

EL REGISTRO ISOTÓPICO PALEOAMBIENTAL DE UN CORAL DE CABO PULMO, BOCA DEL GOLFO DE CALIFORNIA, MÉXICO

STABLE ISOTOPE PALEOENVIRONMENTAL RECORD OF A CORAL FROM CABO PULMO, ENTRANCE TO THE GULF OF CALIFORNIA, MEXICO

Gladys R. Bernal
José D. Carriquiry*

Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Universidad Autónoma de Baja California
Apartado postal 453
Ensenada, C.P. 22800, Baja California, México
* E-mail: jdcarrq@faro.ens.uabc.mx

Recibido en marzo de 2000; aceptado en enero de 2001

RESUMEN

Se analizó la señal de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en un coral (*Pavona gigantea*) del arrecife de Cabo Pulmo que contenía un registro esquelético de 17 años. Aunque la señal isotópica en el esqueleto coralino está principalmente controlada por la temperatura (~70%), la llegada estacional de masas de agua al Golfo de California produce un efecto isotópico sobre el coral en dirección opuesta a la térmica. Durante el verano y otoño, la llegada de agua ecuatorial reduce el intervalo anual del $\delta^{18}\text{O}$ del esqueleto coralino, ya que imprime una señal positiva, aun cuando se trata de la estación lluviosa en la zona. La incursión de aguas ecuatoriales durante años El Niño es tan fuerte que los años ENOA (El Niño y la Oscilación Austral) más intensos no imprimieron cambios isotópicos importantes en el esqueleto, a pesar de que los registros de temperatura muestran anomalías positivas significativas en la región. El efecto inverso ocurre para los años de La Niña. A partir de las señales térmica e isotópica fue posible deducir el intercambio de masas de agua de la Corriente de California y de la Corriente Costera de Costa Rica. Los cambios en la señal de $\delta^{13}\text{C}$ parecen coincidir con periodos de surgencia en el golfo, siendo su valor más grande coincidente con el periodo anual de máxima concentración de pigmentos en la columna de agua.

Palabras clave: Golfo de California, isótopos estables, corales.

ABSTRACT

A 17-year-long record of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ from a Cabo Pulmo coral (*Pavona gigantea*) was analyzed. Although the coral $\delta^{18}\text{O}$ signal is mainly temperature controlled (~70%), the seasonal arrival of surface water masses to the Gulf of California produces an isotopic effect in the opposite direction to that produced by temperature. During summer and fall, the arrival of Equatorial water effectively reduces the annual range in the $\delta^{18}\text{O}$ of the coral skeletons by increasing the $\delta^{18}\text{O}$ value of water, even though this occurs during the rainy season. The incursion of Equatorial water masses to the entrance of the Gulf of

California during El Niño years is so strong that even during the strongest ENSO years there is no important isotopic shift in the skeleton, even though temperature records show significant positive temperature anomaly in the region. The same effect occurs for La Niña years, but in the opposite direction. By deconvoluting the temperature signal from the isotopic record, the seasonal interplay of the water masses from the California Current and the Costa Rica Coastal Current can be effectively deduced. Changes in the coral $\delta^{13}\text{C}$ seem to coincide with periods of upwelling events in the gulf, with the highest value coinciding with the annual maximum in pigment concentration for the region.

Key words: Gulf of California, stable isotopes, corals.

INTRODUCCIÓN

Los corales presentan características especiales que los hacen aptos como registros oceánicos suplementarios. La calcificación en el coral está afectada por las condiciones fisicoquímicas del agua de mar circundante y, a su vez, el material calcáreo coralino es depositado en bandas anuales que permiten determinar cronologías de acuerdo con el hábito de crecimiento de la colonia coralina (Moore *et al.*, 1973; Buddemeier *et al.*, 1974; Buddemeier y Kenzie, 1976; Dodge y Vaisnys, 1980). Estas características, unidas a su carácter sésil, hacen que los corales contengan trazadores paleoceanográficos útiles como son el mismo crecimiento esquelético, los isótopos estables, los elementos menores y traza, los radionucleidos y la fluorescencia (Cole y Dunbar, 1993; Shen, 1993; Lough *et al.*, 1995).

El $\delta^{18}\text{O}$ del esqueleto coralino (también denominado δc) refleja una combinación de la temperatura oceánica y el $\delta^{18}\text{O}$ del agua local (δw) (Carrquiry, 1994; Leder *et al.*, 1996). La dependencia térmica del $\delta^{18}\text{O}$ coralino obedece a que el factor de fraccionamiento para el intercambio isotópico en carbonatos marinos aumenta cuando decrece la temperatura. De acuerdo con las condiciones que afectan la localidad donde el coral fue recolectado, la señal de $\delta^{18}\text{O}$ puede depender de la temperatura y/o la salinidad (Cole y Fairbanks, 1990; Wellington y Dunbar, 1995; Swart *et al.*, 1996a); esta última es controlada a su vez por

INTRODUCTION

Corals have special characteristics that render them as suitable supplementary oceanic records. Calcification in corals is affected by the physicochemical conditions of the surrounding seawater and, in turn, coral calcareous material is deposited in annual bands that allow chronologies to be determined according to the growth habits of the coral colony (Moore *et al.*, 1973; Buddemeier *et al.*, 1974; Buddemeier and Kenzie, 1976; Dodge and Vaisnys, 1980). These characteristics, together with their sessile nature, allow corals to contain useful paleoceanographical tracers such as skeletal growth, stable isotopes, minor and trace elements, radionuclides and fluorescence (Cole and Dunbar, 1993; Shen, 1993; Lough *et al.*, 1995).

The $\delta^{18}\text{O}$ from the coral skeleton (also called δc) reveals a combination of the oceanic temperature and $\delta^{18}\text{O}$ of the local water (δw) (Carrquiry, 1994; Leder *et al.*, 1996). The thermal dependence of the coral $\delta^{18}\text{O}$ is due to an increase in the fractionation factor for isotopic exchange in marine carbonates when the temperature decreases. According to the conditions that influence the site where the coral was collected, the $\delta^{18}\text{O}$ signal may depend on temperature and/or salinity (Cole and Fairbanks, 1990; Wellington and Dunbar, 1995; Swart *et al.*, 1996a); the latter is also controlled by the rainfall/evaporation rate. However, at times it is difficult to separate the

la razón de precipitación/evaporación. Sin embargo, en ocasiones es difícil separar el efecto de cada factor, especialmente cuando no se cuenta con información climática suficiente o con mediciones isotópicas del agua (Quinn *et al.*, 1993).

Los factores que controlan el $\delta^{13}\text{C}$ en el esqueleto coralino incluyen la composición isotópica de ΣCO_2 del agua, la geometría y tasa de crecimiento del coral y la fotosíntesis endosimbiótica (la actividad de la zooxantela asociada con el coral tiene un papel fundamental en la fraccionación del reservorio, a partir del cual tiene lugar la calcificación). Asimismo, la reproducción y el grado de autotrofia/heterotrofia están asociados con esta señal (Carriquiry *et al.*, 1994; Swart *et al.*, 1996b). El $\delta^{13}\text{C}$ ha podido correlacionarse en ciertos ambientes con variables climáticas, especialmente cuando la relación fotosíntesis/respiración está asociada directamente con la insolación (Wellington y Dunbar, 1995).

Este estudio pretende analizar las señales isotópicas de oxígeno y carbono de un coral recolectado en la región de la boca del Golfo de California con el fin de explicar su dependencia ambiental y su variabilidad interanual. El Golfo de California, fuertemente influenciado por el Pacífico, es un exportador de calor a través de la circulación termohalina (Lavín *et al.*, 1997). Está sometido al sistema de vientos conocido como el monzón mexicano, relevante para el clima en México y Estados Unidos (Lavín *et al.*, 1997; Stensrud *et al.*, 1997), y en su boca confluyen diferentes masas de agua en la constante interacción con el Océano Pacífico (Torres-Orozco, 1993; López, 1996).

Debido a que las mediciones ambientales de manera directa y sistemática cubren periodos relativamente cortos y recientes, la información obtenida de registros suplementarios tales como los corales es valiosa. Por ello, un objetivo adicional a este estudio es el de tratar de relacionar la señal coralina con las

effect of each factor, especially when there is a lack of climatic information or of isotopic measurements of the water (Quinn *et al.*, 1993).

