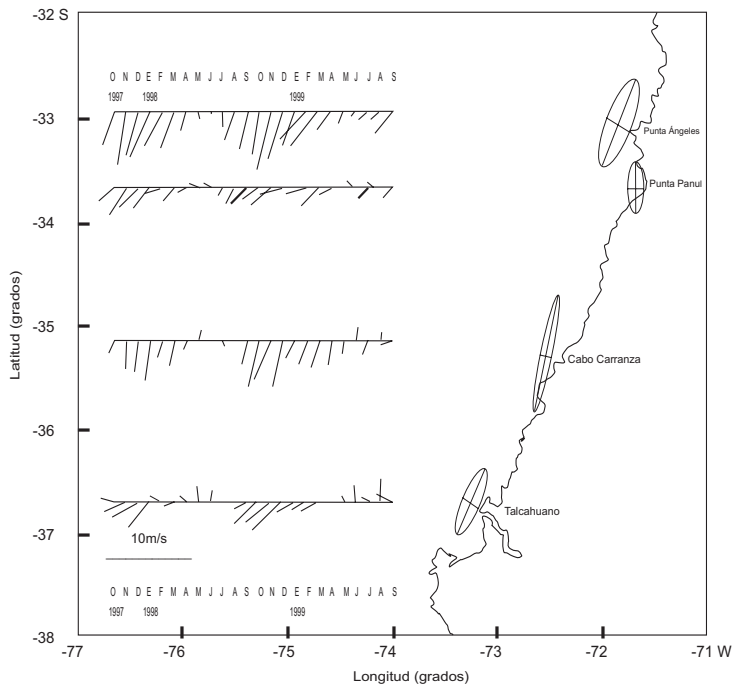
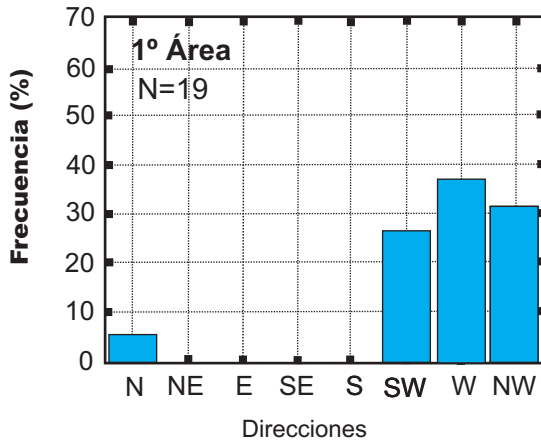


Fig. 5: Vectores promedios mensuales del viento y elipses asociadas a los ejes de máxima y mínima varianza.

Fig. 5: Monthly averages of wind vectors and ellipses associated to the orthogonal variance axes.

