

Condiciones oceanográficas frente a Valparaíso durante la fase fría del ciclo ENOS 1997-2000

Oceanographic conditions off Valparaíso during the cold phase of the ENSO cycle 1997-2000

MÓNICA BELLO
JENNY MATURANA

Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada
Errázuriz 254, Playa Ancha, Valparaíso.

RESUMEN

Se analizaron las condiciones oceanográficas durante la fase fría del ciclo ENOS 1997-2000, frente a la costa de Chile central, a partir de mediciones de temperatura, salinidad, oxígeno, series costeras de nivel del mar y anomalía de temperatura superficial del mar frente a Valparaíso. A fin de evaluar el origen remoto de fluctuaciones intraestacionales (períodos entre 30 a 90 días) en la zona central de Chile, se incluyeron registros de nivel del mar de una estación costera de Perú (Callao).

Las fluctuaciones observadas en el nivel del mar de Callao, registraron oscilaciones intraestacionales posiblemente moduladas por perturbaciones de origen ecuatorial que se propagaron como ondas atrapadas a la costa por el borde oriental del Pacífico, reflejándose en la dinámica de corrientes frente a Valparaíso como un flujo hacia el sur, con un núcleo de mayor salinidad y bajas concentraciones de oxígeno centrado a 180 m de profundidad. Por otra parte, las velocidades geostroficas frente a Valparaíso mostraron un sistema de corrientes y contracorrientes que fluyeron en forma paralela a la costa, con una intensificación de las velocidades en otoño.

Palabras claves: El Niño, La Niña, surgencia, temperatura, nivel del mar, corrientes.

ABSTRACT

The oceanographic conditions during the cold phase of the ENSO cycle 1997-2000 off central Chile were analyzed, using data from oceanographic CTD casts, coastal sea level data and sea surface temperature anomalies in front of Valparaíso, as well as sea level data from Callao, Perú to study the remote origin of intraseasonal fluctuations (30 to 90 days periods) and its effect in the geostrophic current system in front of Valparaíso.

The observed fluctuations of sea level data in Callao showed intraseasonal oscillations likely modulated by perturbations of equatorial origin, which propagated as coastal trapped waves through the eastern boundary of the Pacific Ocean, with an expression in the current dynamics off Valparaíso as a southward flow, with a core of high salinity and low dissolved oxygen, centered at 180 m depth. On the other hand, geostrophic velocities show a system of alongshore currents and counter-currents with intensification during fall.

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

INTRODUCCIÓN

El Niño Oscilación del Sur (ENOS) es un fenómeno natural que se conoce como una perturbación interanual del sistema climático, donde el océano y la atmósfera actúan acopladamente en la cuenca del Pacífico tropical. Además, se conoce como ciclo ENOS porque oscila entre una fase cálida (El Niño), y una fase fría (La Niña) (McPhaden, 1999).

El entendimiento del ciclo ENOS, está relacionado con el desplazamiento de ondas ecuatoriales conocidas como ondas de Kelvin y ondas largas de Rossby (McPhaden, 2001; Castillo, 2003). La propagación de estas ondas se realiza a lo largo del océano Pacífico ecuatorial, causando el ascenso y descenso de la termoclina ecuatorial (decenas de metros), lo que se ve reflejado en el nivel del mar, como también en la intensidad y dirección de las corrientes oceánicas (Clarke & Van Gorder, 1994; Shaffer *et al.*, 1997).

Esta dinámica ha sido estudiada por diversos autores, los cuales señalan que gran parte de la variabilidad observada en la temperatura superficial del mar, el nivel del mar y las corrientes a lo largo de las costas de Perú y Chile posee fluctuaciones intraestacionales de origen remoto (Cornejo-Rodríguez *et al.*, 1987; Enfield, 1987; Huyer *et al.*, 1991; Shaffer *et al.*, 1997; Pizarro, 1999).

Debido a los efectos adversos del ciclo ENOS 1997-2000 en nuestro país, principalmente por los daños causados en agricultura, infraestructura vial, pesquerías, entre otros, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) implementó desde 1999, un monitoreo sistemático de las características oceanográficas frente a la zona central de Chile (Valparaíso), mediante cruceros oceanográficos semestrales a los cuales se les ha dado el nombre de "cruceros ENOS".

El presente trabajo tiene como objetivo principal realizar una breve descripción

de las condiciones oceanográficas observadas frente a la costa de Chile central, durante la fase fría del ciclo ENOS 1997-2000, mediante el análisis de datos oceanográficos obtenidos en los cruceros ENOS y de series costeras de nivel del mar y anomalía de temperatura superficial del mar frente a Valparaíso. Por otra parte, para evaluar el origen remoto de fluctuaciones intraestacionales en la zona central de Chile, se considera el nivel del mar de una estación costera de Perú (El Callao).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se incluyó una sección gráfica longitudinal de anomalía de temperatura superficial del mar (TSM) para establecer las condiciones oceanográficas del Pacífico ecuatorial durante el ciclo ENOS 1997-2000. Esta gráfica fue obtenida del sitio web del proyecto TOGA-TAO Project Office (2004).

Por otro lado, para conocer las fluctuaciones de la temperatura frente a Valparaíso (33° 02' S) durante la fase fría del ciclo ENOS, se obtuvieron las anomalías mensuales de TSM desde 1999-2000, las cuales fueron proporcionadas por el SHOA. Además, se utilizó información oceanográfica de cuatro cruceros de investigación realizados a bordo del AGOR "Vidal Gormaz" entre los años 1999 y 2000 (Tabla I).

Estos cruceros se extendieron desde la costa hasta 200 millas náuticas (mn) con un total de 22 estaciones (Fig. 1). Sin embargo, para este estudio se consideraron las estaciones de la transecta 1 como representativas del área de estudio. Las mediciones de tempera-

Tabla I. Información de cruceros ENOS.

Table I. ENOS cruises information.

Cruceros ENOS	Año	Período
1	1999	07 - 11 de abril
2	1999	21 - 24 de noviembre
3	2000	02 - 06 de mayo
4	2000	06 - 09 de septiembre

tura, salinidad y oxígeno disuelto se realizaron con un CTD-SBE19, alcanzando una profundidad máxima de 1.000 m. Los resultados son presentados como secciones de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y velocidad geostrofica (calculada a un nivel de referencia de 1.000 db).

Para evaluar posibles fluctuaciones intraestacionales frente a Valparaíso, se utilizaron registros horarios del nivel del mar para la estación de Callao (12° 03' S, 77° 09' W) y Valparaíso (33° 02' S, 71° 38' W) desde el año 1999 al 2000. Estos datos fueron obtenidos del sitio web Sea Level Center (2004), y se caracterizaron por estar referidos a un mismo nivel y no presentar brechas considerables sin registros.

