

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE  
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA.

DIVISIÓN DE OCEANOLOGÍA  
DEPARTAMENTO DE ECOLOGÍA

**Sobre la reconstrucción de temperatura superficial del mar a partir de  
foraminíferos planctónicos en sedimentos de alta resolución temporal.**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS presenta

ANA BEATRÍZ CONTRERAS RUÍZ ESPARZA

**RESUMEN** de la Tesis de **Ana Beatriz Contreras Ruíz Esparza**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **Maestro en Ciencias en Ecología Marina**. Ensenada, Baja California, México, Junio del 2001.

Sobre la reconstrucción de la temperatura del mar a partir de foraminíferos planctónicos en sedimentos de alta resolución temporal.

Resumen aprobado por:

---

Dr. Juan Carlos Herguera García.  
Director de Tesis

En este trabajo exploramos la posibilidad de reconstruir las temperaturas superficiales del mar (TSM) de la frontera meridional de la Corriente de California a partir de asociaciones de foraminíferos pláncnicos preservadas en los sedimentos laminados de alta resolución de la Cuenca de San Lázaro. Se utilizó el Método de Análogos Revisado (MAR), con el cual la reconstrucción de la TSM a escalas glaciares-interglaciares tiene un menor error de reconstrucción comparado con otros métodos propuestos (Waelbroeck *et al.*, 1998). Se aplicó éste método a registros de alta resolución temporal de foraminíferos pláncnicos de cuatro núcleos de la cuenca San Lázaro (25°15'N, 112 ° 45'E, 540m).. La base de referencia contra la que se compararon estas series incluye las asociaciones de foraminíferos pláncnicos observados en muestras de sedimento superficial de todo el Pacífico. Con el fin de explorar la sensibilidad latitudinal y taxonómica del método se realizaron seis simulaciones en las que se variaron la cobertura geográfica de la base de referencia y el número de especies utilizadas: a) todas las muestras del Pacífico, b) excluyendo las muestras por debajo de los 40°S, c) incluyendo sólo las muestras comprendidas entre los 30° S y N, utilizando d) trece y e) nueve de las especies más abundantes en San Lázaro y f) las especies someras que viven por arriba de los 100 m. Mostramos como este método además de no reconstruir precisamente las fluctuaciones interanuales de temperatura observadas instrumentalmente en esta región, reproduce amplitudes mayores que las reportadas. Sin embargo, cuando utilizamos sólo 13 y 9 de las especies mas abundantes del núcleo bap96-6c no observamos diferencias significativas entre la media de la TSM fría reconstruida y la observada en el sitio para los últimos 40 años. Cuando se comparó con el promedio de temperatura entre Punta Eugenia y San Lázaro se obtuvo el mismo resultado y tampoco hubo diferencias significativas entre la TSM cálida reconstruida con 13 especies y la TSM cálida observada. *Globigerina bulloides*, la especie más abundante en las series estudiadas, muestra una variabilidad coherente con la TSM observada (promedios de diciembre-abril) para los últimos 75 años, a pesar de que el coeficiente de correlación fue bajo ( $r=0.27$ ). La correlación aumenta prácticamente al doble cuando se compara el promedio corrido de 5 años de ambas series. La serie de tiempo de la especie *Globigerinita glutinata* está en contrafase a la de *G. bulloides* en el núcleo bap96-6c.

Palabras clave: Foraminíferos pláncnicos, Reconstrucción de TSM, Método de análogos revisado, Cuenca San Lázaro.

**Abstract** of the thesis of **Ana Beatriz Contreras Ruíz Esparza**, as a partial requirement to obtain the **Master of Sciences** grade in **Marine Ecology**. Ensenada, Baja California, México, June 2001.

About sea surface temperature reconstruction using planktic foraminifers as a proxy in high-temporal resolution sediments.