The factors that control the $\delta^{13}\text{C}$ in the coral skeleton include the isotopic composition of the water ΣCO_2 , the coral geometry and growth rate and the endosymbiotic photosynthesis (the activity of the coral-associated zooxanthella plays a fundamental role in the fractionation of the reservoir, after which calcification occurs). Likewise, reproduction and the degree of autotrophy/heterotrophy are associated with this signal (Carriquiry *et al.*, 1994; Swart *et al.*, 1996b). In some environments, it has been possible to correlate $\delta^{13}\text{C}$ with climatic variables, particularly when the photosynthesis/respiration rate is directly related to the insolation (Wellington and Dunbar, 1995).

This study seeks to analyze the isotopic oxygen and carbon signals of a coral collected at the entrance to the Gulf of California in order to explain its environmental dependence and interannual variability. The Gulf of California, strongly influenced by the Pacific Ocean, is a net heat exporter through thermohaline circulation (Lavín *et al.*, 1997). It is affected by the wind system known as the Mexican monsoon, relevant for the weather in Mexico and the United States (Lavín *et al.*, 1997; Stensrud *et al.*, 1997), and several water masses converge at its entrance, in its continuous interaction with the Pacific Ocean (Torres-Orozco, 1993; López, 1996).

As environmental measurements directly and systematically cover recent and relatively short periods, the information obtained from supplementary records, such as corals, is valuable. Therefore, this study also aims to relate the coral signal with the frequencies of El Niño events, given that much of the climatic and oceanic variability in the northeastern tropical Pacific is controlled by the El Niño

frecuencias del fenómeno de El Niño, ya que mucha de la variabilidad climática y oceánica en el Pacífico tropical nororiental está controlada por eventos ENOA (El Niño y la Oscilación Austral). En efecto, en la actualidad, la geoquímica isotópica de corales es una herramienta muy utilizada para el estudio de El Niño y el registro de su pasado en el Océano Pacífico (Carriquiry *et al.*, 1988, 1994; Cole y Fairbanks, 1990; Shen *et al.*, 1992; Cole *et al.*, 1993; Wellington and Dunbar, 1995).

ÁREA DE ESTUDIO

El arrecife de Cabo Pulmo está ubicado en la entrada del Golfo de California, sin una barrera que lo aisle de la variabilidad oceánica regional (fig. 1). Fuera del golfo, los patrones de circulación estacionales e interanuales están definidos por el sistema ecuatorial y el giro anticiclónico del Pacífico Norte. Durante el invierno y la primavera, el giro del Pacífico Norte es fuerte y las aguas de la Corriente de California llegan hasta la boca del golfo. Durante el verano y otoño, se fortalece el sistema ecuatorial y se intensifica la Corriente Costera de Costa Rica que se extiende hacia la boca del golfo (Baumgartner y Christensen, 1985).

El golfo tiene un clima monzónico, con vientos estacionales e inversos que controlan la circulación superficial. En invierno y primavera, el viento sopla desde el NW, produciendo una surgencia importante concentrada en el lado oriental. En verano y otoño, el viento, más débil, proviene del SE y genera una surgencia menor del lado occidental (Álvarez-Borrego, 1983; Thunell *et al.*, 1996).

La región sur del golfo es compleja hidrográficamente, ya que confluyen diferentes masas de agua superficiales: agua del Golfo de California, agua superficial ecuatorial y agua de la Corriente de California (Torres-Orozco, 1993; Lavín *et al.*, 1997). Cuando se presenta

Southern Oscillation (ENSO) events. In fact, currently, coral isotope geochemistry is extensively used for the study of ENSO and for recording its history in the Pacific Ocean (Carriquiry *et al.*, 1988, 1994; Cole and Fairbanks, 1990; Shen *et al.*, 1992; Cole *et al.*, 1993; Wellington and Dunbar, 1995).

STUDY AREA

Cabo Pulmo reef is located at the entrance to the Gulf of California, with no barrier isolating it from the regional variability of the ocean (fig. 1). Outside the gulf, the seasonal and interannual circulation patterns are defined by the Equatorial system and the North Pacific anti-cyclonic gyre. During winter and spring, the North Pacific gyre is strong, and the waters from the California Current reach the gulf's entrance. During summer and autumn, the Equatorial system strengthens and the Costa Rica Coastal Current intensifies, extending towards the gulf's entrance (Baumgartner and Christensen, 1985).

The gulf has a monsoon-type climate, with seasonal winds controlling its surface circulation. In winter and spring, the wind blows from the NW, producing significant upwelling on the eastern side. In summer and autumn, the wind is weaker and blows from the SE, generating minor upwelling on the western side (Álvarez-Borrego, 1983; Thunell *et al.*, 1996).

The hydrographic conditions of the gulf's southern region are complex as diverse surface water masses meet there: Gulf of California water, Equatorial surface water and California Current water (Torres-Orozco, 1993; Lavín *et al.*, 1997). When ENSO conditions occur in the Pacific Ocean, the deepening of the thermocline and the propagation of Kelvin waves propitiate the arrival of warm tropical waters to the gulf. Thus, El Niño is associated with an increase in the volume of the

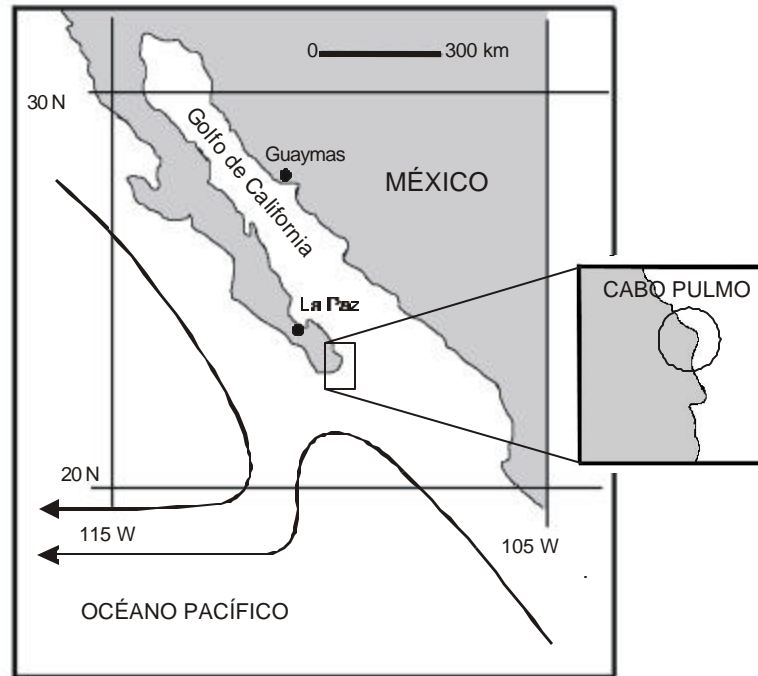


Figura 1. Localización del arrecife de Cabo Pulmo y el sistema de circulación en el Pacífico nororiental fuera de la boca del Golfo de California (condiciones de verano).

Figure 1. Location of Cabo Pulmo reef and the northeastern Pacific circulation system outside the entrance of the Gulf of California (summer conditions).

la condición de El Niño en el Pacífico, la profundización de la termoclina y propagación de ondas Kelvin favorecen la llegada de aguas tropicales cálidas hacia el golfo. De esta manera, El Niño está asociado con un incremento en el volumen de la masa de agua ecuatorial dentro del golfo que alcanza hasta la región central (Norton *et al.*, 1985; Robles y Marinone, 1987; Torres-Orozco, 1993).

En Cabo Pulmo la temperatura media anual del agua es de 26°C, con un intervalo de oscilación promedio de 8°C (fig. 2). Existen dos periodos estacionales que están en fase con la variabilidad del Pacífico tropical nororiental: baja temperatura oceánica superficial (TOS) de

Equatorial water mass inside the gulf that extends to the central region (Norton *et al.*, 1985; Robles and Marinone, 1987; Torres-Orozco, 1993).

At Cabo Pulmo, the mean annual water temperature is 26°C, with a mean oscillation range of 8°C (fig. 2). There are two seasonal periods that are in phase with the variability of the northeastern tropical Pacific: low sea surface temperature (SST) from December to May (21.9–25.2°C) and high SST from June to November (27–30°C). Even though this is an arid area, the rainy season occurs when the temperature of the sea surface is highest (July, August and September).