Las serie horarias de nivel del mar presentaron períodos cortos sin información (menores a dos días), los cuales se calcularon a partir del pronóstico y los residuales (Foreman, 1993). Posteriormente, estas series fueron filtradas con un filtro Coseno-Lanczos de 121 pesos y poder medio de 40 horas, para remover las oscilaciones de marea, obteniéndose los promedios diarios del nivel del mar. Las series diarias sin tendencia serán llamadas de aquí en adelante como anomalías del nivel del mar. El nivel del mar de Callao no fue ajustado por presión atmosférica debido a que las fluctuaciones son débiles (Spillane *et al.*, 1987; Huyer *et al.*, 1991; Shaffer *et al.*, 1997; Pizarro *et al.*, 2002). En cambio, la serie de Valparaíso fue corregida para eliminar las fluctuaciones debidas a cambios en la presión atmosférica.

RESULTADOS

El ciclo ENOS 1997-2000

A principios de enero de 1998 se observó un máximo de anomalías de TSM, con valores de 4,0 °C en la zona oriental del Pacífico ecuatorial (Fig. 2), las cuales disminuyeron rápidamente a comienzos de junio de 1998, registrándose anomalías de hasta -0,5 °C, principalmente en el sector ubicado entre los 150° W-90° W. Esta disminución implicó el colapso del evento cálido, dando inicio a

nueva condición o fase fría del ciclo ENOS (La Niña), que se hizo más evidente a partir del mes de septiembre de 1998, con anomalías del orden de -2,0 °C en casi la totalidad del océano Pacífico ecuatorial (180°-100° W). El enfriamiento de la superficie del océano frente a la costa Sudamericana, alcanzó pleno desarrollo desde el mes abril de 1999, con valores superiores a -1,0 °C.

Durante los años 1999 y 2000, se continuaron presentando anomalías de TSM típicas de la fase fría del evento (La Niña 1998-2000) a lo largo de todo el Pacífico tropical, las que se mantuvieron bajo distintos pulsos de debilitamiento y reforzamiento.

Condiciones oceanográficas frente a Valparaíso

Los cruceros ENOS fueron realizados en condiciones anormalmente frías en el océano Pacífico tropical, las cuales también se manifestaron en los registros de temperatura de la estación costera de Valparaíso (Fig. 3).

Temperatura

En los cruceros realizados en otoño (ENOS 1 y 3), la distribución de la temperatura del mar en la capa superficial (0 a 100 m) es similar en el sector oceánico, con valores superiores a 15 °C (Fig. 4). Mientras que, en el sector costero se presentó una diferencia de 2 °C aproximadamente. Esta similitud no fue registrada durante los cruceros de primavera (ENOS 2 y 4), ya que se observó una mayor homogeneidad entre la temperatura de las estaciones costeras con respecto a aquellas de la zona oceánica.

En el crucero ENOS 1, se observó una termoclina bien desarrollada que tendió a intensificarse en profundidad desde la costa hacia el oeste. Por otra parte, en ENOS 3 se apreció una termoclina desde la estación 7 a la 11, que se ubicó aproximadamente a 50 m de profundidad. Mientras que, en los cruceros ENOS 2 y 4 no se distinguió una termoclina marcada.

La capa de mezcla para ENOS 1 se caracterizó por profundizarse desde la costa hacia el oeste, alcanzando una profundidad de 50 m. En tanto que, en ENOS 2 no se evidenció una capa de mezcla. En ENOS 3, se apreció una capa de mezcla de 50 m pero sólo en el área oceánica (estaciones 7-11). Finalmente, en ENOS 4 se observó la máxima capa de mezcla, la cual alcanzó los 100 m de profundidad desde la estación 5 a la 11.

En el sector oceánico se observó un comportamiento similar en los cuatro cruceros, las temperaturas decrecieron gradualmente desde los 10 °C a los 200 m de profundidad hasta los 4 °C alrededor de los 900 m.

Salinidad

Las salinidades superficiales durante el crucero ENOS 1 (Fig. 5), mostraron un leve aumento desde las estaciones más costeras (~34,2 psu) hacia las más oceánicas (~34,3 psu). Por otra parte, en ENOS 2 se registraron salinidades del orden de 0,2 psu más bajas que las observadas en ENOS 1, mientras que en ENOS 4 se registró una diferencia de 0,1 psu con respecto a en ENOS 1.

En el período otoñal, las distribuciones verticales de la salinidad en los cruceros ENOS 1 y 3 presentaron una distribución similar. Se encontró, entre los 50 y 100 m el mínimo subantártico, con salinidades del orden de 34,1 psu. En torno a los 200 m, se presentó un máximo de salinidad (34,6 psu). En el crucero ENOS 3 este máximo salino subsuperficial se caracterizó por ser más intenso, con salinidades sobre los 34,7 psu centrado en los 150 m de profundidad.

Un nuevo mínimo de salinidad apareció en torno a los 600 m, que se caracterizó por ser menos intenso que el observado en la capa subsuperficial. Su profundidad promedio se mantuvo entre los 550 y 650 m para ENOS 1, 2 y 3, con salinidades del orden de 34,3 psu. Estos niveles de salinidad no mostraron tener una variación significativa entre los cruceros. Alrededor de los 1.000 m de profundidad, la

salinidad comenzó a aumentar levemente, alcanzando valores en torno de los 34,4 psu, para ambos años de estudio.

Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto presentó un comportamiento similar al observado en la salinidad, destacándose una capa superficial con concentraciones sobre los 5 mL·L⁻¹ en todos los cruceros (Fig. 6). Bajo la capa superficial la concentración de oxígeno disuelto comenzó a disminuir, alcanzando valores de 1 mL·L⁻¹ en torno a los 200 m. En los cruceros ENOS 1 y 3 se registró un núcleo con bajas concentraciones (1 mL·L⁻¹) que se extendió desde la costa hasta las 80 mn.

Bajo el mínimo de oxígeno disuelto descrito anteriormente, la concentración aumentó gradualmente hasta los 5,2 mL·L⁻¹ en la zona oceánica de los cruceros ENOS 1 y 3. Mientras que, en los ENOS 2 y 4 la concentración fue del orden de 4,0 mL·L⁻¹, tanto en el sector costero como el oceánico. Entre los 800 y 1.000 m de profundidad, la concentración de oxígeno disuelto disminuyó nuevamente hasta alcanzar valores de 3 mL·L⁻¹ para todos los cruceros.

Circulación

En las aproximaciones de velocidad geostrofica que se obtuvieron en los cruceros de otoño (ENOS 1 y 3), apareció un sistema de corrientes y contracorrientes que fluye en forma paralela a la costa frente a Valparaíso (Fig. 7). Se identificó en la zona costera un flujo al sur dentro de las 40 mn en ENOS 1, con velocidades máximas de 16 cm s⁻¹ en superficie. En cambio en ENOS 3 se encontró localizado entre las 40 a 80 mn de la costa, con velocidades máximas de 16 cm s⁻¹ a 150 m de profundidad. Ambos flujos se extendieron desde la superficie hasta los 800 m aproximadamente.

