Variación temporal de los afloramientos costeros frente a Chile Central (36°S; 74°W), mediante los isótopos estables de oxígeno de foraminíferos planctónicos, durante El Niño 2006

Temporal variation of coastal upwelling off Central Chile (36°S; 74°W), using stable oxygen isotopes of planktic foraminifera during the 2006 El Niño event

NATHALIE GAJARDO^{1, 2*}, MARGARITA MARCHANT¹ & DIERK HEBBELN³

¹Departamento de Zoología, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile

²Programa de Magíster en Ciencias mención Zoología, Escuela de Graduados, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile

³MARUM – Center for Marine Environmental Sciences, University of Bremen, Leobener Straße, 28359 Bremen, Germany

*Email: nathagajardo@udec.cl

RESUMEN

La costa chilena se caracteriza por ser un área muy productiva, donde la costa centro-sur de Chile presenta procesos estacionales de afloramiento costero, convirtiéndola en una zona con aguas ricas en nutrientes. La variación temporal de los eventos de surgencia puede variar en presencia de eventos El Niño, por lo que se decidió caracterizar esta variabilidad durante El Niño 2006 en Concepción a través del estudio de isótopos estables de oxígeno de foraminíferos planctónicos recolectados mediante trampas de sedimentos. Las conchas de foraminíferos pueden registrar variaciones ambientales y es por ello, que se determinó el $\delta^{18}\text{O}$ de *Globigerina bulloides* d'Orbigny, 1826 y *Neogloboquadrina incompta* (Cifelli 1961), entre enero y octubre de 2006 a 1.000 y 2.300 m de profundidad, frente a la costa centro-sur de Chile (36°S; 74°W). Los valores del $\delta^{18}\text{O}$ y el gradiente de $\delta^{18}\text{O}$ ($\Delta\delta^{18}\text{O}$) en estas especies de foraminíferos planctónicos demostraron la presencia de eventos de surgencias en la época estival durante condiciones normales (enero - abril) con una variación de $\Delta\delta^{18}\text{O} < 0,3\%$, incrementos significativos en el flujo de individuos, flujo de carbonato de calcio y diversidad. Estas surgencias tendrían un término anticipado, durante el evento El Niño 2006 (abril - octubre). Durante estos meses se registró un amplio período de estratificación en la columna de agua, en conjunto con bajos valores flujo de individuos, flujo de carbonato de calcio y diversidad.

PALABRAS CLAVES: surgencias costeras, ENOS, isótopos, *Globigerina bulloides*, *Neogloboquadrina incompta*.

ABSTRACT

The ocean off south-central Chile is characterized by seasonal coastal upwelling. The upwelling of nutrient-rich waters turns this part of the Chilean margin in a high productivity region. As the temporal variability of the upwelling settings may change under El Niño conditions, the impact of the 2006 El Niño event on the fluxes and the stable oxygen isotope composition ($\delta^{18}\text{O}$) of planktonic foraminifera collected with time-series sediment traps off Concepcion has been investigated. We used sediment trap samples collected between January and October 2006 at 1,000 and 2,300 m water depth, offshore south-central Chile (36°S; 74°W). The shells of planktonic foraminifera are sensitive to record environmental conditions, and here the thermal structure of the water column has been assessed by comparing the $\delta^{18}\text{O}$ data of the planktonic foraminifera species *Globigerina bulloides* d'Orbigny, 1826 and *Neogloboquadrina incompta* (Cifelli 1961). The $\delta^{18}\text{O}$ values of these planktonic foraminifera and their differences ($\Delta\delta^{18}\text{O}$) reveal the presence of upwelling during summer under normal conditions (January - April). During this period the $\Delta\delta^{18}\text{O}$ was $< 0.3\%$ indicative for a well-mixed water column and the flux and the diversity of the foraminifera as well as the calcium carbonate flux were significantly increased. Following this upwelling period, the 2006 El Niño event began which between April and October was marked by an extended period of water column stratification with low fluxes of foraminifera, calcium carbonate and low species diversity.

KEYWORDS: coastal upwelling, ENSO, isotopes, *Globigerina bulloides*, *Neogloboquadrina incompta*

INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Corrientes de Bordes Orientales (SCBO) corresponden a regiones oceánicas caracterizadas principalmente por su alta productividad (*e.g.* Berger *et al.* 1989, Thomas *et al.* 2001, Thomas *et al.* 2009). Una de estas regiones, corresponde al Sistema de la Corriente de Humboldt, el cual es uno de los sistemas con mayor disponibilidad de nutrientes a nivel mundial debido a que se presentan conjuntamente diversas condiciones oceanográficas (corrientes marinas, surgencias, borde costero, entre otros) (Berger *et al.* 1987). Dentro de este sistema destaca la Corriente de Humboldt, la cual se origina a los 40- 45°S y se extiende hasta los 10°S en Perú y está conformada por la Corriente oceánica (73°-77°W) y costera (71°-73°W) de Humboldt que transportan aguas frías (Shaffer *et al.* 1995, Strub *et al.* 1998, Silva *et al.* 2009). Subsuperficialmente, la Corriente de Gunther retorna aguas cálidas del Ecuador a la región subpolar, por debajo de la Corriente de Humboldt y se extiende desde Perú a los 10°S hasta el sur de Chile a los 48°S, entre la costa y 100 km hacia el oeste (Schneider *et al.* 2007).