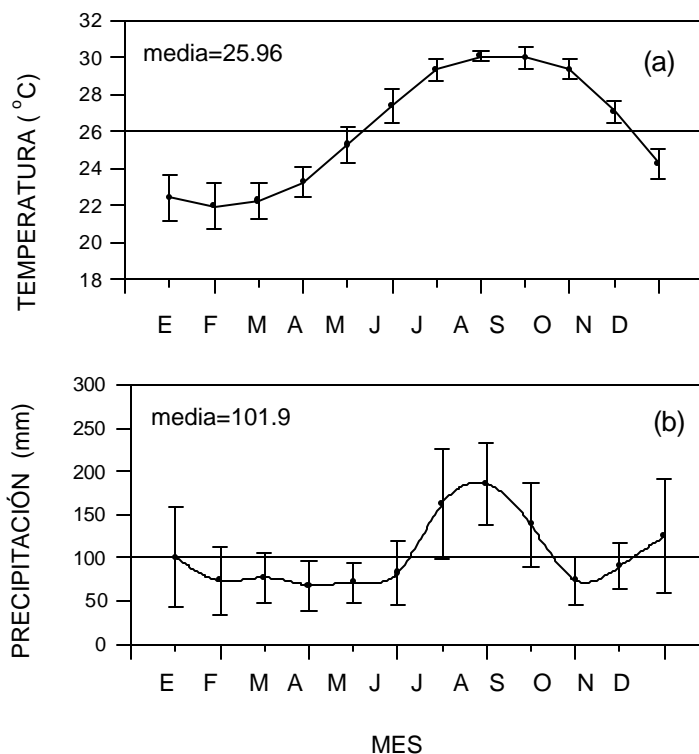


Figura 2. Variación estacional en el área de estudio. **(a)** Temperatura superficial del mar: valores mensuales promedio entre 1981 y 1996 (base de datos 227, COADS). **(b)** Precipitación: datos sinópticos obtenidos del *Climate Diagnostics Bulletin* entre 1983 y 1996.

Figure 2. Seasonal variability in the study area. **(a)** Sea surface temperature: mean monthly values from 1981 to 1996 (COADS-277 data base). **(b)** Precipitation: synoptic data from the *Climate Diagnostics Bulletin* between 1983 and 1996.

diciembre a mayo (entre 21.9°C y 25.2°C) y alta TOS de junio a noviembre (entre 27°C y 30°C). Aunque ésta es una zona árida, la estación lluviosa del año ocurre en la época de más alta temperatura superficial del mar (julio, agosto y septiembre).

Los registros de salinidad, según datos no continuos entre 1939 y 1984 (Centro Americano de Datos Oceanográficos, NODC), indican una salinidad promedio de 35.01, con un intervalo anual de 0.4, donde no se evidencia el efecto de la estación lluviosa. De acuerdo

Salinity records, according to discontinuous data between 1939 and 1984 (North-American Oceanographic Data Center, NODC), indicate an average salinity of 35.01, with an annual interval of 0.4, in which no effect from the rainy season is evident. According to the seasonal variability in the area and to some published data regarding the isotopic composition of the water (Epstein and Mayeda, 1953; Grossman and Ku, 1986; Juillet-Leclerc and Schrader, 1987), waters reaching the Cabo Pulmo reef are cooler and

con la variabilidad estacional del área y algunos datos reportados sobre la composición isotópica del agua (Epstein y Mayeda, 1953; Grossman y Ku, 1986; Juillet-Leclerc y Schrader, 1987), las aguas que llegan al arrecife de Cabo Pulmo son más frías y más ligeras isotópicamente cuando domina la Corriente de California en el Pacífico nortropical oriental, y cálidas y más pesadas cuando la Corriente Costera de Costa Rica alcanza la boca del Golfo de California.

La serie de temperatura superficial, con valores mensuales entre 1981 y 1996 (tomados de la base de datos de COADS DS-277), y la serie de anomalías respecto a la media estacional (fig. 3) indican que las anomalías térmicas positivas más altas ocurrieron durante los años Niño de 1983 y 1992, y las mayores anomalías negativas durante 1985 y 1988/89.

METODOLOGÍA

En mayo de 1990 se recolectó una colonia de coral (*Pavona gigantea*) en la localidad de Cabo Pulmo. Ésta fue lavada y tratada con hipoclorito de sodio, para después ser seccionada con una cortadora de roca, generándose una rebanada de 4 mm de espesor. Una imagen de rayos X reveló las bandas de crecimiento esquelético (Buddemeier *et al.*, 1974), base de la cronología para la serie isotópica coralina.

Se extrajeron muestras continuas de polvo aragonítico a lo largo del eje máximo de crecimiento del coral, de las cuales se seleccionaron muestras espaciadas cada ~1 mm. De acuerdo con las tasas de crecimiento calculadas, la resolución media de muestreo fue de 8.8 muestras por año. Los polvos se analizaron en un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas (Optima de VG Micromass) con un sistema automatizado para análisis de carbonatos en baño ácido. Se obtuvieron valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ para cada muestra, de 1964 a 1990. Sin embargo, se trabajó con los datos de 1974 a

isotópicamente más ligeras cuando la Corriente de California domina el Pacífico nortropical oriental, y más pesadas cuando la Corriente Costera de Costa Rica alcanza la boca del Golfo de California.

isotópicamente más ligeras cuando la Corriente de California domina el noreste del Pacífico tropical, y más pesadas cuando la Corriente Costera de Costa Rica alcanza la boca del Golfo de California.

The surface temperature series, with monthly values between 1981 and 1996 (taken from the COADS DS-277 data base), and the time series of anomalies in relation to the seasonal mean (fig. 3) indicate that the highest positive thermal anomalies occurred during the ENSO years of 1983 and 1992, and the highest negative anomalies during 1985 and 1988/89.

METHODOLOGY

In May 1990, a coral colony (*Pavona gigantea*) was collected in the locality of Cabo Pulmo. The coral was washed and treated with sodium hypochlorite, and then cut with a rock cutter, obtaining a 4-mm-thick slice. An X-ray image revealed the skeletal growth bands (Buddemeier *et al.*, 1974), basis for the chronology of the coral isotope series.

Continual samples of aragonite dust were extracted from the coral's maximum growth axis, from which samples were selected spaced ~1-mm apart. According to the growth rates calculated, the mean sampling resolution was 8.8 samples per year. Aragonitic powders were analyzed in an isotope ratio mass spectrometer (Optima from VG Micromass) with an automated system for carbonate analysis in acid bath. Values of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ were obtained for each sample, from 1964 to 1990. However, the 1974–1990 data were used due to anomalies in the coral's growth towards its base.

For the period between 1982 and 1989, the chronology was adjusted according to the SST and $\delta^{18}\text{O}$ maximums and minimums (Tudhope *et al.*, 1996; Quinn *et al.*, 1996). The data series generated, with seven to eleven data per year, was converted into a monthly resolution using the cubic interpolation method (spline), after

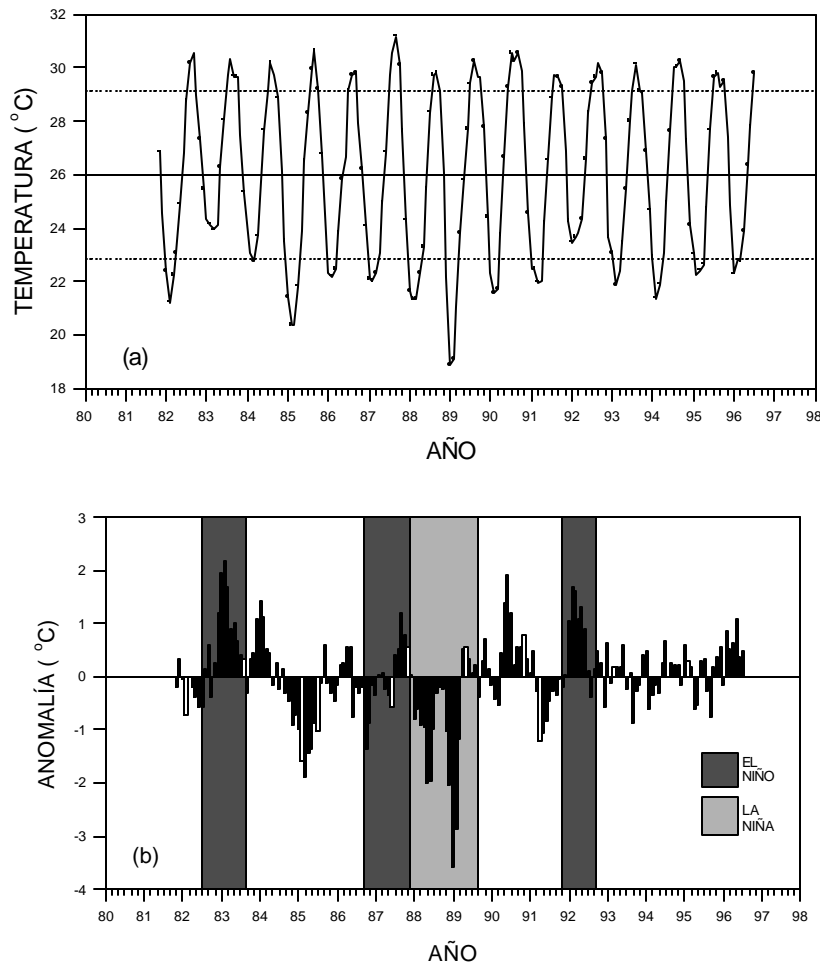


Figura 3. Serie de tiempo de la temperatura superficial del mar de 1981 a 1996 (a) y sus anomalías (b).
Figure 3. Time series of the sea surface temperature from 1981 to 1996 (a) and its anomalies (b).