Al oeste de este flujo al sur, se observó un flujo al norte, que en ENOS 1 se encontró ubicado entre las 45 y 65 mn, hasta los 50 m de profundidad, con una velocidad máxima de 4 cm s⁻¹ en superficie. En tanto que, en ENOS 3

este flujo se registró entre las 80 y 150 mn, caracterizándose por extenderse hasta los 300 m aproximadamente, y por presentar velocidades mayores de 20 cm s^{-1} en superficie.

En el crucero ENOS 1, se localizó otro flujo al sur entre 50 y 120 mn, con velocidades máximas de 4 cm s^{-1} centrado a 200 m de profundidad, mientras que, en ENOS 3 este flujo se encontró más alejado de la costa, entre las 160 y 185 mn, con una velocidad máxima de 6 cm s^{-1} en superficie. Nuevamente se aprecia un flujo al norte, que en ENOS 1 se ubicó entre las 160 a 200 mn de la costa, extendiéndose hasta los 800 m de profundidad, con una velocidad máxima sobre 18 cm s^{-1} en superficie. En cambio para ENOS 3, este flujo se aprecia levemente entre las 180 y 200 mn, abarcando una profundidad menor a la observada en ENOS 1, con una velocidad máxima 6 cm s^{-1} en superficie.

Las velocidades geostroficadas calculadas para los cruceros ENOS 2 y 4, mostraron un flujo al norte dentro de las 80 mn. Por otra parte en ENOS 2, se registró un flujo al sur entre las 80 y 120 mn, con velocidades que fluctuaron entre 2 y 4 cm s^{-1} , que se extendieron hasta los 400 m de profundidad. Sobre las 130 a 200 mn desde la costa se apreció un flujo al norte con velocidades sobre los 8 cm s^{-1} , alcanzando una profundidad de 250 m.

Nivel del Mar

En las series de anomalías del nivel del mar para las estaciones de Callao y Valparaíso (Fig. 8), se apreciaron oscilaciones de alta frecuencia del orden de 10 días, como también su ciclo anual. En Callao, se observaron perturbaciones intraestacionales (períodos entre 30 a 90 días) que son reflejadas en el nivel del mar de Valparaíso. Sin embargo, a fin de definir si dichas oscilaciones son de origen ecuatorial, se aplicó un filtro pasa banda entre 20 y 120 días a ambas series (Emery & Thomson, 1997) (Fig. 9), donde se encontró que bastantes de las oscilaciones intraestacionales son comunes y que la mejor correlación se obtiene a 14 días.

Las estimaciones espectrales para el nivel del mar de las estaciones de Callao y Valparaíso fueron realizadas con 12 grados de libertad y un intervalo de confianza del 95% (Fig. 10). En ambas estaciones, la mayor energía se registró entre la banda de 30 a 60 días aproximadamente. Además, se apreció un aumento significativo de la densidad espectral cercana a los 10 días. Sin embargo, la banda de los 13 días es significativamente más energética en Callao.

DISCUSIÓN

En los últimos 20 años, considerando el período 1980-2000, el océano Pacífico ha experimentado cuatro fases completas del ciclo ENOS (cálido-frío). Dentro de las fases cálidas destacan las ocurridas en los años 1982-1983 y 1997-1998 como eventos de intensidad fuerte. Por otro lado, las fases frías que sobresalen son las ocurridas en los años 1988-1989 y 1998-2000, ésta última con una duración inusualmente larga (Castillo, 2003). En relación al ciclo ENOS 1997-2000, McPhaden (2001) indica que la fase cálida (El Niño 1997-98) es considerada como uno de los eventos más intensos, que tuvo una duración breve, del orden de un año. Por otro lado, la fase fría se caracterizó por ser débil a moderada y se mantuvo hasta el año 2000 (Castillo, 2003).

A partir del año 1999 el SHOA inició un programa sistemático de mediciones oceanográficas frente a Valparaíso. Estas observaciones fueron motivadas por el comienzo de condiciones anormalmente frías en el océano Pacífico tropical, las que se observaron en los registros de temperatura de la estación costera de Valparaíso (Fig. 3). Con respecto a los perfiles de temperatura obtenidos en los cruceros de otoño, éstos mostraron en la capa superficial mayores valores que los registrados en primavera; esta variabilidad está asociada principalmente a la señal anual de la temperatura.

Por otra parte, en los cruceros de otoño se identificó el mínimo subantártico en-

tre los 50 y 100 m de profundidad, con salinidades del orden de 34,1 psu, coincidiendo con lo observado por Sievers & Silva (1982) frente a Valparaíso, quienes detectaron dicho mínimo a 100 m. En torno a los 200 m, se presentó un máximo de salinidad (34,6 psu) y un mínimo de oxígeno disuelto ($1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$), que está asociado a la masa de Agua Ecuatorial Subsuperficial (Silva & Know, 1975). La presencia de esta masa de agua fue más intensa en el crucero ENOS 3 y menos evidente en los cruceros de primavera.

Cercano a los 600 m de profundidad se registró un nuevo mínimo de salinidad, que se destacó por ser menos pronunciado que el observado en la capa subsuperficial. Además, se percibió un aumento en la concentración de oxígeno disuelto. Estas características corresponden al Agua Intermedia Antártica, cuyo núcleo se encuentra ubicado en los 500 y 600 m (Silva & Know, 1975). Cabe destacar que la presencia de esta masa de agua fue más determinante en los cruceros de otoño que en los de primavera. Entre los 800 y 1.000 m de profundidad la salinidad comenzó a aumentar y la concentración de oxígeno disuelto a disminuir, lo que evidenció la presencia de la masa de Agua Profunda del Pacífico (Silva & Know, 1975) tanto para los cruceros de otoño como los de primavera.

Diversos estudios plantean que la variabilidad observada en la temperatura, nivel del mar y corrientes a lo largo de las costas de Perú y Chile son moduladas por oscilaciones de baja frecuencia en el Pacífico ecuatorial (Enfield, 1987; Shaffer *et al.*, 1997; Pizarro, 1999; Castillo, 2003). Es así como, el análisis espectral realizado a las series de nivel del mar de Callao y Valparaíso mostraron mayor energía en la banda intraestacional, con un máximo cercano a los 50 días, la que correspondería a fluctuaciones generadas durante la fase fría del ciclo ENOS 1997-2000. El orden de esta energía fue similar a la descrita por Castillo (2003) en las series de Callao y Valparaíso que consideraron los eventos La Niña ocurridos desde el año 1991 al 2000.