Los SCBO se caracterizan por la presencia de surgencias costeras (Thomas *et al.* 2001, Hormazabal *et al.* 2001, Carr & Kearns 2003) inducidas principalmente por el viento, resultando un ascenso de agua fría, salina y pobre en oxígeno disuelto, provocando la fertilización en áreas cercanas a la costa (Brandhorst 1963, Kelly & Blanco 1984). El forzamiento físico rotacional y los vientos que originan las surgencias en los límites orientales oceánicos, comprende diversas escalas temporales (diarios, estacionales, entre otras), limitando la disponibilidad de nutrientes en la columna de agua y configuran los cambios en la productividad primaria (Rutllant & Montecino 2002). Se ha relacionado mediante imágenes de satélite (Coastal Zone Color Scanner) la concentración de clorofila-*a* a las áreas con importantes niveles de productividad marina, estableciéndose, para el área de estudio (36°S; 74°W), ciclos estacionales con máximos de concentración de clorofila-*a* ($> 2 \text{ mg m}^{-3}$) durante los meses estivales asociados a la presencia de vientos y surgencias (Thomas *et al.* 1994; 2001, Thomas 1999, Yuras *et al.* 2005).

En la costa chilena se han identificado muchos focos de surgencias, producto de la orientación de la costa y el régimen de vientos (*e.g.* Arica hasta Punta Lobos (Cáceres 1990); Península de Antofagasta y Bahía de Mejillones (Rodríguez *et al.* 1991); al sur de Coquimbo (Cáceres 1990); Valparaíso, San Antonio y al sur de Constitución durante el evento de El Niño 1997-98 (Bello *et al.* 2004); entre Punta Nugurne (36°S) y Punta Manuel (38°S) pasando por el golfo de Arauco (Cáceres 1990), entre otras (Bello *et al.* 2004)). Particularmente, en el área centro sur de Chile (~36°S) se

han definido períodos de afloramientos costeros, entre los meses septiembre y abril, donde predominan vientos del sur y suroeste (Saavedra 1980, Kelly & Blanco 1984, Arcos & Navarro 1986, Cáceres 1992, Daneri *et al.* 2000).

Por otro lado, el evento El Niño (anomalía oceanográfica), el cual se origina en el Pacífico Tropical, está relacionado con la Oscilación del Sur (anomalía atmosférica) (Jaksic 1998), ambos eventos combinados son conocidos con el nombre de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) (Marchant *et al.* 1998, Mc Lean *et al.* 2009). Esto provoca el ingreso de aguas cálidas tropicales desde Australasia a las costas sudamericanas, documentándose un aumento de ~2°C en la temperatura superficial del mar en la zona norte de Chile (Barbieri *et al.* 1995). Estas aguas cálidas podrían extender su rango de latitud más al sur de lo normal (~ 3-5°S) (Pickard & Emery 1982). Además, la diferencia en las presiones entre ambas costas (sudamericana y australiana) provoca que la termoclina descienda, los afloramientos de agua sean pobres en nutrientes, entre otras condiciones oceanográficas (Ramage 1986, Arntz & Fahrbach 1996, Escribano *et al.* 2004).

Particularmente, las variaciones en las anomalías térmicas producidas por el evento ENOS pueden ser registradas en la concha de los foraminíferos planctónicos, incluso algunos autores sugieren que se podrían determinar eventos ENOS en el pasado (*e.g.* Thunell *et al.* 1999).

Una forma de estudiar los cambios paleoclimáticos y detectar diferencias con respecto a la temperatura del océano es a través del estudio de la relación entre los isótopos estables de oxígeno de las conchillas de foraminíferos y el ambiente (Emiliani 1955, 1956, 1961, 1966, Shackleton 1967, Savin 1977), dado que su señal isotópica ($\delta^{18}\text{O}$) está determinada por las propiedades físicas de la columna de agua, permitiendo su relación con los cambios de temperatura, pudiendo reconstruir los niveles térmicos de esta última. Esto es posible debido a los diferentes hábitats que presentan las especies: *Globigerina bulloides* d'Orbigny 1826, la cual vive sobre la termoclina (Fairbanks *et al.* 1982) y *Neogloboquadrina incompta* (Cifelli 1961) que habita bajo esta capa (Boltovskoy 1981).

Thunell *et al.* (1999) utilizaron la señal isotópica de oxígeno de foraminíferos planctónicos, en el área oriental del Pacífico Norte (Cuenca Santa Barbara, margen de California y Cuenca de Guaymas, Golfo de California), con el objetivo de estimar las anomalías de temperatura superficial del océano durante El Niño 1997-98, las cuales fueron muy similares comparadas con los valores de esta variable (estimados mediante radiómetro avanzado de alta resolución), dichos autores sugieren el uso de los isótopos estables de oxígeno para reconstruir este parámetro en eventos pasados. Wejnert

et al. (2010) en su estudio con isótopos estables de oxígeno en foraminíferos planctónicos, resaltan la utilización de *Globigerina bulloides* y *Globigerinoides ruber* para determinar el gradiente de temperatura entre la termoclina y la superficie, además de exponer que *G. ruber* registra precisamente la temperatura superficial del mar.

En la región oceánica de Chile, particularmente frente a las costas de Coquimbo, se ha caracterizado el evento El Niño utilizando foraminíferos planctónicos (*e.g.* Marchant *et al.* 1998, Hebbeln *et al.* 2000, Marchant *et al.* 2004, Coloma *et al.* 2005). Marchant *et al.* (1998) contrastan la condición oceanográfica normal (1993/1994) con la condición oceanográfica sucedida durante el evento El Niño 1991/1992, en el primer caso, los valores isotópicos de oxígeno de *N. incompta* son coincidentes con los de *G. bulloides*, mostrando un $\Delta\delta^{18}\text{O}$ que varía dentro de un rango de $\pm 0,3\text{‰}$, entre los meses noviembre y marzo, evidenciando una profunda capa de mezcla debido a la presencia de surgencias costeras, en contraste con lo sucedido bajo condiciones de El Niño (1991/1992), los $\delta^{18}\text{O}$ tuvieron una variación fuera del rango $\pm 0,3\text{‰}$ reflejando un incremento en la estratificación de la columna de agua, además esta última se anticipó en dos meses, respecto a las condiciones normales, en conjunto con los mínimos flujos de foraminíferos planctónicos, evidenciando una baja en la productividad en el área de Coquimbo (30°S) (dicha área se encuentra a ~ 660 km al norte del área de estudio). En este mismo contexto, Montecinos & Gómez (2010), establecieron que los eventos ENOS modifican el ciclo estacional de los vientos costeros, afectando el comienzo y/o finalización de los períodos surgencias costeras (el comienzo de las surgencias durante El Niño, es un mes más tarde que durante La Niña, aproximadamente a los 37°S).