1990 debido a anomalías en el crecimiento del coral hacia la base.

Para el periodo entre 1982 y 1989, se ajustó la cronología de acuerdo con los máximos y mínimos de TOS y $\delta^{18}\text{O}$ (Tudhope *et al.*, 1996; Quinn *et al.*, 1996). La serie de datos generada, de siete a once datos por año, fue convertida a una serie mensual por el método de interpolación cúbica (spline), después de compararla

comparison with a series of eight data per year. The results were used to establish the relationship between the isotopic signal from the coral and the marine environment where it grew.

RESULTS AND DISCUSSION

The mean growth of the coral analyzed was 10.18 mm/year. The high density bands form

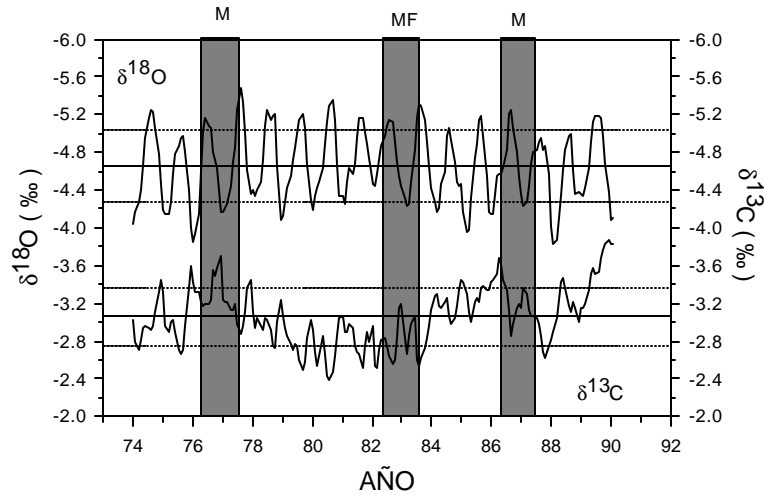


Figura 4. Señal isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en el registro coralino de Cabo Pulmo. Los años de El Niño han sido señalados y clasificados según su intensidad: M = moderado y MF = muy fuerte.

Figure 4. $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ isotopic signal of the coral record from Cabo Pulmo. El Niño years are indicated and classified according to their intensity: M = moderate and MF = very strong.

respecto a una serie de ocho datos por año. Los resultados se utilizaron para establecer la relación entre la señal isotópica en el coral y el medio ambiente marino en el cual creció.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El crecimiento promedio del coral analizado fue de 10.18 mm/año. Las bandas de alta densidad se forman durante los meses de baja temperatura superficial. Las señales isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ muestran ciclos de variabilidad anuales e interanuales (fig. 4).

La señal de $\delta^{18}\text{O}$ coralino presenta máximos y mínimos anuales bien definidos, inversos a los ciclos anuales de TOS (fig. 5). La correlación de estos dos parámetros entre 1982 y 1990 es alta (fig. 6), con la siguiente ecuación lineal entre los máximos y mínimos de ambas series (Fairbanks y Dodge, 1979; McConnaughey, 1989):

$$\text{TOS} = -7.85 - 7.26 \delta^{18}\text{O} \quad (r^2 = 0.68) \quad (1)$$

during the months of low surface temperature. The isotopic signals from $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ show cycles of annual and interannual variability (fig.4).

The coral $\delta^{18}\text{O}$ signal shows well defined annual maximums and minimums, inverse to the annual SST cycles (fig. 5). There is a high correlation between the two parameters from 1982 to 1990 (fig. 6), with the following linear equation between the maximums and minimums of both series (Fairbanks and Dodge, 1979; McConnaughey, 1989):

$$\text{SST} = -7.85 - 7.26 \delta^{18}\text{O} \quad (r^2 = 0.68) \quad (1)$$

The slope is steep with respect to the most common values in corals (around 4.9), as well as to that of the coral aragonite (4.3, Epstein and Mayeda, 1953). In addition, while comparing Reynolds' SST series (measured) with a series of SST derived from the isotopic series (calculated), as shown in figure 7, there are discrepancies during some years.

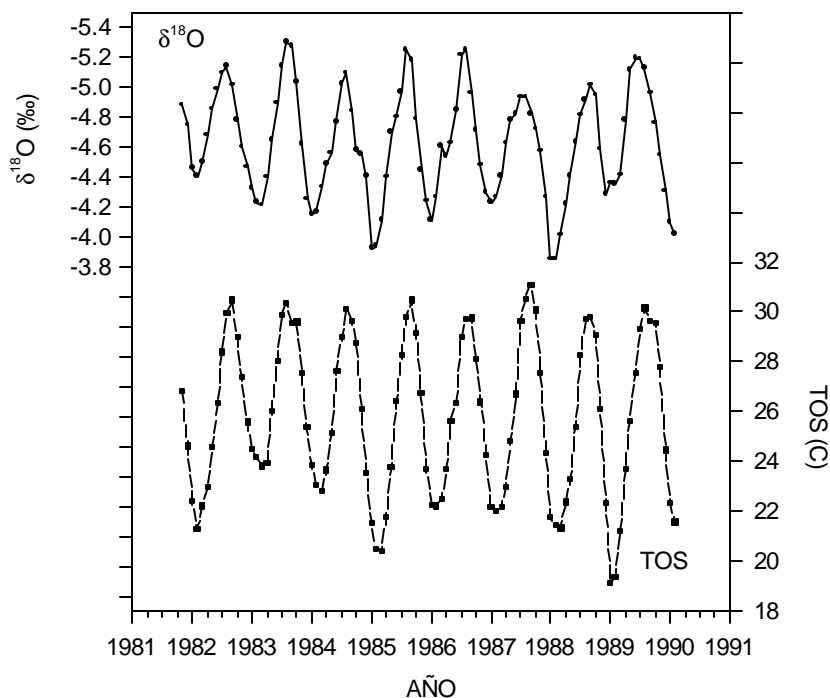


Figura 5. Relación entre la temperatura superficial del mar (TOS) y la señal isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ en Cabo Pulmo, Baja California Sur, México
Figure 5. Relationship between sea surface temperature (TOS) and the coral $\delta^{18}\text{O}$ isotopic signal at Cabo Pulmo, Baja California Sur, Mexico.

La pendiente es alta con respecto a los valores más comunes en corales (alrededor de 4.9), así como para el de la aragonita coralina (4.3, Epstein y Mayeda, 1953). Además, al comparar la serie de TOS de Reynolds (medida) con una serie de TOS derivada de la serie isotópica (calculada), tal como se aprecia en la figura 7, hay discrepancias durante algunos años.

Otros trabajos han reportado ecuaciones con pendientes altas en corales del género *Pavona* (8.19 y 9.4, Dunbar *et al.*, 1994; DeVilliers *et al.*, 1995). Ambos trabajos se realizaron en Galápagos y explican este valor por efectos de crecimiento. Sin embargo, en el coral de Cabo Pulmo no es posible explicar las discrepancias por este efecto, por lo menos para todos los casos. Otros trabajos realizados

Other studies have reported equations with steep slopes in corals of the genus *Pavona* (8.19 and 9.4, Dunbar *et al.*, 1994; DeVilliers *et al.*, 1995). Both studies were carried out at the Galapagos Islands and explain this value as an effect of growth. However, this effect cannot be used to explain the discrepancies in the Cabo Pulmo coral, at least not for all the cases. Other studies carried out at the Galapagos Islands with corals of the same genus, but in which the isotopic composition of the water is considered (McConnaughey, 1989; Wellington *et al.*, 1996), introduce equations with slopes similar to the equation for marine carbonates. It can thus be assumed that the differences between the temperatures calculated and those measured are due to the effect of the isotopic composition of the water.