La influencia de la corriente subsuperficial Perú-Chile en la dinámica de las costas chilenas ha sido estudiada por varios investigadores, quienes han documentado que es un flujo hacia el polo, con un núcleo centrado en los 150 m, el que registra una mayor salinidad, bajas concentraciones de oxígeno y su variabilidad está asociada a oscilaciones de origen ecuatorial (Huyer, 1991; Shaffer *et al.*, 1997; Hormazábal, 1999; Pizarro *et al.*, 2001). En el crucero ENOS 3, se apreció un flujo al sur con velocidades geostóficas del orden de 14 cm s^{-1} , con un núcleo centrado a 180 m aproximadamente. Por otra parte, los perfiles de temperatura mostraron en la zona costera una separación de las isotermas (Fig. 4), que a su vez coincidió con el núcleo de mayor salinidad (Fig. 5) y bajas concentraciones de oxígeno (Fig. 6). En la región costera, el hundimiento de la isoterma de $11 \text{ }^\circ\text{C}$ estuvo asociado a un levantamiento del nivel del mar que sería generado por una perturbación que viajó desde el norte hacia el sur, ya que dicha oscilación fue registrada en la estación de Callao 14 días antes, siendo consistente con la teoría de propagación de ondas atrapadas a la costa (Huyer, 1991; Shaffer *et al.*, 1997; Pizarro *et al.*, 2001).

Por otra parte, las fluctuaciones del nivel del mar de las estaciones de Callao y Valparaíso observadas en la banda de 10 días presentaron un forzamiento local que pudo estar asociado a ondas mezcladas de Rossby-Gravedad (Enfield *et al.*, 1987; Pizarro, 1999; Castillo, 2003). El estudio realizado por Enfield *et al.* (1987) en las costas de Perú indicó que parte de la variabilidad interdiaria del nivel del mar, entre los 5 a 12 días, es generada por este tipo de ondas y que a su vez son forzadas por vientos zonales.

En general, las aproximaciones de velocidad geostófica obtenidas en los cruceros ENOS mostraron un sistema de corrientes y contracorrientes con flujos paralelos a la costa frente a Valparaíso (Fig. 7). Se encontraron diferencias entre los cruceros de otoño y primavera, donde la circulación varió en intensidad y en ubicación longitudinal, observándose flujos de mayor magnitud durante otoño. Los cruceros realizados en

otoño presentaron flujos hacia el sur cercanos a la costa con máximos en torno a 150 m de profundidad. Esto coincidió con los resultados de Hormazábal (1994), quien en un estudio estacional realizado en los 30° S, encontró un flujo dentro de los 40 km de la costa para las épocas de primavera, otoño e invierno. Del mismo modo, los cruceros ENOS 1 y 3 mostraron un flujo hacia el sur menos intenso pero más alejado de la costa, que correspondería a la contracorriente Perú-Chile. Esta corriente superficial hacia el polo, se extiende desde los 8°-35° S y se ubica entre los 100-300 km de la costa (Strub *et al.*, 1995).

La información oceanográfica recopilada entre 1991 y 1992 frente a los 30° S indicó que, los flujos hacia el sur de la corriente subsuperficial hacia el polo y la contracorriente de Perú-Chile están separados por una corriente superficial hacia el ecuador (Shaffer *et al.*, 1995). Esta corriente se apreció en las secciones de velocidad geostrofica de los cruceros de otoño (Fig. 7). Por otra parte, en el área más oceánica de las secciones, se observó un flujo hacia el ecuador, principalmente en los cruceros ENOS 1, 2 y 3, siendo más intenso en ENOS 1. Este flujo en dirección norte se localizó cercano a las 200 mn de la costa, no tiene un efecto directo sobre las corrientes costeras y se conoce como corriente de Humboldt (Strub *et al.*, 1998). Por otra parte, Hormazábal (1994) describió una corriente hacia el ecuador que se ubicó entre los 40-100 km fuera de la costa en las estaciones de otoño, invierno y primavera, alcanzando profundidades de hasta 800 m, con características similares a la corriente de Humboldt pero costera. Esta corriente hacia el norte coincidió con lo observado en los cruceros de primavera, donde el flujo tendió a acercarse a la costa.

A lo largo de la costa chilena no sólo influyen oscilaciones de origen remoto, además se tienen procesos de carácter local como la surgencia costera que puede ser modulada por vientos predominantes del S y SW (Bakun & Nelson, 1991), provoca el ascenso de aguas más frías en la costa, como también un aumento de nutrientes que favorecen la productividad prima-

ria (Glantz, 1996; Voituriez & Jacques, 2000). La presencia de aguas más frías en la costa puede presentarse como focos casi permanentes frente a la zona costera de Coquimbo y Valparaíso (Fonseca & Fariás, 1987; Shaffer, 1997; Bello, 2001). Sin embargo, durante un evento La Niña, es común observar una intensificación de este proceso, lo que explicaría las temperaturas frías observadas en las estaciones cercanas a la costa en la mayoría de los cruceros ENOS.

CONCLUSIONES

En los cruceros de otoño fueron más evidente el mínimo subantártico (entre 50 y 100 m), el núcleo del Agua Ecuatorial Subsuperficial (en torno a los 200 m) y el núcleo del Agua Intermedia Antártica (cercano a los 600 m). Tanto para los cruceros de otoño como los de primavera, se registró la presencia de la masa de Agua Profunda del Pacífico entre los 800 y 1.000 m de profundidad.

Las aproximaciones de velocidad geostrofica mostraron un sistema de corrientes y contracorrientes que fluyeron en forma paralela a la costa frente a Valparaíso. En términos generales la circulación varió en intensidad y ubicación longitudinal, dependiendo de la estación del año, pero generalmente fue más intensa durante la época otoñal, donde el sistema de corrientes se acentuó durante la estación de otoño.

Parte de las fluctuaciones registradas en el nivel del mar de Callao durante la fase fría del ciclo ENOS 1997-2000 estuvieron asociadas a oscilaciones intraestacionales que fueron percibidas frente a la costa de Valparaíso. Esta variabilidad estuvo modulada por perturbaciones de origen ecuatorial que se propagaron por el borde oriental del Pacífico como ondas atrapadas a la costa, lo que se apreció en la dinámica de corrientes frente a Valparaíso como un flujo hacia el sur, con un núcleo de mayor salinidad y bajas concentraciones de oxígeno que estuvo centrado a 180 m de profundidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), por el apoyo que brinda a la investigación marina con la realización de los cruces ENOS. Asimismo al Dr. Óscar Pizarro del Programa Regional de Oceanografía Física y Clima (PROFC) de la Universidad de Concepción, por las contribuciones realizadas durante el desarrollo del trabajo y a los oportunos comentarios del Sr. Manuel Castillo del SHOA.