Asimismo, el flujo de foraminíferos, en promedio, fue mayor en condiciones oceanográficas normales (*ca.* $4.000 \text{ ind. m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) que durante El Niño 1991-92 (*ca.* $3.000 \text{ ind. m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), en donde sus máximos coinciden con el aumento de las surgencias costeras, según lo indicado por los isótopos estables de oxígeno de foraminíferos planctónicos, en donde, los deltas tomaron valores cercanos o iguales a 0 indicando que ambas especies habitan la misma capa térmica evidenciando esta situación (Marchant *et al.* 1998).

Mohtadi *et al.* (2005) mediante el estudio de isótopos estables de oxígeno de foraminíferos planctónicos, determinan dos áreas en la costa chilena: al norte y al sur de los 39°S , ambas con alta productividad, la primera (al norte de los 39°S) debido a las surgencias costeras, donde los valores de $\delta^{18}\text{O}$ en *G. bulloides* y *N. incompta* fueron similares ($0,7 \text{‰ VPDB}$ y $0,9\text{‰ VPDB}$ en promedio, respectivamente), y la segunda (al sur de los 39°S), a causa del ingreso de nutrientes a través de sistemas fluviales,

donde los valores isotópicos fueron diferentes ($1,61\text{‰ VPDB}$ y $1,07 \text{‰ VPDB}$ en promedio para *G. bulloides* y *N. incompta*, respectivamente), en estas especies, mostrando una mayor estratificación.

Este estudio pretende exponer las posibles variaciones temporales de los afloramientos costeros, en condiciones normales y El Niño, a través de isótopos estables de oxígeno en foraminíferos planctónicos, en el área de centro-sur de Chile (36°S ; 74°W), durante El Niño 2006.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras se obtuvieron con trampas de sedimentos (Tabla 1) ubicadas a 100 mn frente a las costas de Concepción, Chile (36°S ; 74°W) (Fig. 1) a 1.000 y 2.300 m de profundidad. Recolectándose un total de 32 muestras, 16 en cada profundidad, entre enero y octubre del 2006, con un ritmo de rotación de 18 días.

Estas muestras fueron tratadas, previamente, con 1 ml de solución de HgCl_2 en 100 ml de agua de mar extraído a 2.000 m de profundidad y se adicionó NaCl a 38,40%, para retardar la acción bacteriana y para regular la salinidad en la trampa de sedimento, respectivamente (Fischer & Wefer 1991). Una vez obtenidas las muestras se les agregó nuevamente 1 ml de solución de HgCl_2 ($0,5 \text{ ml}/100 \text{ ml}$ de agua de mar) y se almacenan a 4°C , posteriormente, se utilizó una de las cuatro partes en que se dividió cada muestra.

Las conchillas se recogieron de forma individual desde cada muestra, utilizando una pipeta Pasteur, luego fueron lavadas, secadas a temperatura ambiente, divididas en tres fracciones de tamaño mediante el uso de tamices ($> 212 \mu\text{m}$, $212\text{-}150 \mu\text{m}$ y $150\text{-}63 \mu\text{m}$), clasificadas e identificadas.

Para medir la composición de los isótopos estables de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) se tomaron ejemplares (Tabla 1) de las especies *Globigerina bulloides* y *Neogloboquadrina incompta*, los que fueron enviados al Isotope Laboratory Bremen University, Alemania. La relación isotópica de oxígeno fue determinada en un espectrómetro de masas (Finnigan MAT 251) en donde se midió el gas de CO_2 desprendido por el tratamiento con ácido fosfórico, a una temperatura constante de 75°C . La proporción de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ se dio en relación con el VPDB (*Vienna-PeeDee Belemnite*) estándar, utilizando NBS (*National Bureau of Standards*) 18, 19 y 20, y una desviación estándar de $0,07\text{‰ VPDB}$. Esto se realizó tanto en los ejemplares extraídos de la fracción mayor ($> 212 \mu\text{m}$) como en los obtenidos en la fracción intermedia ($212\text{-}150 \mu\text{m}$) y se utilizó un rango $\pm 0.03\text{‰}$ para determinar los afloramientos costeros, siguiendo lo expuesto en Marchant *et al.* (1998).

Finalmente, se tomaron los valores de los parámetros diversidad (Shannon-Wiener), flujo de individuos ($\text{ind. m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) y flujo de carbonato de calcio de foraminíferos ($\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) de cada muestra desde el trabajo realizado por Gajardo & Marchant (2012) y se contrastaron estadísticamente, mediante un análisis de varianza paramétrico o no paramétrico (ANOVA o Mann-Whitney, respectivamente), utilizando un $\alpha = 0,05$ y $n-1$ grado

de libertad, cuando corresponda, dividiendo el tiempo analizado en dos periodos: el primero, correspondiente entre los meses enero y abril, en donde hubo condiciones normales (ausencia del evento El Niño y La Niña) y un segundo período comprendido entre los meses de abril y octubre (6 meses durante El Niño 2006), según el índice SOI (*Southern Oscillation Index*) entregados por la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, EE.UU.). Esto bajo la hipótesis alterna de que existen diferencias significativas ($P < 0,05$) entre ambos periodos. Para esto se utilizó el programa PAST V 2.10.

FIGURA 1. Localización geográfica de las trampas de sedimentos frente a Concepción (36°S; 74°W) a 1.000 y 2.300 m de profundidad, desde enero a octubre del 2006.