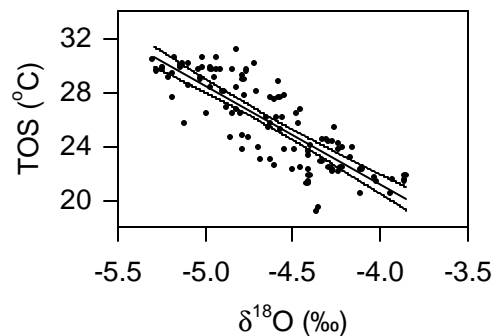


Figura 6. Diagrama de dispersión $\delta^{18}\text{O}$ /temperatura superficial del mar (TOS) mostrando la regresión lineal con un intervalo de confianza del 95%.

Figure 6. $\delta^{18}\text{O}$ vs sea surface temperature (TOS) dispersion diagram, showing linear regression with a confidence interval of 95%.

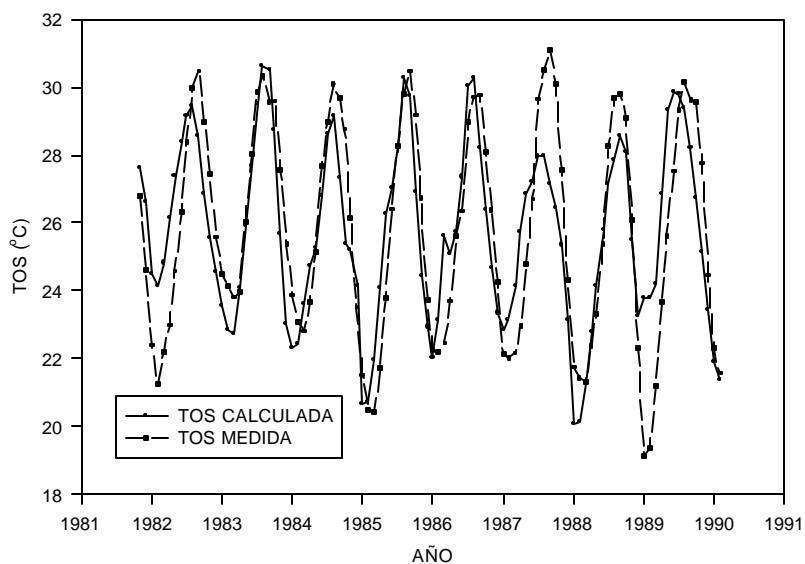


Figura 7. Comparación entre la temperatura superficial del mar (TOS) observada (COADS) y la reconstruida a partir del $\delta^{18}\text{O}$ de la ecuación (1).

Figure 7. Comparison between the sea surface temperatures (TOS) observed (COADS) and reconstructed from coral $\delta^{18}\text{O}$ using equation (1).

en Galápagos con corales del mismo género, pero teniendo en cuenta la composición isotópica del agua (McConnaughey, 1989; Wellington *et al.*, 1996), presentan ecuaciones con pendientes cercanas a la ecuación para carbonatos marinos. Esto hace suponer que las diferencias entre las temperaturas calculadas y las medidas se deben al efecto de la composición isotópica del agua.

Es decir, a pesar de existir una alta correlación del $\delta^{18}\text{O}$ coralino con la temperatura, la composición isotópica del agua tiene un efecto sobre el esqueleto del coral que no está considerado en la ecuación de paleotemperatura. Existen pocas mediciones de la composición isotópica del agua cerca de la zona de estudio. Juillet-Leclerc y Schrader (1987) reportaron valores de 0.2 para las aguas superficiales del golfo, de -0.2 para aguas de surgencia, de 0.0 para el agua ecuatorial y de -0.1 para agua de la Corriente de California. Epstein y Mayeda (1953) reportaron valores de -0.44‰ y -0.53‰ en el agua de localidades afectadas por la Corriente de California, y Grossman y Ku (1986) citan un valor de -0.3‰. En cambio, para la Corriente de Costa Rica se ha reportado un valor de +0.02 (Epstein y Mayeda, 1953). Esto significa que según la variabilidad estacional, las aguas que llegan al arrecife de Cabo Pulmo son frías y más ligeras cuando están influenciadas por la Corriente de California, y cálidas y más pesadas cuando están influenciadas por agua superficial ecuatorial, lo que supone efectos contrarios entre la señal térmica y del agua sobre el $\delta^{18}\text{O}$ coralino.

Weber y Woodhead (1972) encontraron que las ecuaciones de paleotemperatura para corales de diferentes géneros difieren, aunque las curvas de TOS/ $\delta^{18}\text{O}$ son paralelas o casi paralelas a la ecuación de carbonatos marinos de Epstein *et al.* (1953). Por tanto, de las ecuaciones reportadas para el género *Pavona*, se usó la ecuación (2) de Wellington *et al.* (1996)

Therefore, despite the high correlation of $\delta^{18}\text{O}$ with the temperature, the isotopic composition of the water has an effect on the coral's skeleton that is not considered in the paleotemperature equation. There are few measurements of the isotopic composition of the water in the study area. Juillet-Leclerc and Schrader (1987) reported values of 0.2 for the surface waters of the gulf, of -0.2 for upwelling waters, of 0.0 for Equatorial water and of -0.1 for California Current water. Epstein and Mayeda (1953) reported values of -0.44‰ and -0.53‰ for the water in areas affected by the California Current, whereas Grossman and Ku (1986) report a value of -0.3‰. On the other hand, for the Costa Rica Current, values of +0.02 have been reported (Epstein and Mayeda, 1953). This means that according to the seasonal variability, the waters arriving at Cabo Pulmo reef are cool and lighter when influenced by the California Current, and warm and heavier when influenced by Equatorial surface water, indicating opposite effects on the coral $\delta^{18}\text{O}$ between the thermal signal and the water.

Weber and Woodhead (1972) found that the paleotemperature equations for corals of different genera differ, although the SST/ $\delta^{18}\text{O}$ curves are parallel or almost parallel to the marine carbonate equation of Epstein *et al.* (1953). Therefore, of the equations reported for the genus *Pavona*, equation (2) of Wellington *et al.* (1996) was used to calculate the isotopic values of the water, using the coral $\delta^{18}\text{O}$ values and the sea surface temperatures (fig. 8):

$$\text{SST (}^{\circ}\text{C)} = 4.81 - 4.99(\delta\text{c} - \delta\text{w}) \quad (2)$$

This equation was selected because it has a slope value very close to the mean of all the equations for the genus *Pavona*. The annual periodicity expected was found (heavier values in summer and autumn, and lighter values in winter and spring). Moreover, during 1989, when the most intense La Niña affected the

para calcular los valores isotópicos del agua a partir de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ del coral y las temperaturas superficiales del mar (fig. 8):

$$\text{TOS } (^{\circ}\text{C}) = 4.81 - 4.99(\delta\text{c} - \delta\text{w}) \quad (2)$$

Esta ecuación fue seleccionada ya que tiene un valor de pendiente muy cercano a la media de todas las ecuaciones para el género *Pavona*. Se encontró la ciclicidad anual esperada (valores más pesados en verano y otoño y más ligeros en invierno y primavera). Además, durante el año de 1989, en que La Niña más intensa afectó la zona durante el periodo estudiado, se observan los valores más ligeros, mientras que durante El Niño 1982/83, la señal ligera de verano y otoño parece estar inhibida. Debido a que hasta el momento no se cuenta con mediciones de la composición isotópica del agua en el arrecife de Cabo Pulmo, el uso de la ecuación de Wellington *et al.* (1996) para los corales del Golfo de California nos proporciona la posibilidad de evaluar las variaciones de δw a través del tiempo, a pesar de no haber sido validada dicha relación para esta zona.

En la figura 9 se presentan los ciclos anuales promedio de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en el coral. El $\delta^{18}\text{O}$ presenta un máximo en enero y un mínimo en agosto, coincidente con los mínimos y máximos, respectivamente, de la temperatura oceánica superficial en el área, tal como se esperaba según el análisis anterior. En cambio, el comportamiento medio anual de $\delta^{13}\text{C}$ refleja dos máximos al año, uno principal en agosto y otro secundario en febrero. Ambos coinciden con los dos periodos de mayor cobertura de nubes en el área (Soto, 1996). Esta relación es inversa a lo esperado según las hipótesis más aceptadas del control del $\delta^{13}\text{C}$ por insolación (Cole y Fairbanks, 1990; Wellington y Dunbar, 1995; Swart *et al.*, 1996a). Se espera que durante épocas de alta luminosidad, el papel simbiótico de la zooxantela aumente, enriqueciendo el reservorio a partir del cual se produce

area during the study period, the lightest values were recorded, whereas during the 1982/83 El Niño, the light summer and autumn signal seems to be inhibited. As there are no measurements to date of the isotopic composition of the water at Cabo Pulmo reef, the use of Wellington *et al.*'s (1996) equation for the Gulf of California corals allows us to assess the δw fluctuations in time, even though this relationship has not been validated for this area.