We explore the reliability of sea surface temperature reconstructions (SST) based on planktonic faunal composition preserved in high-resolution sediments. The Revised Analog Method (RAM) has been shown to estimate paleoSST with lower reconstruction errors compared with other existent methods in glacial-interglacial scales (Waelbroeck, et al. 1998). We applied the method to high-resolution records of planktic foraminifers in four cores from San Lázaro Basin (25°15'N, 112°45'E, 540m). Faunal assemblages of core tops from the Pacific Ocean were used as reference data base. To explore geographic and taxonomic sensibility of the method, we made 6 simulations varying geographic range and number of species used: a) complete data base, b) excluding cores below 40°S, c) only core-tops between 30° S y N, using only d) the thirteen and nine most abundant species in San Lázaro Basin y f) shallow species (living above 100m). The Method was unable to reconstruct interannual variations of observed SST, and reproduce larger amplitudes than real. However, using 13 y 9 species from core bap96-6c, the cold SST reconstructed and the measured does not show significant differences

*Globigerina bulloides* series is coherent with the last 75 years of observed SST (December-April averages), despite of the low correlation coefficient ( $r=0.27$ ). This correlation increases almost twice when 5-years moving averages are calculated. *Globigerinita glutinata* time-series has an opposite pattern than *G. bulloides* in core bap96-6c.

Key words: Planktic foraminifers, SST estimates, Revised Analog Method and San Lázaro Basin.

*Aquí no pasa nada...*

*no es más que la vida pasando de la noche a las ventanas*

Eliseo Diego

*A todas mis familias*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Juan Carlos Herguera por compartir su conocimiento y su pasión sobre los procesos de gran escala. Por enseñarme a descifrar el tiempo a través de las pequeñas ventanas en el agua. Por su siemprepereno buen talante aún en medio de los vendavales.

A Helmut Maske a quien le aprendí la importancia de ser meticulosa y estricta en el análisis y la interpretación de los resultados... sin que por eso deje de ser un juego divertido.

A Julio Sheinbaum por la paciencia de enseñarme las herramientas básicas para encontrar la coherencia y la armonía de los sucesos. Gracias por todo el tiempo robado.

A Javier Helenes que hizo una cuidadosa revisión del escrito y sus pláticas y sugerencias aportaron mucho en el adiestramiento en este largo proceso que es el lograr escribir diciendo lo que se quiere decir.

A Elena Solana por su ayuda en la parte estadística y su calma en contestar una y otra vez las mismas preguntas.

A Vicente Ferreira por todos estos años de largas pláticas con las que poco a poco se fue haciendo patente el lento, pero ineludible papel de los procesos geológicos y de macroescala en los procesos ecológicos y evolutivos. Por las múltiples y sólidas facetas.

Al mujerío del laboratorio: Gladys, Ana, Bertha, Sara y Auxilio, por el tiempo, el conocimiento, las pláticas, las alegrías y los dolores compartidos.

A Julio Candela que también contribuyó en el análisis de las series, buscando la similitud de mis resultados con las observaciones.

Al CONACyT por la beca que permite prolongar el aprendizaje y retardar el trabajar.

A Moisés Gerardo por soportarme, explicarme y ayudarme con el programa durante mis escapadas al D.F.

A la china y mi papá por la beca familiar que me rescato los últimos meses y por estar siempre ahí.

A Branly Olivier quien generó parte de los datos de esta tesis.

A toda la gente con la que coincidí en tiempo y espacio en esta ciudad de frontera, tan diferente al sur y ahora tan querida. A todos los que de alguna manera con sus pláticas y/o ayuda contribuyeron en esta historia: Fer, Leo, Lulú, Conchis, Jaime, Horacio, Laura, Miguel Ángel, Campos, Ana R., Federico, Gerardo, Rafa, Edgar, Rosina, Jorge, José Luis, Dantenoc, María, Marisol, Carmen, Mireya y Emanuel, Eric, David, los Emilios, y en últimas fechas Aida y Bertha Lavaniegos.

## ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. Los foraminíferos planctónicos	2
I.1.1. Las especies del Pacífico Norte	5
I.2. Fuentes de error	7
I.3. La Corriente de California	8
I.4. Área de estudio	11
I.5. Objetivos	13
II. METODOLOGÍA	14
II.1. Método de Análogos Revisado	15
II.2. Bases de datos	19
II.3. Índices de disolución	22
II.4. Error probable de estimación	23
II.5. Simulaciones	23
III. RESULTADOS	24
III.1. Disolución de las muestras	24
III.2. Núcleos de San Lázaro	26
III.3. Error probable	31
III.4. Reconstrucción de temperatura	32
III.5. Comparación del MAR vs. TAM	51
III.6. Las especies	51
IV. DISCUSIÓN	59
IV. Fuentes de error	59
IV. Efectos del Método	63
IV.3. Las especies	67
V. CONCLUSIONES	71
VI. RECOMENDACIONES	72
. REFERENCIAS	73
APÉNDICE 1	
APÉNDICE 2	

## LISTA DE FIGURAS

Fig.		Pág
1	Localización del área de estudio y batimetría de la Cuenca San Lázaro	12
2	Método de Análogos Revisado	16
3	Ubicación de las muestras superficiales utilizadas como base de referencia	21
4	Índices de disolución calculados a partir de ls muestras del Pacífico: a) Índice Paleoecológico (IPA) e Índice de Fragmentación (IF), b) intervalo de confianza del IPA (media $\pm$ 1.d.e.), c) intervalo de confianza del IF (media $\pm$ 1.d.e.) y d) correlación del IPA vs. IF.	25
5	IPA e intervalo de confianza calculado a partir de los datos de 7 meses de muestreo con trampas en San Pedro, California	25
6	Índice Paleoecológico (IPA) calculado a partir de datos de trampas del Pacífico Oriental Norte.	27
7	Índices de disolución calculados del núcleo bap96-6c: comparación de a) IPA e IF, b) IPA con el intervalo de confianza obtenido de datos de San Pedro, c). IF con el intervalo de confianza obtenido de muestras superficiales del Pacífico y d) correlación entre el IPA y el IF.	27
8	Índices de disolución calculados para el núcleo et97-3c. Leyendas igual que en Fig. 7.	29
9	Índices de disolución calculados para el núcleo ca94-8k. Leyendas igual que en Fig. 7.	29
10	Índices de disolución calculados para el núcleo bap96-6k-II. Leyendas igual que en Fig. 7.	30
11	Reconstrucción de a) temperaturas frías y cálidas de las muestras superficiales del Pacífico y b) los residuales asociados.	33
12	Ubicación de las muestras superficiales que tuvieron un error de reconstrucción de temperatura $>0.05^{\circ}\text{C}$ .	34
13	Reconstrucción de la TSM de San Pedro, utilizando datos de trampas de sedimentos de 7 meses. Temperatura cálida (línea continua delgada), promedio y temperatura fría.	36
14	Perfil de temperatura de enero a julio de 1988 en San Pedro, California. Está sombreado el periodo de surgencias. Tomado de Sautter y Thunell, 1991.	36
15	Núcleo bap96-6c. Temperaturas reconstruidas cálida y fría en las 6 simulaciones.	38
16	Núcleo bap96-6c. Comparación de las temperaturas reconstruidas cálidas y frías de las 6 simulaciones contra las temperaturas de COADS cálidas y frías de a) San Lázaro y b) el promedio de San Lázaro con Punta Eugenia	40
17	Núcleo bap96-6c. Índices de disimilitud (DCC) entre las faunas del núcleo y las de las muestras análogas obtenidos en las 6 simulaciones	42