FIGURE 1. Geographic location of sediment traps off Concepcion (36°S; 74°W) deployed at 1,000 and 2,300 m depth, from January to October 2006.

RESULTADOS

Los valores de los isótopos estables de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$), a la profundidad de 1.000 m, en la fracción mayor ($>212 \mu\text{m}$), para la especie *G. bulloides* fluctuaron entre -1,42 ‰ VPBD y -0,1‰ VPBD y para *N. incompta* éstos van desde 0,11‰ VPBD a 0,25 ‰ VPBD (Tabla 2), con dos valores mínimos, uno en febrero (-1,42) y otro en abril (-1,08), para *G. bulloides*, lo que no sucede con los valores isotópicos de oxígeno para *N. incompta*, ya que estos se mantienen aproximadamente constantes (Fig. 2A). En esta misma profundidad en la fracción intermedia (212-150 μm), las señales isotópicas de oxígeno variaron entre -1,20 ‰ VPBD y -0,68 ‰ VPBD para *G. bulloides* y entre -2,14 ‰ VPBD y -0,31 ‰ VPBD para *N. incompta*, observándose dos valores isotópicos cercanos a 0 hacia finales de febrero, para ambas especies (Fig. 2A, Tabla 2).

A la profundidad de 2.300 m, en la fracción mayor ($>212 \mu\text{m}$), los valores isotópicos fluctúan entre -1,52 ‰ VPBD y -0,03‰ VPBD en *G. bulloides* y entre -0,76 ‰ VPBD a 0,29 ‰ VPBD en *N. incompta* (Tabla 2). Las curvas isotópicas de oxígeno muestran variaciones a través del registro, en ambas especies, sin embargo, *N. incompta* durante los primeros meses, la señal permanece aproximadamente constante, no así *G. bulloides* que presenta sólo un valor isotópico mínimo cercano a 0 durante abril (Fig. 2B). En la fracción intermedia (212-150 μm), ambas especies presentan valores similares durante julio ($\sim -3,0$ ‰ VPBD) y disímiles hacia el final del muestreo (septiembre y octubre; Fig. 2B).

A los 1.000 m de profundidad, en la diferencia isotópica ($\Delta\delta^{18}\text{O}$) entre *G. bulloides* y *N. incompta* (en la fracción $>212 \mu\text{m}$), se observan valores en el intervalo de referencia ($\pm 0,3$ ‰) en enero coincidiendo con un alza en el flujo de individuos y la mayor temperatura superficial registrada durante el período analizado, seguido por valores fuera del intervalo de referencia, lo que se asocia a una estratificación de la columna de agua, sin embargo, en julio las señales isotópicas se vuelven a encontrar dentro en el rango $\pm 0,3$ ‰ (Fig. 3A).

FIGURA 2. $\delta^{18}\text{O}$ de las especies *G. bulloides* (◇) y *N. incompta* (■) por muestra, desde enero a octubre del 2006 A. 1.000 m B. 2.300 m frente a Concepción.

FIGURE 2. $\delta^{18}\text{O}$ of the species *G. bulloides* (◇) and *N. incompta* (■) per sample, from January to October 2006 A. 1,000 m B. 2,300 m off Concepción.

TABLA 1. Fechas de recolección de las muestras en el área de estudio (36°S; 74°W), desde enero a octubre del 2006.

TABLE 1. Sampling dates in the study area (36°S; 74°W), since January to October 2006.

1.000 m		2.300 m	
Nº muestra	Fecha	Nº muestra	Fecha
1	07.01.2006	1	07.01.2006
2	25.01.2006	2	25.01.2006
3	13.02.2006	3	13.02.2006
4	03.03.2006	4	03.03.2006
5	21.03.2006	5	21.03.2006
6	08.04.2006	6	08.04.2006
7	27.04.2006	7	27.04.2006
8	15.05.2006	8	15.05.2006
9	02.06.2006	9	02.06.2006
10	20.06.2006	10	20.06.2006
11	08.07.2006	11	08.07.2006
12	27.07.2006	12	27.07.2006
13	14.08.2006	13	14.08.2006
14	01.09.2006	14	01.09.2006
15	20.09.2006	15	20.09.2006
16	07.10.2006	16	07.10.2006

TABLA 2. Valores de isótopos de oxígeno para las especies *G. bulloides* y *N. incompta* y sus respectivos $\Delta\delta^{18}\text{O}$ a los 1.000 y 2.300 m para ambas fracciones durante el año 2006 frente a Concepción.TABLE 2. Oxygen isotope values of *G. bulloides* and *N. incompta* and their respective $\Delta\delta^{18}\text{O}$ at 1,000 and 2,300 m in both fractions during 2006 off Concepción.

Nº muestra	Profundidad (m)	Fracción	Individuos analizados	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ VPDB)	Individuos analizados	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ VPDB)	$\Delta\delta^{18}\text{O}$ (‰ VPDB)
			<i>G. bulloides</i>	<i>G. bulloides</i>	<i>N. incompta</i>	<i>N. incompta</i>	<i>G. bulloides</i> - <i>N. incompta</i>
2	1000	>212 μm	20	-0,1	30	0,11	-0,21
3	1000	>212 μm	20	-1,42	30	0,12	-1,54
6	1000	>212 μm	25	-1,08	35	0,13	-1,21
12	1000	>212 μm	25	-0,19	30	0,25	-0,44
3	1000	212-150 μm	30	-0,68	30	-0,31	-0,37
6	1000	212-150 μm	30	-1,2	30	-2,14	0,94