The average annual cycles of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in the coral are presented in figure 9. The $\delta^{18}\text{O}$ shows a maximum in January and a minimum in August, which coincide with the minimums and maximums, respectively, of the oceanic surface temperature in the area, as expected according to the previous analysis. On the other hand, the mean annual behavior of $\delta^{13}\text{C}$ reveals two maximums per year, the main one in August and a secondary one in February, both coinciding with the two periods of greatest cloud cover in the area (Soto, 1996). This relationship is opposite to that expected according to the most accepted hypotheses of $\delta^{13}\text{C}$ being controlled by insolation (Cole and Fairbanks, 1990; Wellington and Dunbar, 1995; Swart *et al.*, 1996a). The symbiotic role of the zooxanthella is expected to increase during the season of higher luminosity, enriching the reservoir from which calcification takes place, and finally generating a heavier skeleton. On the contrary, it has been noticed at Cabo Pulmo that during periods of high luminosity, the skeleton is lighter. In addition, the $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ relationship is inverse, whereas in areas where the maximum insolation coincides with warm waters, a positive correlation is expected.

The great variance in the monthly means raises questions about the significance of this annual pattern; however, in the original series, the occurrence of the two annual minimums and maximums is observed and it is important

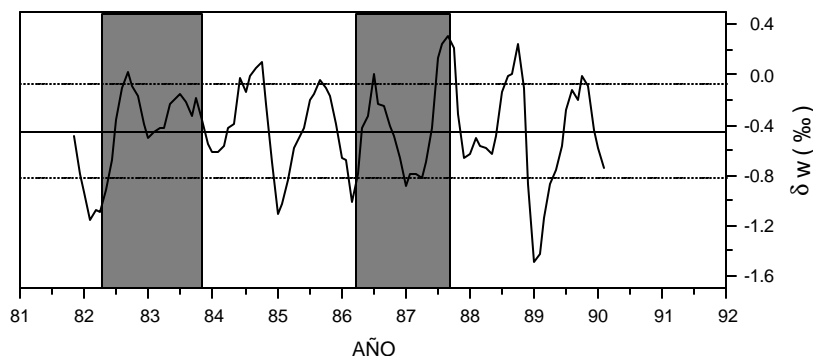


Figura 8. Variación estacional e interanual de la composición isotópica del agua oceánica (δw) en el arrecife de Cabo Pulmo, México.

Figure 8. Seasonal and interannual variability of the isotopic composition of the water (δw) at Cabo Pulmo reef, Mexico.

la calcificación y, finalmente, generando un esqueleto más pesado. Contrariamente, en Cabo Pulmo se nota que en periodos de alta luminosidad, el esqueleto es más ligero. Además, la relación $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ es inversa, mientras que en zonas donde la máxima insolación coincide con aguas cálidas se espera una correlación positiva.

La gran varianza de las medias mensuales hace cuestionar la significancia de este patrón anual; sin embargo, en la serie original se observa la ocurrencia de los dos mínimos y máximos anuales y es importante indagar sobre su origen. Se ha documentado que en sitios con surgencia local fuerte, la transparencia del agua es reducida por afloramientos de fitoplancton durante periodos de insolación alta, lo cual podría invertir la relación $\delta^{13}\text{C}/\text{insolación}$ (Cole y Dunbar, 1993). Los mínimos anuales de $\delta^{13}\text{C}$ podrían explicarse por los periodos de surgencia en el Golfo de California, que pueden ocasionar una disminución en la actividad de la zooxantela y posiblemente un aumento en la heterotrofia del coral. El mínimo de verano podría explicarse debido a que la surgencia en la costa occidental coincide con la mayor luminosidad en el área, pudiendo crear un

to investigate their origin. It has been reported from sites with strong local upwelling that water transparency is reduced by phytoplankton blooms during periods of high insolation, which might change the $\delta^{13}\text{C}/\text{insolación}$ relationship (Cole and Dunbar, 1993). The $\delta^{13}\text{C}$ annual minimums could be explained by the upwelling periods in the Gulf of California, which may cause a decrease in the activity of the zooxanthella and, possibly, increase the coral heterotrophy. An explanation for the summer minimum could be that the west coast upwelling coincides with the greatest luminosity in the area, creating suitable conditions for a phytoplankton bloom. The winter minimum, much more pronounced, could be explained by the same effect, if the upwelling waters from the east coast happen to be driven towards the west coast, even though they lose biomass during their transport (Collins *et al.*, 1997). The time series closest to Cabo Pulmo, presented by Santamaría-del Ángel *et al.* (1994), shows pigment concentration maximums from November to February that coincide with the main $\delta^{13}\text{C}$ minimum in winter. Hence, the two $\delta^{13}\text{C}$ maximums would occur in periods of maximum activity of the

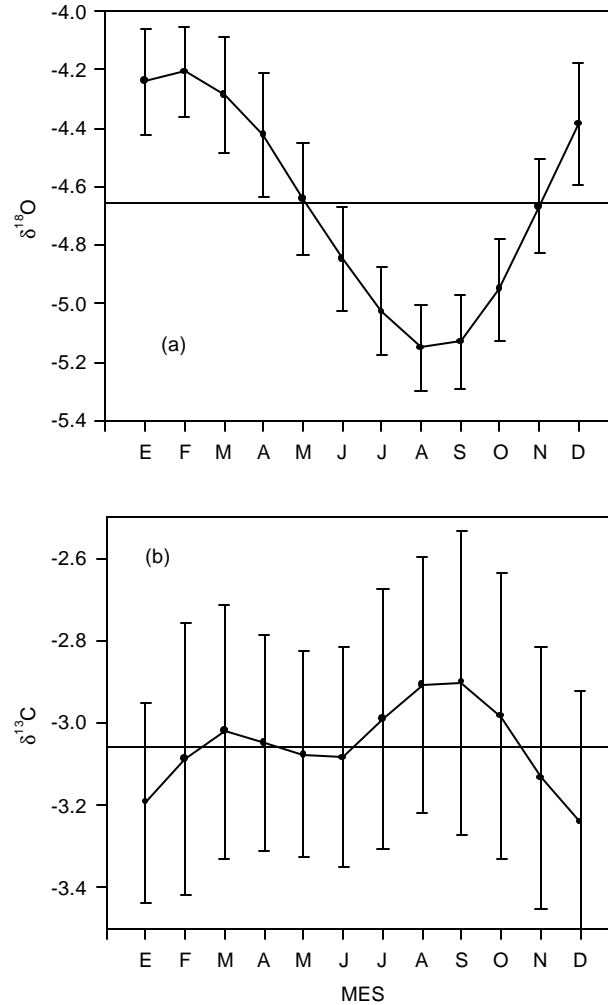


Figura 9. Ciclo anual promedio del $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en las bandas de crecimiento esquelético coralino.
Figure 9. Mean annual cycle of monthly $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in coral skeletal growth bands.

afloramiento de fitoplancton. El mínimo de invierno, mucho más pronunciado, podría explicarse por el mismo efecto, si sucede que aguas de surgencia de la costa oriental son llevadas hacia la costa occidental, aunque pierden biomasa durante el transporte (Collins *et al.*, 1997). La serie de tiempo más cercana a Cabo Pulmo presentada por Santamaría-del Ángel *et*

zooxanthella, when there is no upwelling, in spite of the cloudiness.