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.
- 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.
- 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.
- Clarke, A. & S. Van Gorder. 1994. On ENOS coastal current and sea level. *J. Phys. Oceanogr.*, 24: 661-679.
- Cornejo-Rodríguez, M. & D. Enfield. 1987. Propagation and forcing of high-frequency sea level variability along the west coast of South America. *J. Geophys. Res.*, 92: 14.323-14.334.
- Emery, W. & R. Thomson. 1997. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. BPC Wheatons, Great Britain, 632 pp.
- Enfield, D. 1987. The intraseasonal oscillation in eastern Pacific sea level- How is forced? *J. Phys. Oceanogr.*, 17: 1.860-1.876.
- 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.
- Fonseca, T. & M. Farías. 1987. Estudio del proceso de surgencia en la costa chilena utilizando percepción remota. *Invest. Pesq.*, 34: 33-46.
- Foreman, M. 1993. *Manual for tidal high analysis and prediction*. Pacific Marine Science Report 77-10. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay. Sidney, B. C., 63 pp.
- 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. 1994. Características de la circulación oceánica y costera frente a Coquimbo, Chile (30° S). Tesis para optar al Título de Oceanógrafo, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 131 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 Magíster en Ciencias con mención en Física. Universidad de Concepción, 79 pp.
- Huyer, A., M. Krull, T. Paluszkiwes & R. Smith. 1991. The Perú undercurrent: A study in variability. *Deep. Sea. Res.*, 38(1): 247-271.

- McPhaden, M. 1999. Genesis and Evolution of the 1997-98 El Niño. *Science*, 283: 950-954.
- McPhaden, M. 2001. El Niño and La Niña: causes and global consequences. En: M. Cracken y J. Perry (eds.). *Encyclopedia of global environmental change*, 1, John Wiley & Sons, New York, pp. 353-370.
- 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.
- Pizarro, O., A. Clarke & S. Van Gorder. 2001. El Niño sea level and currents along the South America coast: Comparison of observations with theory. *J. Phys. Oceanogr.*, 31: 1.891-1.903.
- Pizarro, O., G. Shaffer, B. Dewitte & M. Ramos. 2002. Dynamics of seasonal and interannual variability of the Peru-Chile undercurrent. *Geophys. Res. Letter*, 29 (12): 22-1- 22-4.
- Shaffer, G., S. Salinas, O. Pizarro, A. Vega & S. Hormazábal. 1995. Currents in the deep ocean off Chile (30° S). *Deep-Sea Res.*, 42: 425-436.
- 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.
- Sievers, H. & Silva, N. 1982. Masas de agua y circulación geostrófica frente a la costa de Chile entre latitudes 18° S y 33° S (Operación Oceanográfica MARCHILE VII). *Cienc. Tecnol. Mar*, 6: 61-99.
- Silva, N. & H. Know. 1975. Contribución al conocimiento de las masas de agua en el Pacífico Sudoriental. Expedición KRILL. Crucero 3-4. Julio-Agosto 1974. *Com. Perm. Pacífico Sur*, 3: 63-75.
- Silva, N. & S. Neshyba. 1979. On the southernmost extension of Peru-Chile undercurrent. *Deep-Sea Res.*, 26: 1.387-1.393.
- Spillane, MC., D. Enfield & J. Allen. 1987. Intraseasonal oscillations in sea level along the west coast of the Americas. *J. Phys. Oceanogr.*, 17: 313-325.
- Strub, T., J. Mesías & C. James. 1995. Altimeter observations of the Perú-Chile Countercurrent. *Geophys. Res. Lett.*, 22 (3), 211-214.
- 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 y Sons, 11: 273-313.
- TOGA-TAO Project Office de la National Oceanographic and Atmospheric Administration, www.pmel.noaa.gov/tao/, revisado el 01 de junio de 2004.
- Voituriez, B. & G. Jacques. 2000. El Niño: Fact and Fiction, UNESCO, Francia, 142 pp.

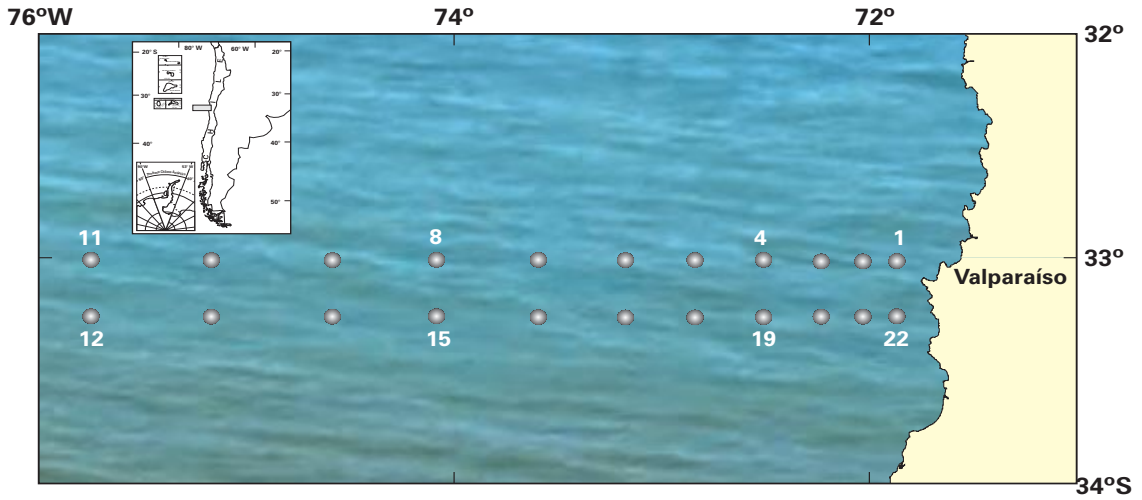


Fig. 1: Posición de las estaciones oceanográficas de los cruceros ENOS.

Fig. 1: Location of the oceanographic stations of ENOS cruises.

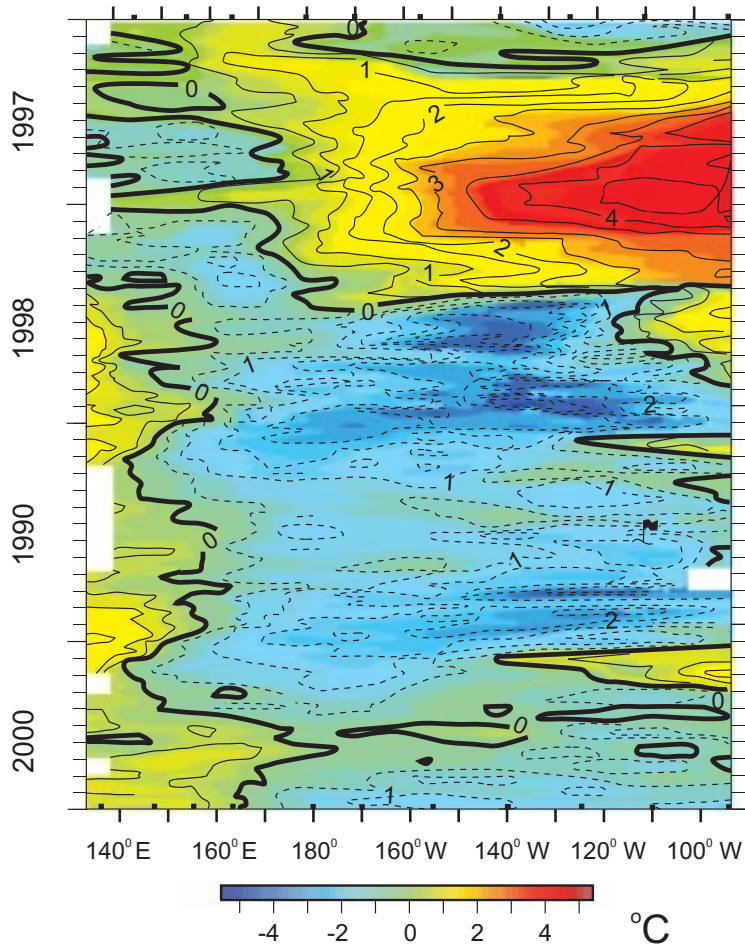


Fig. 2: Anomalía de temperatura superficial del mar a lo largo del ecuador. Fuente: TAO Project Office/PMEL/NOAA.