1^{er} período



2^o período

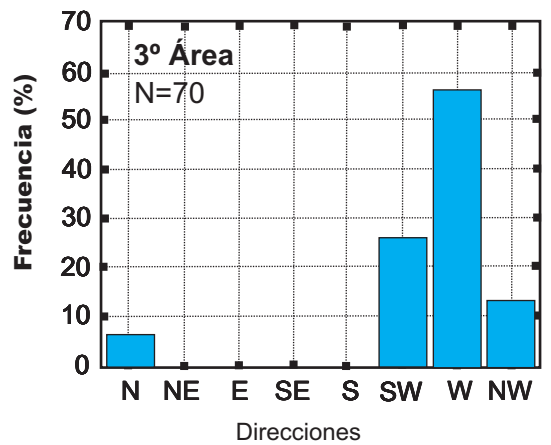
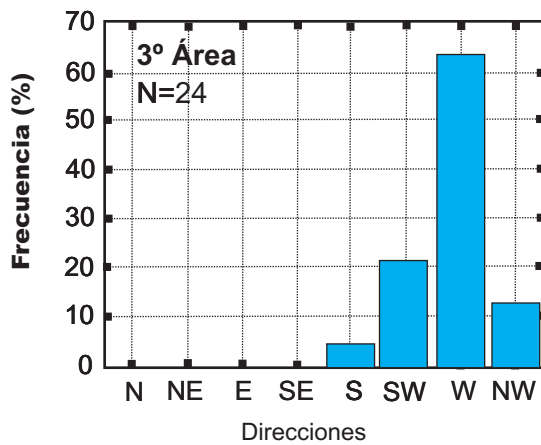
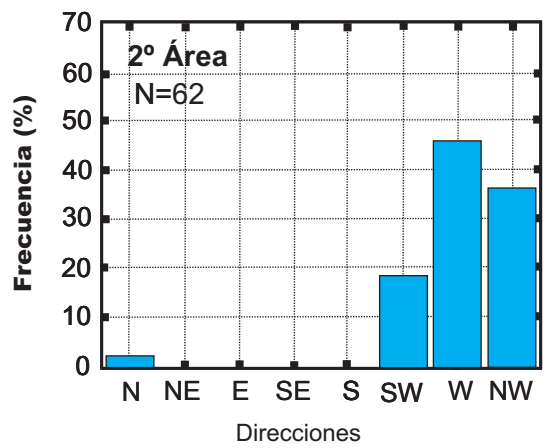
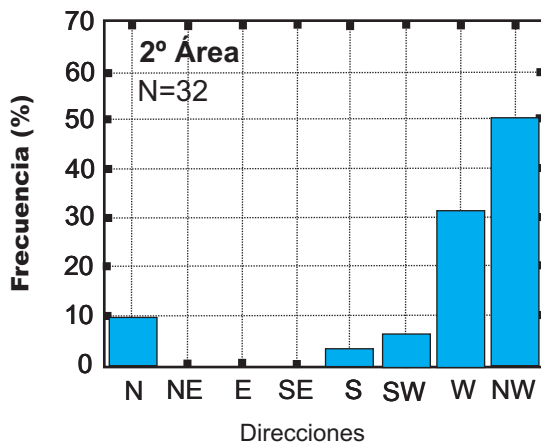
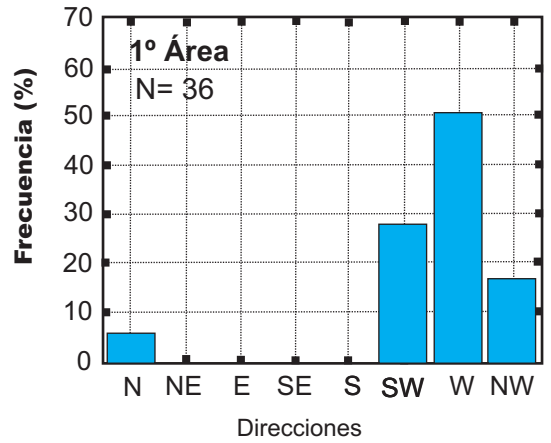
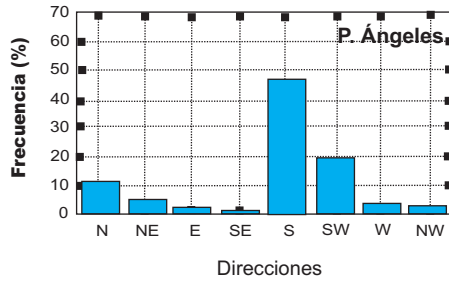


Fig. 6: Frecuencia de dirección de la lengua surgente.

Fig. 6: Frequency of direction of the upwelling tongue.