On the other hand, the spectral analysis of the isotopic series (fig. 10) indicates that the annual variability dominates the $\delta^{18}\text{O}$ series, whereas the variability of the $\delta^{13}\text{C}$ series is dominated by biannual, annual and, above all, eight-year periods. As the results show that the

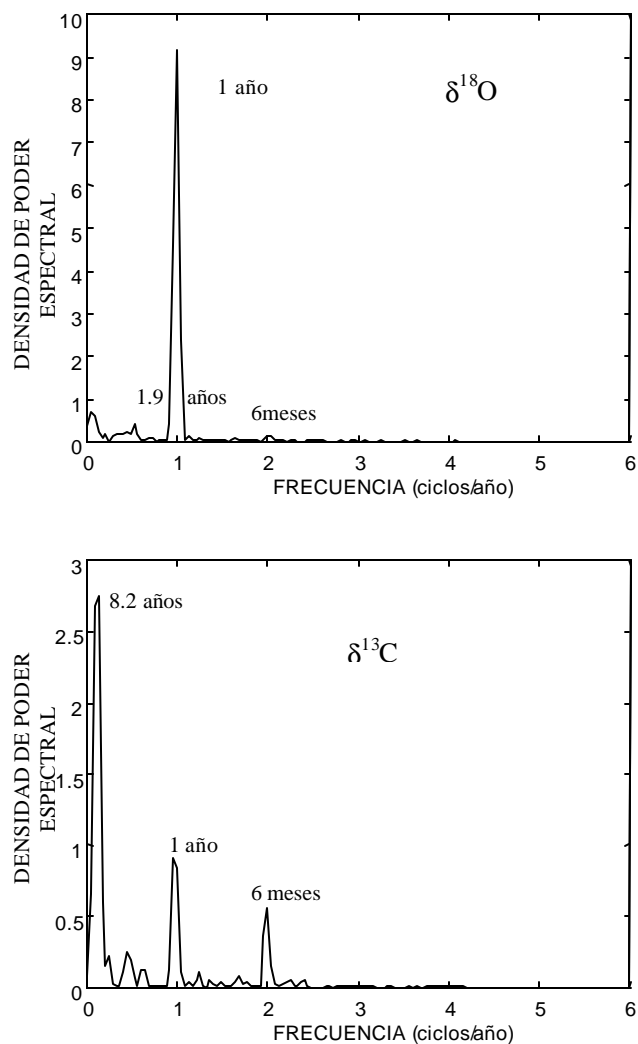


Figura 10. Análisis espectral de las series isotópicas coralinas, Cabo Pulmo, México
Figure 10. Spectral analysis of the coral isotopic series, Cabo Pulmo, Mexico.

al. (1994) muestra máximos de concentración de pigmentos en el periodo de noviembre a febrero que coinciden con el mínimo principal de $\delta^{13}\text{C}$ en invierno. Los dos máximos de $\delta^{13}\text{C}$ se presentarían entonces en periodos de la máxima actividad de la zooxantela, cuando no hay surgencia, a pesar de la nubosidad.

main factor controlling the $\delta^{18}\text{O}$ in the area is temperature, a spectral analysis was made of the COADS SST series, revealing a dominance of the annual periodicity. When the seasonal signal of the original series is eliminated, then both spectra ($\delta^{18}\text{O}$ and temperature) indicate two- and four-year periodicities, which,

Por otro lado, el análisis espectral de las series isotópicas (fig. 10) indica que la variabilidad anual domina la serie de $\delta^{18}\text{O}$, mientras que la variabilidad de la serie de $\delta^{13}\text{C}$ se concentra en periodos semestrales, anuales y principalmente cada ocho años. Dado que según los resultados el principal factor que controla el $\delta^{18}\text{O}$ en la región es la temperatura, se realizó un análisis espectral a la serie de TOS de COADS y se encontró precisamente una dominancia de la periodicidad anual. Únicamente al eliminar la señal estacional de las series originales, ambos espectros ($\delta^{18}\text{O}$ y temperatura) resaltan periodicidades de dos y cuatro años, correspondientes, sin duda, a los periodos de oscilación de El Niño. No se conoce si el periodo de ocho años que domina la señal de $\delta^{13}\text{C}$ es una señal de productividad, tal y como se interpretó la dependencia estacional de este parámetro, pero las periodicidades semestral y anual sí pueden responder a este factor.

CONCLUSIONES

Las aguas que bañan el arrecife de Cabo Pulmo son más frías y ligeras isotópicamente en invierno y primavera, y más cálidas y pesadas durante verano y otoño.

El $\delta^{18}\text{O}$ coralino en el área depende principalmente de la temperatura. Sin embargo, la señal isotópica del agua juega un papel importante, debido a que su efecto sobre la señal del coral es inverso al efecto de la temperatura.

A pesar de que las lluvias ocurren en verano y otoño, su efecto sobre el agua no se detectó en los datos de salinidad disponibles, ni en la reconstrucción de la señal isotópica del agua a partir de la temperatura y $\delta^{18}\text{O}$ coralino. Ello indica que las lluvias son insignificantes en comparación con los procesos de circulación oceánica en controlar las variaciones de $\delta^{18}\text{O}$ del agua (i.e., el volumen de agua aportado por lluvias es despreciable comparado con el que es

undoubtedly, correspond to the oscillation periods of El Niño. It is not known whether or not the eight-year period dominating the $\delta^{13}\text{C}$ signal is a signal of productivity, as was interpreted for the seasonal dependence of this parameter, but the biannual and annual periodicities can respond to this factor.

CONCLUSIONS

The waters bathing the Cabo Pulmo reef are cooler and isotopically lighter in winter and spring, and warmer and heavier in summer and autumn.

The coral $\delta^{18}\text{O}$ in the area depends mainly on the temperature. However, the isotopic signal of the water plays an important role, since it has an opposite effect on the coral's signal than that produced by temperature.

Even though the rainy season occurs in summer and autumn, the effect of rainfall on the water was not detected in the salinity data available, nor in the reconstruction of the isotopic signal based on the temperature and coral $\delta^{18}\text{O}$. This indicates that rainfall is insignificant in controlling the seawater $\delta^{18}\text{O}$, when compared to the oceanic circulation processes (i.e., the volume of water contributed by rainfall is negligible in comparison to that provided by the oceanic water masses that are transported to the study area and mixed with the local waters).

The $\delta^{13}\text{C}$ in the Cabo Pulmo coral seems to be associated more with periods of high productivity in the area than with insolation. Apparently, the activity of the zooxanthella decreases during local upwelling periods.

The $\delta^{18}\text{O}$ signal in the coral is dominated by an annual periodicity, as well as by SST; however, when this component is eliminated, the particular periodicities of ENSO stand out. The effects of the 1982/83 El Niño and the 1989 La Niña are clearly evident in the SST and calculated $\delta^{18}\text{O}$ series of the water.

aportado por las masas de agua oceánicas que son transportadas a la zona de estudio y que se mezclan con las locales).

El $\delta^{13}\text{C}$ en el coral de Cabo Pulmo parece estar más asociado con los periodos de alta productividad del área que con la insolación. Al parecer, la actividad de la zooxantela disminuye durante periodos de surgencia en la zona.

Espectralmente hablando, la señal de $\delta^{18}\text{O}$ en el coral está dominada por la periodicidad anual, así como la TOS; sin embargo, al eliminar esta componente se resaltan periodicidades propias de ENOA. El efecto de El Niño 1982/83 y La Niña 1989 es muy claro en las series de TOS y de $\delta^{18}\text{O}$ calculado del agua. En cambio, la variabilidad del $\delta^{13}\text{C}$ coralino no tiene una asociación tan clara con ENOA.

Los resultados de este trabajo revelan que los carbonatos biogénicos en la boca del Golfo de California pueden servir como trazadores paleoambientales de alta fidelidad. Cuanto más se conozca sobre el comportamiento y dependencia de los isótopos estables en los diferentes organismos calcáreos de la región, será posible una mayor precisión en las reconstrucciones paleoceanográficas a partir de los mismos. En el caso de los corales, la alta dependencia térmica del $\delta^{18}\text{O}$ (según la regresión lineal, un 70%) indica que son excelentes indicadores de TOS, mientras que el $\delta^{13}\text{C}$ podría usarse como indicador de las variaciones en la productividad oceánica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (proyecto 2469P-T) el apoyo económico para esta investigación. Al Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California y a Pedro Castro el apoyo logístico. A COADS y el NCEP las bases de datos de temperatura superficial del mar desarrolladas por Reynolds y otros. A Colfuturo la

However, the variability of the coral $\delta^{13}\text{C}$ does not have such a clear association with ENSO.

The results of this work reveal that the biogenic carbonates at the entrance of the Gulf of California can be used as high-fidelity paleoenvironmental tracers. More knowledge of the behavior and dependence of stable isotopes in the different calcareous organisms of the region, will allow greater precision in the paleoceanographic reconstructions based on them. In the case of corals, the high thermal dependence of the $\delta^{18}\text{O}$ (70%, according to the linear regression) indicates that they are excellent tracers of SST, whereas the $\delta^{13}\text{C}$ could be used as an indicator of the fluctuations in the oceanic productivity.

ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks are given to the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología of Mexico (project 2469P-T) for the financial support of this research; to the Instituto de Investigaciones Oceanológicas of the Universidad Autónoma de Baja California and to Pedro Castro for logistic support; to COADS and NCEP for the data bases of the sea surface temperature developed by Reynolds and others; to Colfuturo for the scholarship to the first author that made this work possible, and to all the technicians and people that supported this study.

English translation by Manuel Gardea.

beca al primer autor, que hizo posible este trabajo, y a todos los técnicos y personas que colaboraron con este estudio.