Fig. 2: Sea surface temperature anomaly along the equator. Source TAO Project Office/PMEL/NOAA.

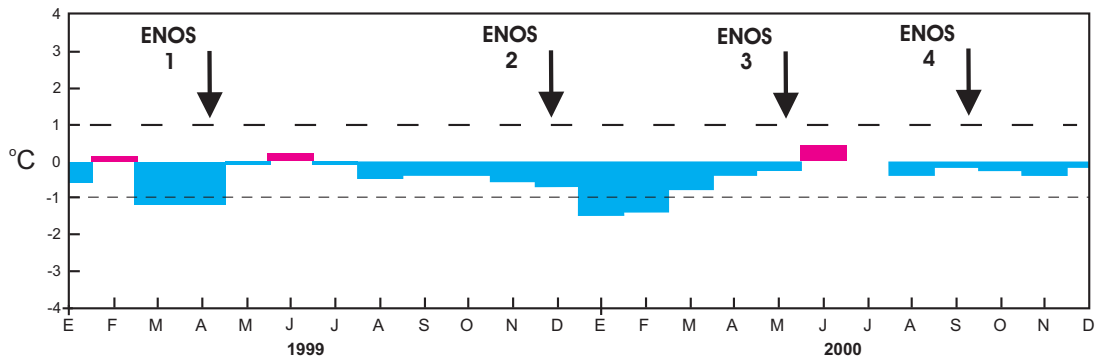


Fig. 3: Anomalías mensuales de temperatura superficial del mar para la estación costera de Valparaíso.

Fig. 3: Monthly sea surface temperature anomalies at Valparaíso coastal station.

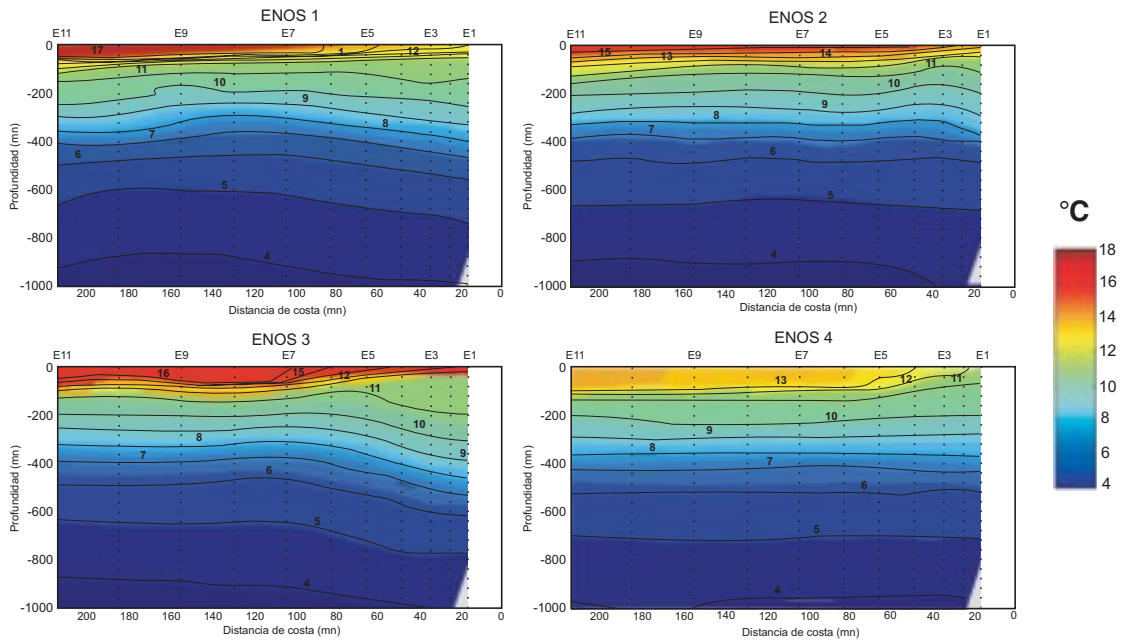


Fig. 4: Distribución vertical de temperatura frente a Valparaíso.

Fig. 4: Vertical distribution of temperature off Valparaíso Bay.

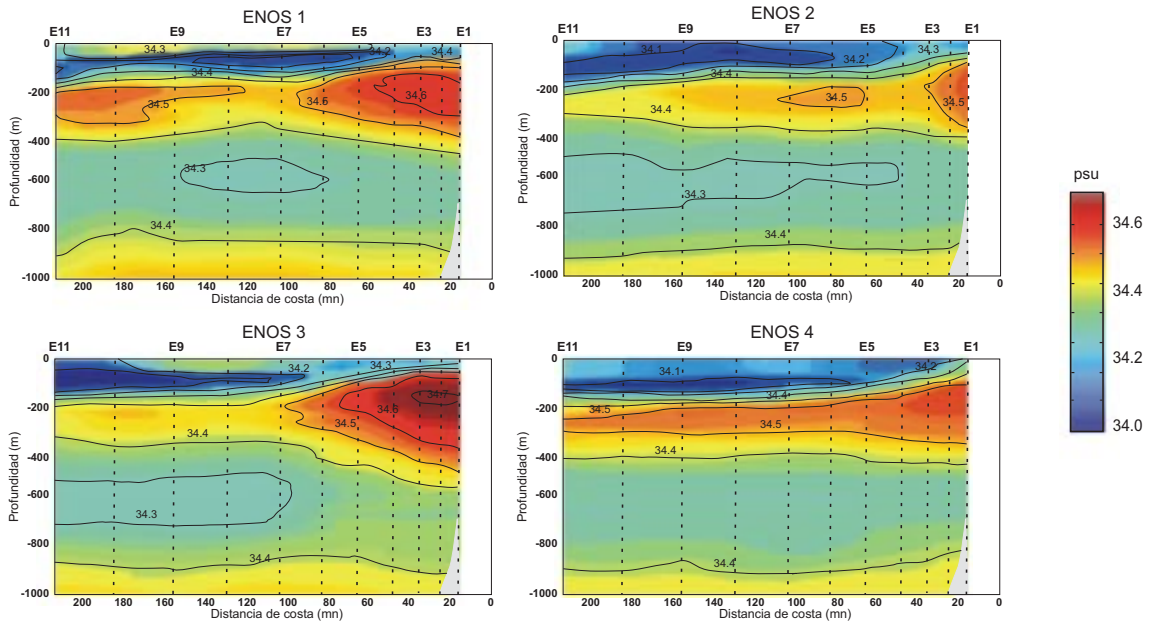


Fig. 5: Distribución vertical de salinidad frente a Valparaíso.