## Continuación

Fig.		Pág
18	Proyección del núcleo bap96-6c en el espacio generado por los dos primeros modos de la base de referencia del Pacífico.	44
19	Núcleo bap96-6c. Comparación del porcentaje de <i>G. bulloides</i> contra la autosimilitud del núcleo (DCC) del núcleo bap96-6c, con todas las especies y excluyendo a <i>G. bulloides</i> .	44
20	Núcleo et97-3c. Comparación de las temperaturas reconstruidas cálidas y frías de las 6 simulaciones contra las temperaturas de COADS cálidas y frías de a) San Lázaro y b) el promedio de San Lázaro con Punta Eugenia (misma leyenda que Fig. 16).	46
21	Núcleo ca94-8k. Comparación de las temperaturas reconstruidas cálidas y frías de las 6 simulaciones contra las temperaturas de COADS cálidas y frías de a) San Lázaro y b) el promedio de San Lázaro con Punta Eugenia	49
22	Núcleo bap96-6k-II. Temperaturas reconstruidas en las 6 simulaciones (misma leyenda que en Fig. 15).	50
23	Comparación de a) las temperaturas reconstruidas con el método MAR contra el TAM y de éstas últimas contra b) las temperaturas instrumentales en San Lázaro y c) el promedio de San Lázaro y Punta Eugenia (para b y c misma leyenda que en Fig. 16).	52
24	Variación en el tiempo del porcentaje de <i>G. bulloides</i> y <i>G. glutinata</i> en los núcleos bap96-6c, et97-3c y ca94-8k.	54
25	Variación de las proporciones de especies con simbioses superficiales contra las especies sin simbioses y la proporción entre especies con simbioses superficiales contra especies sin simbioses profundas, para los núcleos bap96-6c, et97-3c y bap96-6k-II.	56
26	Comparación de la temperatura de invierno en San Lázaro contra a) <i>G. bulloides</i> , b) <i>G. bulloides</i> pero con promedios corridos de 5 años y d) <i>G. glutinata</i> . También se compara c) <i>G. bulloides</i> contra la serie ss/as. Notar en a y b el eje invertido de <i>G. bulloides</i> .	58
27	Comparación de la serie de <i>G. bulloides</i> contra el primer modo del OPN y la serie del IOS a la que se le hicieron promedios corridos de 13 años.	69
28	Figura 28. Núcleo bap96-6c. Comparación con la serie de 13 especies contra las series generadas al modificar la proporción de cada especie $\pm$ el error mínimo de estimación de la proporción. Se modificó la proporción de la especie en a) en los datos del núcleo y b) en la base de referencia. Sólo se grafican las reconstrucciones de la temperatura fría, para las cálidas los resultados fueron similares.	Ap2

## LISTA DE TABLAS

Tabla		Pag
I	Principales características de las especies más abundantes en la cuenca de San Lázaro	6
II	Relación de los 4 núcleos utilizados en la reconstrucción de la TSM de San Lázaro	19
III	Índices Paleoecológicos (IPA) obtenidos a partir de datos de trampas de sedimentos y muestras superficiales del Pacífico (n=número de datos; X=media; d.e.= desviación estándar).	24
IV	Error probable (en porcentaje) de las 13 especies más abundantes en los cuatro núcleos utilizados (I=intervalo, X=media).	31
V	Comparación entre las series de temperatura reconstruidas para el núcleo bap96-6c y los datos observados de COADS en San Lázaro y el promedio de San Lázaro y Punta Eugenia.	41
VI	Comparación entre las series de temperatura reconstruidas para el núcleo et97-3c y los datos observados de COADS en San Lázaro y el promedio de San Lázaro y Punta Eugenia.	47

## I. INTRODUCCIÓN

Gran parte de la variabilidad climática está controlada por la interacción océano-atmósfera (Mann y Park, 1994). Además del análisis de datos instrumentales y modelos numéricos, reconstrucciones paleoceanográficas y paleoclimáticas de la circulación oceánica y atmosférica en otras épocas nos permiten conocer mejor como funcionan estos procesos, su variabilidad espacio temporal y sus teleconexiones, lo que puede ser útil para comprender los efectos antropogénicos sobre el clima del planeta.

Las variaciones espacio-temporales de la temperatura superficial oceánica y terrestre generan corrientes de aire que favorecen la formación de masas de agua, su estratificación y los patrones dominantes de circulación superficial. Uno de los factores más importantes del clima es la temperatura superficial del mar, por lo cual es importante conocer los detalles de sus cambios. Para la reconstrucción de temperatura superficial del mar se han utilizado las razones de desequilibrio isotópico del  $\delta^{18}\text{O}$  en corales y foraminíferos planctónicos (Linsley, *et al.*, 2000; Crowley, *et al.*, 1999; Field y Baumgartner, 2000) en asociaciones bióticas de diatomeas (Zielinski *et al.*, 1998), radiolarios (Pisias *et al.*, 1997, Weinheimer *et al.*, 1997) y foraminíferos (Imbrie y Kipp, 1971; Prell, 1985; Waelbroeck *et al.*, 1998; Mix *et al.*, 1999, entre otros).