Nº muestra	Profundidad (m)	Fracción	Individuos analizados	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ VPDB)	Individuos analizados	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ VPDB)	$\Delta\delta^{18}\text{O}$ (‰ VPDB)
			<i>G. bulloides</i>	<i>G. bulloides</i>	<i>N. incompta</i>	<i>N. incompta</i>	<i>G. bulloides</i> - <i>N. incompta</i>
3	2300	>212 μm	30	-1,33	30	0,08	-1,41
4	2300	>212 μm	30	-0,7	30	-0,23	-0,47
5	2300	>212 μm	30	-1,52	30	-0,16	-1,36
6	2300	>212 μm	30	-0,03	30	-0,16	0,13
7	2300	>212 μm	30	-0,82	30	-0,32	-0,5
9	2300	>212 μm	20	-0,66	30	-0,37	-0,29
10	2300	>212 μm	30	-0,49	30	0,12	-0,61
11	2300	>212 μm	30	-0,25	30	-0,76	0,5
12	2300	>212 μm	30	-0,47	30	0,08	-0,55
15	2300	>212 μm	30	-0,03	30	0,29	-0,32
9	2300	212-150 μm	30	-1,28	30	0,07	-1,35
10	2300	212-150 μm	30	-1,27	30	-0,38	-0,89
11	2300	212-150 μm	30	-1,15	30	-1,11	-0,04
12	2300	212-150 μm	30	-2,79	30	-2,89	0,1
15	2300	212-150 μm	20	-1,08	30	0,37	-1,45
16	2300	212-150 μm	30	-0,11	30	-0,85	0,74

En la fracción intermedia (212-150 μm), para esta misma profundidad, los valores del $\Delta\delta^{18}\text{O}$ que están dentro del intervalo $\pm 0,3\%$ se presentan en febrero, principalmente, evidenciando la presencia de ambas especies en el mismo hábitat, sin embargo, estos valores tienden a alejarse de este rango referencial, coincidiendo con una baja en el flujo de individuos y una baja en la temperatura superficial del mar, posteriormente, se encuentra una señal isotópica por fuera del intervalo $\pm 0,3\%$, indicando la ausencia de los afloramientos a partir de marzo (Fig. 3A).

A los 2.300 m profundidad, en la fracción >212 μm , los $\Delta\delta^{18}\text{O}$ se muestran variables, pero, dentro del rango $\pm 0,3\%$ entre febrero y agosto lo que indica la presencia de afloramientos costeros, además, se presenta una disminución en el flujo de individuos de foraminíferos planctónicos y una marcada baja en la temperatura superficial durante estos mismos períodos (Fig. 3B).

En la fracción intermedia (212-150 μm), los $\Delta\delta^{18}\text{O}$ se muestran fuera del rango $\pm 0,3\%$ evidenciando una

estratificación en la columna de agua durante junio, seguido por dos meses, donde $\Delta\delta^{18}\text{O}$ fueron cercanos a 0, coincidente con un aumento en el flujo de individuos, para continuar con otro período de estratificación hacia septiembre, conjuntamente con un aumento en el flujo de individuos y con una baja en la temperatura superficial del mar (Fig. 3B).

El análisis estadístico, a 1.000 m de profundidad, muestra diferencias significativas en los tres parámetros analizados: flujo de individuos ($P = 0,008$), flujo de carbonato de calcio

de foraminíferos ($P = 0,01$) y diversidad ($P = 0,004$). Tomando valores más altos en ausencia del evento El Niño (en promedio; Tabla 3). Por el contrario a una mayor profundidad, el flujo de foraminíferos y el flujo de carbonato de calcio de foraminíferos permaneció sin diferencias significativas a través del tiempo muestreado ($P = 0,99$ y $P = 0,24$, respectivamente). Sin embargo, la diversidad fue estadísticamente diferente mostrando un $P = 0,0004$, siendo mayor durante el período normal (Tabla 3).

FIGURA 3. De izquierda a derecha, $\Delta\delta^{18}\text{O}$ en la fracción mayor ($> 212 \mu\text{m}$) e intermedia ($212 - 150 \mu\text{m}$), además el flujo de individuos ($\text{ind. m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y temperatura superficial del mar ($^{\circ}\text{C}$), desde enero a octubre del 2006. A. 1.000 m B. 2.300 m frente a Concepción.

FIGURE 3. From left to right, $\Delta\delta^{18}\text{O}$ in the large ($> 212 \mu\text{m}$) and middle ($212 - 150 \mu\text{m}$) fractions, foraminifera flux ($\text{ind. m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) and sea surface temperature ($^{\circ}\text{C}$), from January to October 2006. A. 1,000 m B. 2,300 m off Concepción.

TABLA 3. Valores de los parámetros contrastados durante condiciones normales (desde enero hasta abril) y El Niño 2006 (desde abril a octubre) frente a Concepción (tomados de Gajardo & Marchant, 2012).

TABLE 3. Values of the parameters contrasted during normal conditions (from January to April) and El Niño 2006 (from April to October) off Concepción (taken from Gajardo & Marchant, 2012).

Profundidad (m)		1.000			2.300		
Fecha muestreo	F. individuos	F. carbonato de calcio	diversidad	F. individuos	F. carbonato de calcio	diversidad	
07.01.2006	63,56	1,78	1,325	113,78	1,51	1,945	
25.01.2006	332,89	5,11	1,672	415,56	8,22	1,555	
13.02.2006	626,67	9,87	1,761	760,44	8,04	1,715	
03.03.2006	54,22	1,56	1,731	1068,89	6,84	1,494	
21.03.2006	196	4,44	1,823	1107,56	8,36	1,346	
08.04.2006	568,44	6,53	1,856	485,33	3,78	1,586	
27.04.2006	297,78	3,47	1,777	351,11	3,2	1,394	
Promedio	305,7	4,68	1,71	614,7	5,71	1,58	
15.05.2006	105,33	1,56	1,504	608,89	4,13	1,276	
02.06.2006	32,89	0,8	1,54	396,44	2,31	1,144	
20.06.2006	48	1,11	1,663	264	2,31	1,409	
08.07.2006	151,56	1,42	1,374	920,44	6,8	1,101	
27.07.2006	155,56	1,33	1,146	1533,33	9,2	0,8173	
14.08.2006	19,56	0,44	1,108	82,67	1,07	0,8944	
01.09.2006	32,89	0,8	1,127	657,33	3,6	0,4367	
20.09.2006	29,33	0,84	1,513	831,56	4,93	0,5855	
07.10.2006	13,78	0,8	1,392	225,33	2,31	0,7499	
Promedio	71,89	1,01	1,37	613,3	4,07	0,93	