Fig. 5: Vertical distribution of salinity off Valparaíso Bay.

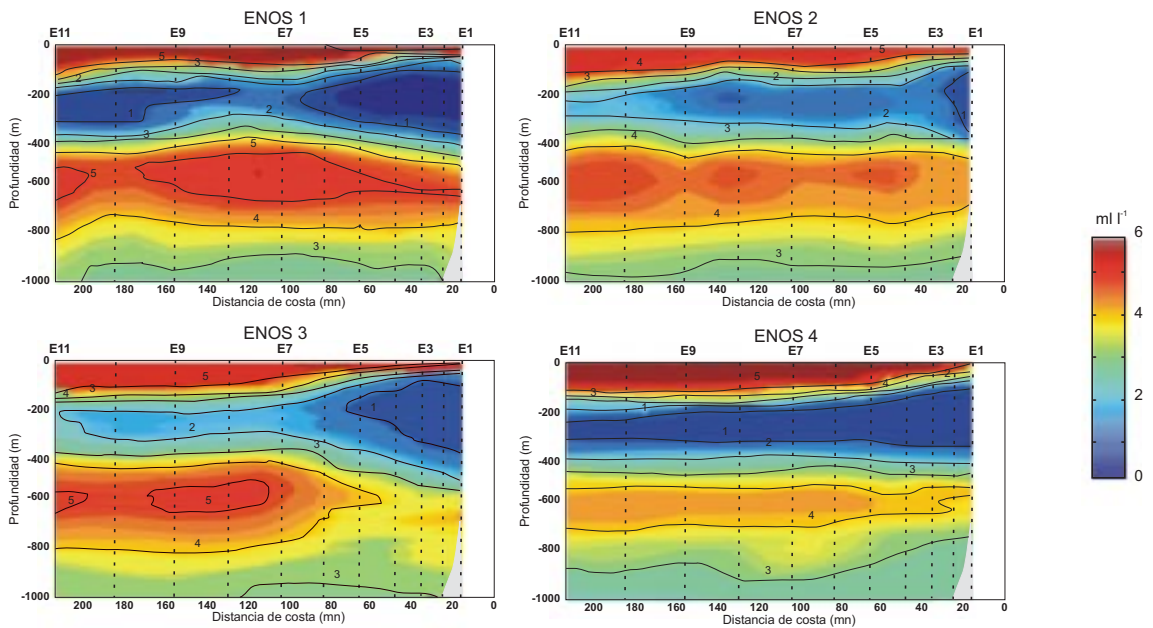


Fig. 6: Distribución vertical de oxígeno frente a Valparaíso.

Fig. 6: Vertical distribution of oxygen off Valparaíso Bay.

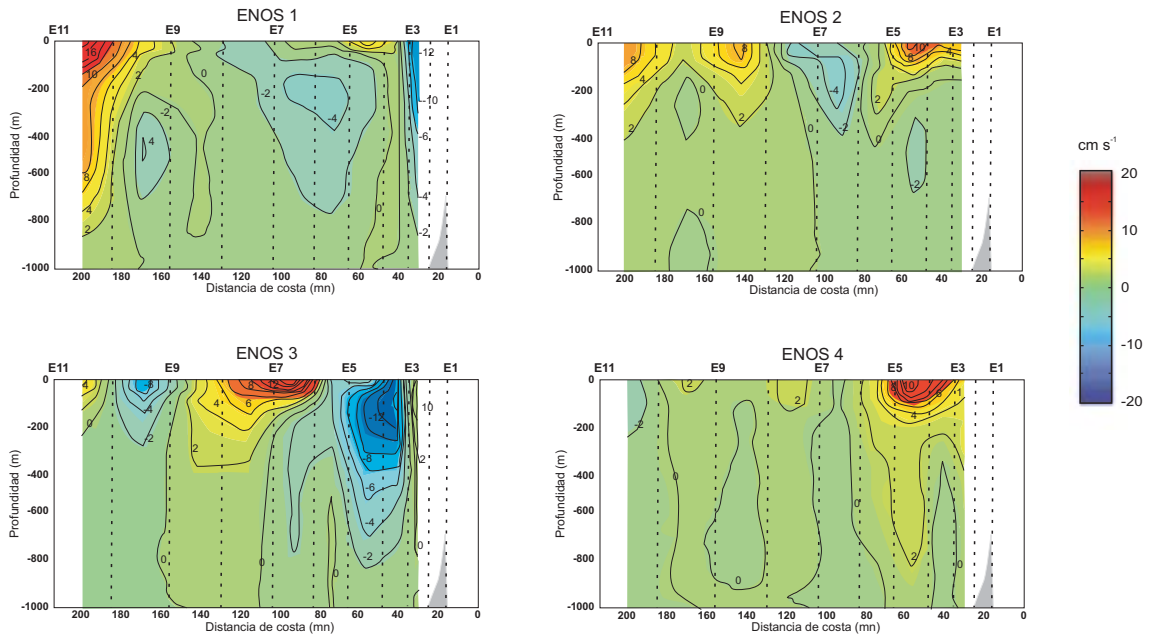


Fig. 7: Distribución vertical de velocidad geostrofica frente a Valparaíso (rojo flujo al norte y azul flujo al sur).

Fig. 7: Vertical distribution of geostrophic velocity field off Valparaíso Bay (red means northward and blue southward).