1^{er} período



2^o período

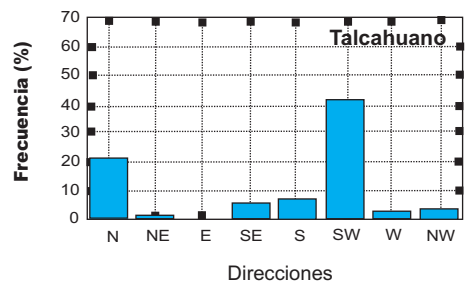
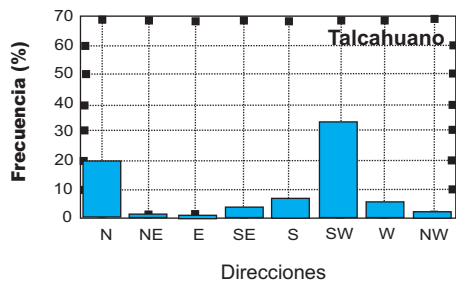
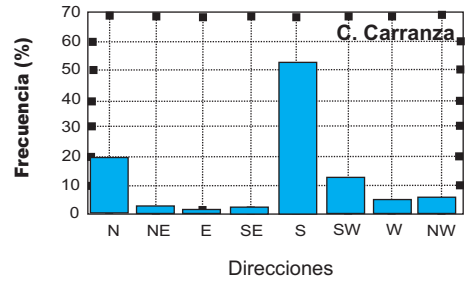
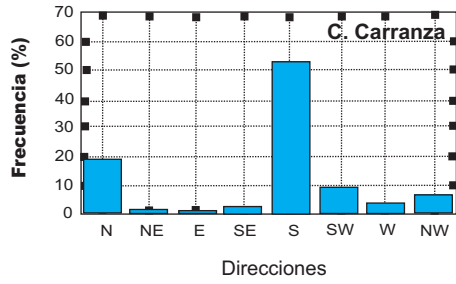
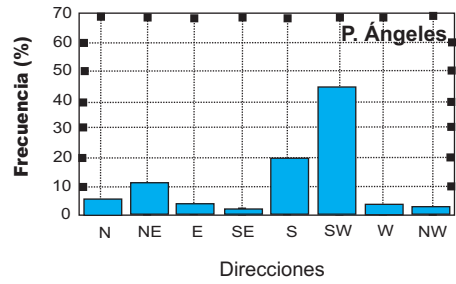


Fig. 7: Frecuencia de dirección del viento.

Fig. 7: Wind direction histogram.