DISCUSIÓN

La señal isotópica entregada por los foraminíferos planctónicos (*G. bulloides* y *N. incompta*) sugieren cambios térmicos en la columna de agua frente a Concepción, en el período enero-octubre 2006. Durante este tiempo se registró el comienzo de la fase cálida del evento ENOS (NOAA, 2012) el cual se inicia, en este estudio, desde abril en adelante. Durante los primeros meses de muestreo, es decir, enero y febrero (época estival) y en condiciones normales, los deltas isotópicos se encuentran dentro del rango $\pm 0,3\%$ (intervalo de referencia utilizado en este estudio) indicando una mezcla de agua con distintas temperaturas, en conjunto con un aumento en el flujo de individuos, evidenciando la posibilidad de afloramientos costeros. Sin embargo, 1.000 m de profundidad (fracción intermedia), no es posible determinar si esta situación se prolonga en el tiempo,

debido a la falta de datos. Por el contrario, a los 2.300 m de profundidad, se observa una estratificación en la columna de agua que se presenta durante enero, seguido por un periodo (hasta abril) en el cual se muestra una mezcla de agua. Esto en primera instancia coincidiría con el régimen de surgencias descrito en las costas de Concepción, las cuales en condiciones normales se restringen entre septiembre y abril. Esto que coincidiría con lo descrito, en relación a las surgencias, para esta área (Saavedra 1980, Kelly & Blanco 1984, Arcos & Navarro 1986, Cáceres 1992, Daneri *et al.* 2000).

Ahora bien, durante el período en el cual se presentó el evento El Niño (desde abril en adelante), la señal isotópica de oxígeno muestra una estratificación de la columna de agua, la cual se presentó desde febrero hasta junio, adelantándose este período, respecto a la temporalidad de estos eventos

descritos para el área de estudio lo que podría deberse a la presencia de El Niño, evento el cual, según Montecinos & Gómez (2010), genera una variabilidad temporal en los afloramientos costeros tendiendo a modificar la duración de las surgencias. Además, la señal isotópica en la fracción intermedia a 2.300 m de profundidad, evidencia una notoria estratificación de la columna de agua a partir de agosto hasta octubre, mes en el cual finaliza este estudio.

No obstante, estas ideas se verían mejoradas utilizando algunas variables de índole físico (e.g. índice de vientos o transporte de Ekman). En este mismo sentido, los resultados constatan una homogenización de la temperatura en la columna durante El Niño, sugiriendo afloramientos costeros (Fig. 3B, fracción mayor), los cuales serían poco productivos según lo indicado por Ramage (1986), Escribano *et al.* (2004) bajo esta condición, es por esta razón que se propone realizar, conjuntamente, un análisis con isótopos de carbono que corroboren la productividad en ambos periodos (ausencia y presencia de El Niño) para su posterior comparación, dado que en este estudio no fue posible por la baja cantidad de ejemplares requeridos para dicho estudio.

Por otro lado, Marchant *et al.* (1998) mostraron, mediante el uso de isótopos estables de oxígeno, la presencia de surgencias costeras hasta enero, durante El Niño 1991-92, lo que representaría un término anticipado del período de afloramientos en condiciones normales, para la región de Coquimbo, sin embargo la falta de datos impidió saber si las surgencias comenzaron antes de noviembre (comienzo del registro), esta diferencia, entre lo obtenido en Coquimbo y este estudio, podría deberse, por un lado, a la disminución de la intensidad de los eventos evaluados con la latitud y por otro, a las distintas intensidades con que se presentaron estos eventos (El Niño 1991-92 y El Niño 2006).

Gajardo & Marchant (2012), frente a las costas de Concepción, determinaron un total de 16 especies de foraminíferos planctónicos, estableciéndose una asociación faunística típica de la Zona Subantártica, con algunos cambios en la composición foraminiferológica durante El Niño 2006 (adición de especies cálidas). Los tres parámetros evaluados (flujo de individuos y de carbonato de calcio de foraminíferos y diversidad) mostraron diferencias significativas entre los dos periodos evaluados, observándose mayores valores en ausencia de El Niño (entre enero y abril), a los 1.000 m de profundidad, coincidiendo con el período de afloramiento costero, el que fue expuesto por las señales isotópicas de las especies *G. bulloides* y *N. incompta*. Sin embargo, no se observan diferencias estadísticas en el flujo de individuos y flujo de carbonato de calcio de foraminíferos a una profundidad mayor (2.300 m), a pesar de esto los valores promedios son más altos que durante el período en

que se presenta El Niño, lo que indicaría preliminarmente que los afloramientos costeros evidenciados por la señal isotópica presentado durante esta fase cálida, serían menos productivos. Asimismo, la diversidad presentó mayores valores en la época estival, en condiciones normales, durante los afloramientos costeros, según lo detectado por los deltas isotópicos, esto evidenciaría un alza de los nutrientes en dicho período, concordando con los expuesto por Thomas *et al.* (2001) en relación a la productividad y su variabilidad, producto de la disponibilidad de los nutrientes y la concentración de clorofila-*a* la cual al sur de los 33°S se presenta con valores relativamente altos (2-3 mg m⁻³) (Thomas *et al.* 1999).