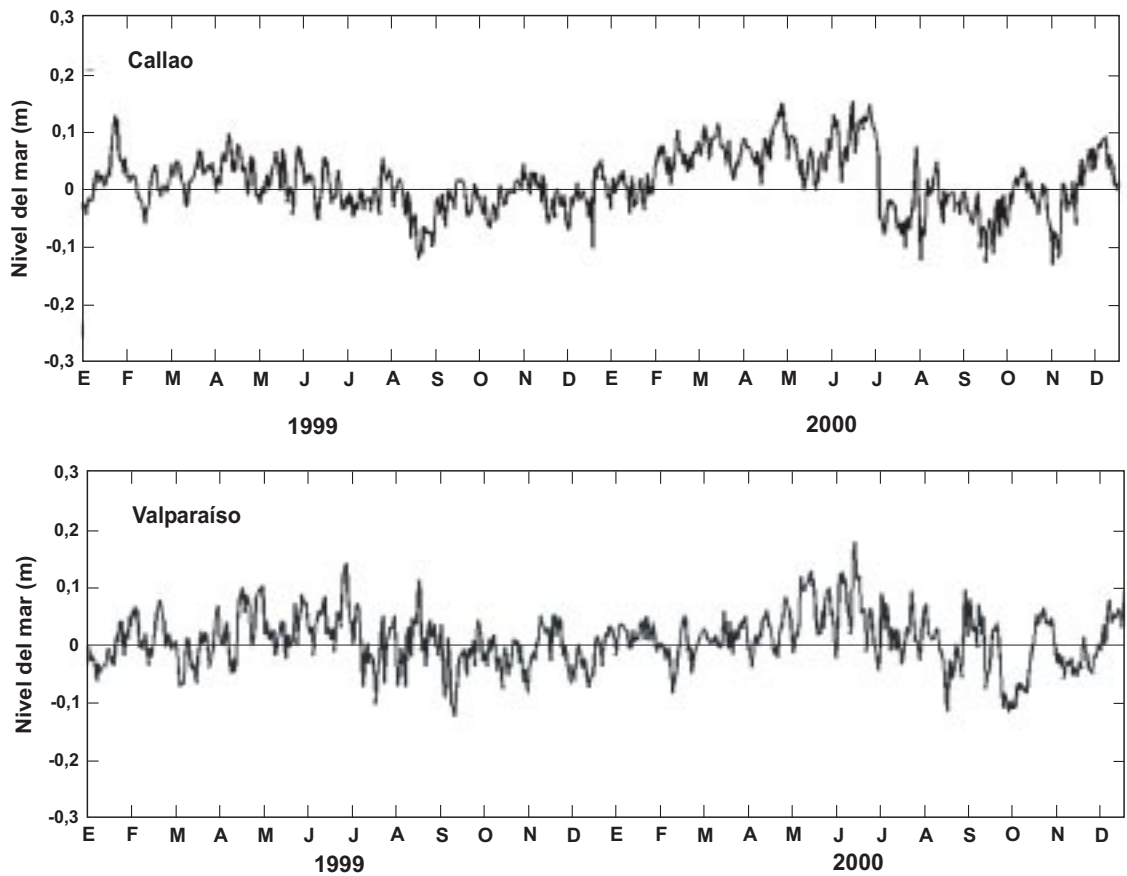


Fig. 8: Nivel del mar (sin tendencia).

Fig. 8: Sea level (Without linear tend).

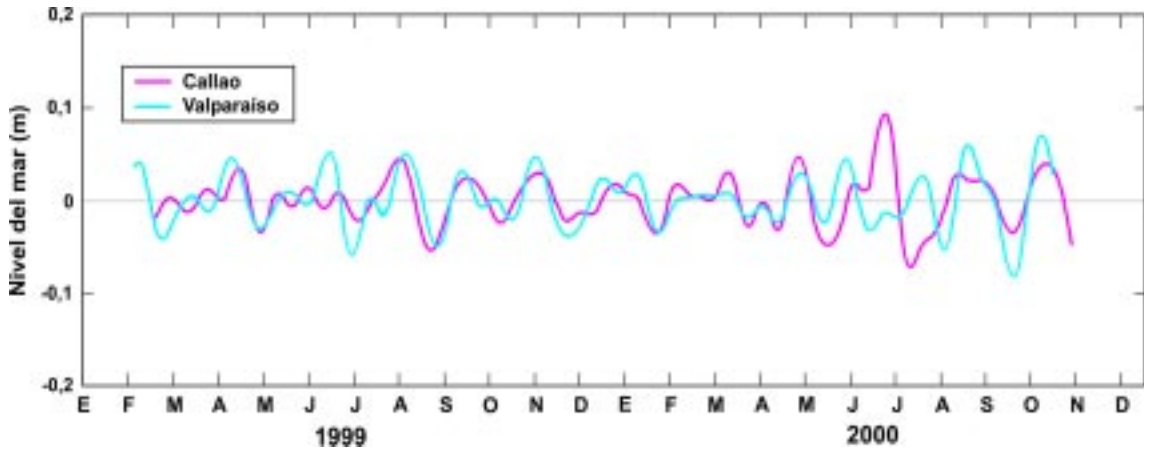


Fig. 9: Nivel del mar con filtro pasa banda entre 20 y 120 días (sin tendencia).

Fig. 9: Low frequency oscillations of sea level, with a band pass filter between 20 and 120 days (without trend).

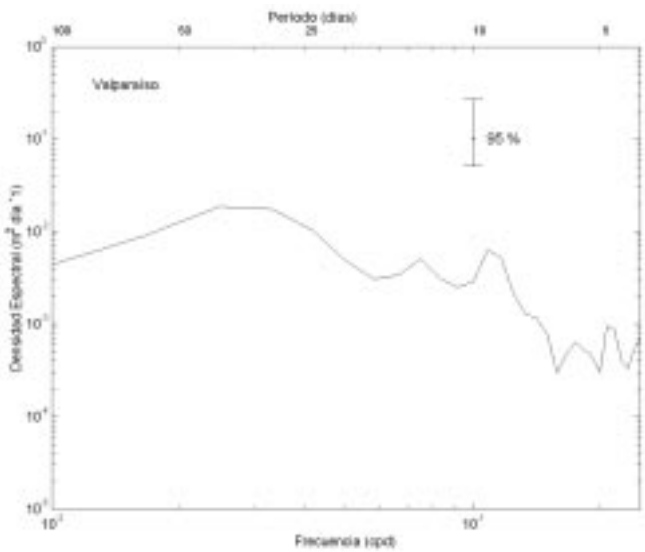
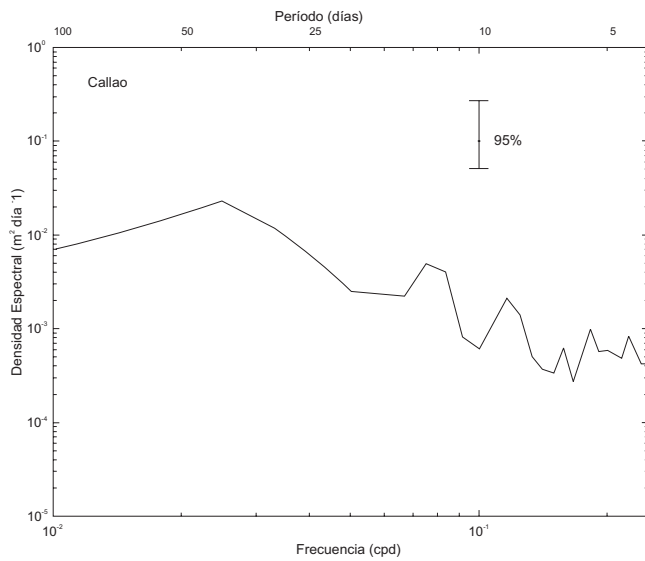


Fig. 10: Espectros de energía del nivel del mar.

Fig. 10: Spectral energy of sea level.