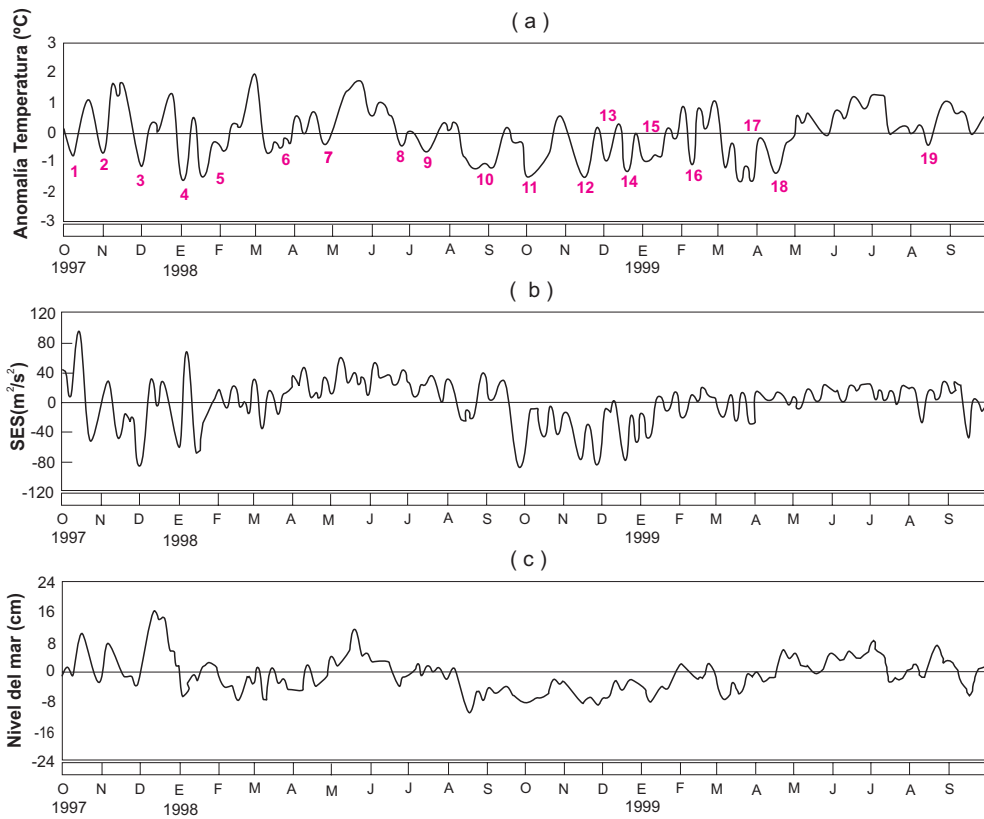


Fig. 8: Series costeras de Valparaíso: (a) anomalía de temperatura, (b) pseudo esfuerzo del viento y (c) nivel del mar.

Fig. 8: Coastal time series at Valparaíso: (a) temperature anomaly, (b) wind pseudo-stress and (c) sea level.

Fig. 9: Espectros de las series costera: (a) nivel del mar, (b) anomalía de temperatura y (c) pseudo esfuerzo del viento.

Fig. 9: Coastal time series spectra: (a) sea level, (b) sea temperature anomaly and (c) wind pseudo-stress.

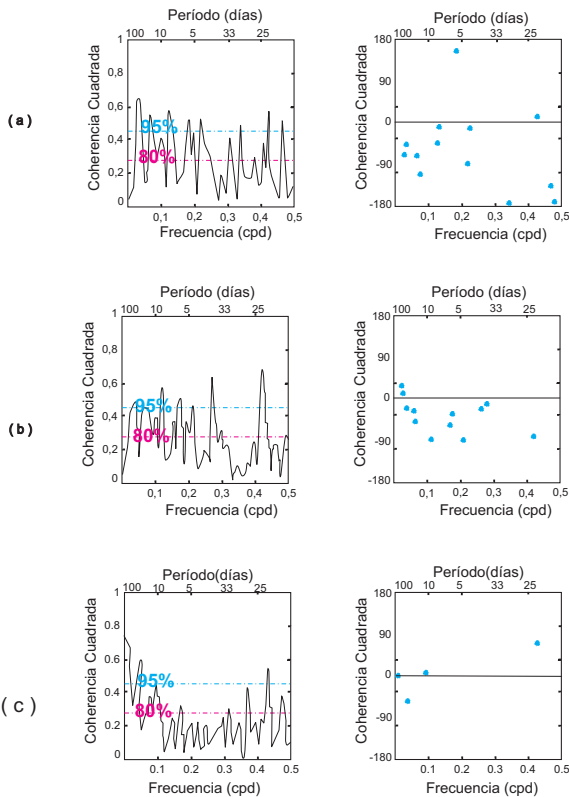
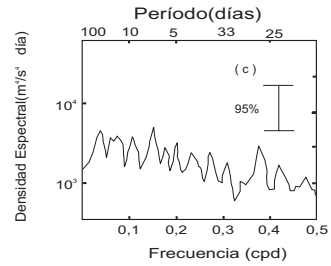
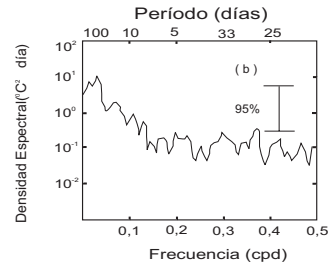
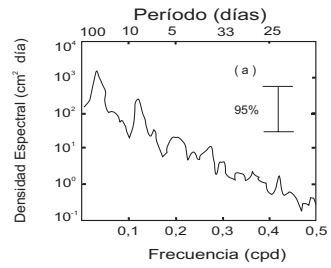


Fig. 10: Coherencia cuadrada y fase entre las series costeras: (a) pseudo esfuerzo del viento - anomalía de temperatura, (b) pseudo esfuerzo del viento - nivel del mar y (c) nivel del mar - anomalía de temperatura.

Fig. 10: Square coherence and phase of coastal time series: (a) wind pseudo-stress - anomaly of temperature, (b) wind pseudo-stress - sea level (c) sea level - sea temperature anomaly.