AGRADECIMIENTOS

A los proyectos FONDECYT 1010912 y 1040968 y Proyecto FONDAP-COPAS N° 150100007 por su financiamiento en la obtención de las muestras. Al Dr. Humberto González de la Universidad Austral de Chile y a su equipo de trabajo, por la toma de las muestras. A los oficiales y tripulaciones de los barcos R/V Abate Molina y R/V Vidal Gormaz por su ayuda en la realización de esta investigación. Al Departamento de Zoología y a la Dirección de Investigación de la Universidad de Concepción por permitir el uso de su infraestructura. Este trabajo es una contribución al proyecto SCOR (Scientific Committee on Oceanic Research) Working Group 138 membership.

BIBLIOGRAFÍA

- ALHEIT, J. & M. NIQUEN. 2004. Regime shifts in the Humboldt Current ecosystem. *Progress in Oceanography* 60 (2-4): 201-222.
- ARCOS, D. & N. NAVARRO. 1986. Análisis de un índice de surgencia para la zona de Talcahuano, Chile (Lat. 37° S). *Investigación Pesquera* 33: 91-98.
- ARNTZ, W. & E. FAHRBACH. 1996. El Niño: experimento climático de la naturaleza, 312 pp. Fondo de Cultura Económica, México.
- BARBIERI, M., 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. *Investigaciones Marinas* 23: 99-122.
- BELLO, M., M. BARBIERI, L. SOTO & S. SALINAS. 2004. Surgencia costera en la zona central de Chile, durante el ciclo El Niño/La Niña (1997-99). En: Avaria, S., J. Carrasco, J. Rutllant & E. Yáñez (eds.). *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus efectos en Chile*, 77-94 pp. CONA, Valparaíso.
- BERGER, W. H., V. S. SMETACEK & G. WEFER. 1989. Ocean productivity and paleoproductivity an overview. En: Berger, W. H., V. S. Smetacek & G. Wefer (eds.). *Productivity of the ocean: Present and Past*, pp. 1-34.

- Dahlem Workshop Report Wiley, New York.
- BERGER, W. H., K. FISCHER, C. LAI & G. WU. 1987. Ocean productivity and organic carbon flux. Part I. Overview and maps of primary production and export productivity, SIO Reference 87-30: 1-67. University of California, San Diego.
- BOLTOVSKOY, E. 1981. Foraminifera. En: Boltovskoy, D. (ed.). Atlas del zooplancton del Atlántico Sudoccidental y métodos de trabajo con el zooplancton marino, pp. 317-352. Publicación Especial del INIDEP, Mar del Plata.
- BRANDHORST, W. 1963. Descripción de las condiciones oceanográficas en las aguas costeras entre Valparaíso y el Golfo de Arauco, con especial referencia al contenido de oxígeno y su relación con la pesca (resultados de la expedición AGRIMAR). Ministerio de Agricultura. Dirección de Agricultura y Pesca, Santiago. 55 pp.
- CÁCERES, M. 1990. Variabilidad espacial y temporal de la temperatura superficial del mar (TSM) frente a Concepción, Chile central, usando percepción remota. Tesis de Magíster en Ciencias Mención Oceanografía, Universidad de Concepción, Concepción, 90 pp.
- CÁCERES, M. 1992. Vórtices y filamentos observados en imágenes de satélite frente al área de surgencia de Talcahuano, Chile Central (33-38.5°S). Investigación Pesquera 37: 55-66.
- CARR, M. E. & E. KEARNS. 2003. Production regimes in four Eastern Boundary Current System. Deep Sea Research II 50: 3199-3221.
- COLOMA, C., M. MARCHANT & D. HEBBELN. 2005. Foraminíferos planctónicos durante El Niño 1997-98 del área de Coquimbo (30°S; 73°W), Chile. Gayana 69 (1): 48-77.
- DANERI, G., V. DELLAROSSA, R. QUIÑONES, B. JACOB, P. MONTERO & O. ULLOA. 2000. Primary production and community respiration in the Humboldt Current System off Chile and associated oceanic areas. Marine Ecology Progress Series 197: 41-49.
- EMILIANI, C. 1955. Pleistocene temperatures. Journal of Geology 63: 538-578.
- EMILIANI, C. 1956. Oligocene and Miocene temperature of the equatorial and subtropical Atlantic Ocean. Journal of Geology 64: 281-288.
- EMILIANI, C. 1961. The temperature decrease of surface sea-water in high latitudes and of abyssal-hadal water in open oceanic basins during the past 75 million years. Deep-Sea Research 8: 144-147.
- EMILIANI, C. 1966. Paleotemperature analysis of Caribbean cores P-6304-8 and P-6304-9 and a generalized temperature curve for the past 425,000 years. Journal of Geology 74: 109-124.
- ESCRIBANO, R., G. DANERI, L. FARIAS, V. GALLARDO, H. GONZÁLEZ, D. GUTIÉRREZ, C. LANGE, C. MORALES, O. PIZARRO, O. ULLOA & M. BRAUN. 2004. Biological and chemical consequences of the 1997-1998. El Niño in the Chilean coastal upwelling system: a synthesis. Deep-Sea Research II 51: 2389-2411.
- FAIRBANKS, G., M. SVERDLOVE, R. FREE, P. H. WIEBE & A. W. H. BÉ. 1982. Vertical distribution and isotopic fractionation of living planktonic foraminifera from the Panama Basin. Nature 298: 841-844.
- FISCHER, G. & G. WEFER. 1991. Sampling, preparation and analysis of marine particulate matter. En: Hurd, D. C. & D.W. Spencer (eds.) The analysis and characterization of marine particles. Geophysical Monograph 63: 391-397.
- GAJARDO, N. & M. MARCHANT. 2012. Variaciones estacionales de los foraminíferos planctónicos durante 2005-2006 frente a Iquique (20°S) y Concepción (36°S), Chile. Latin American Journal Aquatic Research 40(2): 376-388.
- HEBBELN, D., M. MARCHANT & G. WEFER. 2000. Seasonal variations of the particle flux in the Peru-Chile current at 30°S under 'normal' and El Niño conditions. Deep-Sea Research II 47: 2101-2128.
- HORMAZABAL, S., G. SHAFFER, J. LETELIER & O. ULLOA. 2001. Local and remote forcing of sea surface temperature in the coastal upwelling system off Chile. Journal of Geophysical Research 106: 16657-16672.
- IRIARTE, J. & H. GONZÁLEZ. 2004. Phytoplankton size structure during and after the 1997/98 El Niño in a coastal upwelling area of the northern Humboldt Current System. Marine Ecology – Progress Series 269: 83-90.
- JAKSIC, F. M. 1998. Las múltiples facetas del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur. Ambiente y Desarrollo 14(2): 53-61.
- KELLY, R. & J. BLANCO. 1984. Proceso de surgencia en Punta Nugurue, Chile (lat. 36° S), marzo 1983. Investigación Pesquera 31: 89-94.
- MARCHANT, M., D. HEBBELN & G. WEFER. 1998. Seasonal flux patterns of planktic Foraminifera in the Peru-Chile Current. Deep-Sea Research I 45: 1161-1185.
- MARCHANT, M., D. HEBBELN, S. GIGLIO, C. COLOMA & H. GONZÁLEZ. 2004. Seasonal and interannual variability in the flux of planktic foraminifers in the southern Humboldt Current System off central Chile. Deep-Sea Research II 51: 2441-2455.
- MC LEAN, J. D., C. R. DE FREITAS & R. M. CARTER. 2009. Influence of the Southern Oscillation on tropospheric temperature. Journal of Geophysical Research 114(D14104): 1-8.
- MOHTADI, M., D. HEBBELN & M. MARCHANT. 2005. Upwelling and productivity along the Peru-Chile Current derived from faunal and isotopic compositions of planktic foraminifera in surface sediments. Marine Geology 216: 107-126.
- MONTECINOS, A. & F. GÓMEZ. 2010. ENSO modulation of the upwelling season off southern-central Chile. Geophysical Research Letters 37: L02708 1-4.
- PICKARD, G. & W. EMERY. 1982. Descriptive physical oceanography - An Introduction. Pergamon Press, Oxford. 249 pp.
- RAMAGE, C. 1986. El Niño. Investigación y Ciencia 119: 40-48.
- RODRÍGUEZ, L., V. MARÍN, M. FARIAS & E. OYARCE. 1991. Identification of an upwelling zone by remote sensing and *in situ* measurement: Mejillones del Sur Bay (Antofagasta-Chile). Scientia Marina 55: 467-473.
- RUTLLANT, J. & V. MONTECINO. 2002. Multiscale upwelling forcing cycles and biological response off north-central Chile. Revista Chilena de Historia Natural 75: 217-231.
- SAAVEDRA, N. 1980. La presión y la dirección del viento en Concepción. Tralka 1(2): 153-162.
- SAVIN, S. M. 1977. The history of the earth's surface temperature during the past 100 million years. Annual Reviews of Earth and Planetary Science 5: 319-335.
- SCHNEIDER, W., R. FUENZALIDA, R. NUÑEZ, J. GARCÉS-VARGAS, L. BRAVO & D. FIGUEROA. 2007. Discusión del sistema de la Corriente Humboldt y masas de aguas en la zona norte y centro de Chile. Ciencia y Tecnología del Mar 30(1): 21-36.