REFERENCIAS

Álvarez-Borrego, S. (1983). Gulf of California. In: B.H. Ketchum (ed.), *Ecosystems of the World. Estuaries and Enclosed Seas*. Elsevier Scientific, Amsterdam, pp. 427–449.

- Baumgartner, T.R. and Christensen, N. Jr. (1985). Coupling of the Gulf of California to large-scale interannual climatic variability. *J. Mar. Res.*, 43: 825–848.
- Buddemeier, R.W. and Kenzie, R.A. (1976). Coral growth. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 14: 183–225.
- Buddemeier, R.W., Maragos, J.E. and Knutson, D.W. (1974). Radiographic studies of reef coral exoskeletons: Rates and patterns of coral growth. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 14: 179–200.
- Carriquiry, J.D. (1994). Fraccionamiento del ^{18}O en la aragonita coralina de *Porites lobata*: Implicaciones en los estudios de paleotemperatura oceánica. *Ciencias Marinas*, 20(4): 585–606.
- Carriquiry, J.D., Risk, M.J. and Schwarcz, H.P. (1988). Timing and temperature record from stable isotopes of the 1982–83 El Niño warming event in eastern Pacific corals. *Palaios*, 3: 359–364.
- Carriquiry, J.D., Risk, M.J. and Schwarcz, H.P. (1994). Stable isotope geochemistry of corals from Costa Rica as proxy indicator of the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58: 335–351.
- Cole, J.E. and Fairbanks, R.G. (1990). The Southern Oscillation recorded in the $\delta^{18}\text{O}$ of corals from Tarawa atoll. *Paleoceanography*, 5(5): 669–683.
- Cole, J.E. and Dunbar, R. (1993). Coral records of ocean-atmosphere variability. *Climate and Global Change Program. NOAA Spec. Rep. No.10*, 38 pp.
- Cole, J.E., Fairbanks, R.G. and Shen, G.T. (1993). Recent variability in the Southern Oscillation: Isotopic results from a Tarawa atoll coral. *Science*, 260: 1790–1793.
- Collins, C.A., Garfield, N., Mascarenhas, A.S. Jr., Spearman, M.G. and Rago, T.A. (1997). Ocean currents across the entrance to the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 102(C9): 20927–20936.
- DeVilliers, S., Nelson, B.K. and Chivas, A.R. (1995). Biological controls on coral Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ reconstructions of sea surface temperatures. *Science*, 269: 1247–1249.
- Dodge, R.E. and Vaisnys, J.R. (1980). Skeletal growth chronologies of recent and fossil corals. In: D.L. Rhodes and R.A. Lutz (eds.), *Skeletal Growth of Aquatic Organisms: Biological Records of Environmental Change*. Plenum Press, New York, pp. 493–596.
- Dunbar, R.B., Wellington, G.M., Colgan, M.W. and Glynn, P.W. (1994). Eastern Pacific sea surface temperature since 1600 A.D.: The $\delta^{18}\text{O}$ record of climatic variability in Galapagos corals. *Paleoceanography*, 9(2): 291–315.
- Epstein, S. and Mayeda, T. (1953). Variation of O^{18} content of waters from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 4: 213–224.
- Epstein, S., Buschbaum, R., Lowenstam, H.A. and Urey, H.C. (1953). Revised carbonate-water isotopic temperature scale. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 64: 1315–1325.
- Fairbanks, R.G. and Dodge, R.E. (1979). Annual periodicity of the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in the coral *Montastrea annularis*. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43: 1009–1020.
- Grossman, E.L. and Ku, T.L. (1986). Oxygen and carbon isotope fractionation in biogenic aragonite: Temperature effects. *Chem. Geol.*, 59: 59–74.
- Juillet-Leclerc, A. and Schrader, H. (1987). Variations of upwelling intensity recorded in varved sediment from the Gulf of California during the past 3000 years. *Nature*, 329: 146–149.
- Lavín, M.F., Beier, E. y Badan, A. (1997). Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. En: M.F. Lavín (ed.), *Contribuciones a la Oceanografía Física en México. Monografía, Unión Geofísica Mexicana*, 3: 139–169.
- Leder, J.J., Swart, P.K., Szmant, A.M. and Dodge, R.E. (1996). The origin of variations in the isotopic record of scleractinian corals. I. Oxygen. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60(15): 2857–2870.
- López, B.J.M. (1996). Hidrografía y dinámica del Pacífico transicional mexicano. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C., México, 99 pp.
- Lough, J.M., Barnes, D.J. and Taylor, R.B. (1995). The potential of massive corals for the study of high resolution climate variation in the past millenium. In: P.D. Jones, R.S. Bristley and J.

- Janzel (eds.), *Climate Variations and Forcing Mechanisms of the last 2000 years*. Springer Verlag, New York, pp. 1–14.
- McConnaughey, T. (1989). ^{13}C and ^{18}O isotopic disequilibrium in biological carbonates. I. Patterns. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 151–162.
- Moore, W.S., Krishnaswami, S. and Bhat, S.G. (1973). Radiometric determinations of coral growth rates. *Bull. Mar. Sci.*, 23: 157–176.
- Norton, J., McLain, D., Brainard, R. and Husby, D. (1985). The 1982-83 El Niño event off Baja and Alta California and its ocean climate context. In: W.S. Wooster and D.L. Fluharty (eds.), *El Niño North*. Washington Sea Grant Program, Univ. of Washington, Seattle, pp. 44–72.
- Quinn, T.M., Taylor, F.W. and Crowley, T.J. (1993). A 173 year stable isotope record from a tropical south Pacific coral. *Quatern. Sci. Rev.*, 12: 407–418.
- Quinn, T.M., Taylor, F.W., Crowley, T.J. and Link, S.M. (1996). Evaluation of sampling resolution in coral stable isotope records: A case study using records from New Caledonia and Tarawa. *Paleoceanography*, 11(5): 529–542.
- Robles, J.M. and Marinone, S.C. (1987). Seasonal and interannual thermohaline variability in the Guaymas Basin of the Gulf of California. *Continental Shelf Res.*, 7(7): 715–733.
- Santamaría-del Ángel, E., Álvarez-Borrego, S. and Muller-Karger, F.E. (1994). Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *J. Geophys. Res.*, 99(C4): 7411–7421.
- Shen, G.T. (1993). Reconstruction of El Niño history from reef corals. *Bull. Inst. Fr. Etudes Andines*, 22(1): 125–158.
- Shen, G.T., Cole, J.E., Lea, D.W., Linn, L.J., McConnaughey, T.A. and Fairbanks, R.G. (1992). Surface ocean variability at Galapagos from 1936–1982: Calibration of geochemical tracers in corals. *Paleoceanography*, 7(5): 563–588.
- Soto, J.F. (1996). Detección del fenómeno de El Niño en el Pacífico mexicano mediante el estudio de metales traza en corales de Cabo Pulmo e Isla Socorro, México. Tesis de maestría Universidad Autónoma de Baja California, México, 85 pp.
- Stensrud, D.J., Gall, R.L. and Nordquist, M.K. (1997). Surges over the Gulf of California during the Mexican monsoon. *Monthly Weather Rev.*, 125: 417–437.
- Swart, P.K., Dodge, R.E. and Hudson, H.J. (1996a). A 240-year stable oxygen and carbon isotopic record in a coral from South Florida: Implications for the prediction of precipitation in southern Florida. *Palaos*, 11: 362–375.
- Swart, P.K., Leder, J.J., Szmant, A.M. and Dodge, R.E. (1996b). The origin of variations in the isotopic record of scleractinian corals. II. Carbon. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60(15): 2871–2885.
- Thunell, R., Pride, C., Ziveri, P., Muller-Karger, F., Sancetta, C. and Murray, D. (1996). Plankton response to physical forcing in the Gulf of California. *J. Plankton Res.*, 18(11): 2017–2026.
- Torres-Orozco, E. (1993). Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C., México, 80 pp.
- Tudhope, A.W., Lea, D.W., Shimmield, G.B., Chilcott, C.P. and Head, S. (1996). Monsoon climate and Arabian Sea coastal upwelling recorded in massive corals from southern Oman. *Palaos*, 11: 347–361.
- Weber, J.N. and Woodhead, P.M.J. (1972). Temperature dependence of oxygen-18 concentration in reef coral carbonates. *J. Geophys. Res.*, 77: 464–473.
- Wellington, G.M. and Dunbar, R.B. (1995). Stable isotopic signature of El Niño-Southern Oscillation events in eastern Pacific reef corals. *Coral Reefs*, 14: 5–25.
- Wellington, G.M., Dunbar, R.B. and Merlen, G. (1996). Calibration of stable isotope signatures in Galapagos corals. *Paleoceanography*, 11(4): 467–480.