- SHACKLETON, N. J. 1967. Oxygen isotope analyses and Pleistocene temperatures re-assessed. *Nature* 215: 15-17.
- SHAFFER, G., S. SALINAS, O. PIZARRO, A. VEGA & S. HORMAZABAL. 1995. Currents in the deep Ocean off Chile (30°S). *Deep-Sea Research* 42: 425-436.
- SILVA, N., N. ROJAS & A. FEDELE. 2009. Water masses in the Humboldt Current System: Properties, distribution and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for Equatorial Subsurface Water off Chile. *Deep-Sea Research II* 56: 1004-1020.
- STRUB, P. T., J. M. MESÍAS, V. MONTECINO, J. RUTLLANT & S. SALINAS. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. En: Robinson, A. R. & K. H. Brink (eds.). *The Sea* 11: 273-313. John Wiley & Sons, New York.
- THOMAS, A. C. 1999. Seasonal distributions of satellite-measured phytoplankton pigment concentration along the Chilean coast. *Journal of Geophysical Research* 105(25): 877-890.
- THOMAS, A. C., M. E. CARR & P. T. STRUB. 2001. Chlorophyll variability in eastern boundary currents. *Geophysical Research Letters* 28(18): 3421-3424.
- THOMAS, A. C., P. BRICKLEY & R. WEATHERBEE. 2009. Interannual variability in chlorophyll concentrations in the Humboldt and California Current systems. *Progress in Oceanography* 83: 386-392.
- THOMAS, A. C., F. HUANG, P. T. STRUB & C. JAMES. 1994. Comparison of the seasonal and interannual variability of phytoplankton pigment concentrations in the Peru and California Current Systems. *Journal of Geophysical Research* 99: 7355-7370.
- THUNELL, R., E. TAPPA, C. PRIDE & E. KINCAID. 1999. Sea-surface temperature associated with the 1997-1998 El Niño recorded in the oxygen isotope composition of planktonic foraminifera. *Geology* 27(9): 843-846.
- WEJNERT, K., C. PRIDE & R. THUNELL. 2010. The oxygen isotope composition of planktonic foraminifera from the Guaymas Basin, Gulf of California: Seasonal, annual and interspecies variability. *Marine micropaleontology* 74: 29-37.
- YURAS, G., O. ULLOA & S. HORMAZABAL. 2005. On the annual cycle of costal and open ocean satellite chlorophyll off Chile (18-40° S). *Geophysical Research Letters* 32: 1029-1033.

Recibido: 30.12.11
Aceptado: 15.11.12