Las diferentes especies de foraminíferos planctónicos se agrupan en provincias biogeográficas bien definidas que tienen una alta correlación con las corrientes y masas de agua oceánicas. Se ha observado un patrón regular en la distribución espacial y temporal de las asociaciones de especies, el cual está altamente correlacionado con la variación latitudinal y estacional de la temperatura superficial (Deuser y Ross, 1989; Thunell y Reynolds, 1984; Sautter y Thunell, 1989; Sautter y Thunell, 1991; Guptha, *et al.*, 1997).

Las conchas de estos organismos se depositan en el fondo marino, formando una parte importante del componente calcítico de los sedimentos (Imbrie y Kipp, 1971; Bé y Hutson, 1977; Coulbourn *et al.*, 1980). Por lo que el estudio de los sedimentos marinos proporciona información importante para la reconstrucción de la historia climática del océano.

Los modelos de reconstrucción paleoclimática basados en estudios de foraminíferos planctónicos, tienen como supuesto que los foraminíferos son sensibles a cambios físicos, químicos y biológicos; que estos cambios se traducen en la ausencia ó presencia de las especies y en variaciones su abundancia, y que la respuesta del ecosistema pelágico a los cambios ambientales ha sido la misma durante los últimos 11,000 años. Tomando en cuenta lo anterior, es posible usar las asociaciones faunísticas preservadas en los sedimentos para construir modelos de los cambios en los factores físicos, químicos y biológicos de la superficie oceánica, dentro de éste periodo de tiempo, (Imbrie y Kipp, 1971; Bé y Hutson, 1977; Coulbourn *et al.*, 1980; Hutson, 1980; Prell, 1985; Ortiz y Mix, 1997; Crosta *et al.*, 1998; Waelbroeck *et al.*, 1998).

En la Cuenca San Lázaro, Baja California, hay condiciones fisicoquímicas que permiten la formación de sedimentos laminados de alta resolución, de los que es posible extraer series de tiempo de las diferentes especies de foraminíferos planctónicos que ocurren en la zona, con los cuales se pretende reconstruir la temperatura superficial del mar.

Hasta la fecha, hay pocos estudios donde se haya reconstruido la temperatura superficial del mar a partir de registros de alta resolución. Aquí exploramos que tan factible es reconstruir la temperatura utilizando datos provenientes de la cuenca de San Lázaro, aplicando el Método de Análogos Revisado [MAR] (Waelbroeck *et al.*, 1998). Se explora la sensibilidad del método a variaciones en la cobertura geográfica de la base de datos y al número de especies utilizadas.

### **I.1. Los foraminíferos planctónicos**

Actualmente se han descrito 44 especies de foraminíferos planctónicos vivientes, de las cuales 22 son cosmopolitas y el resto ocurren en regiones geográficas restringidas. Existe un gradiente latitudinal en la distribución de especies, el máximo de diversidad ocurre en los trópicos y disminuye hacia los polos dónde las asociaciones se vuelven prácticamente monoespecíficas (Bé y Hutson, 1977; Vincent y Berger, 1981, Hemleben, *et al.*, 1989). Las especies de foraminíferos planctónicos tienen un intervalo de tolerancia a la temperatura y salinidad definidos (Hemleben *et al.*, 1989). También responden a otras variables como la productividad, profundidad de la capa de mezcla, disponibilidad de luz y presencia de

otras especies (Hemleben *et al.*, 1989; Bijma *et al.*, 1992; Ortiz *et al.*, 1995; Watkins y Mix, 1998). Además de tener una distribución geográfica definida, los máximos de abundancia de cada especie ocurren a diferentes profundidades, aunque en general se encuentran por encima de la termoclina (Hemleben *et al.*, 1989; Ortiz *et al.*, 1995).

Los foraminíferos se originaron en el Cámbrico temprano a partir de una célula de tipo ameboide y los foraminíferos planctónicos divergieron de un foraminífero béntico aglutinado (Langer, 1999). Se dividen en dos grandes grupos con diferente origen filogenético: especies espinosas y no-espinosas (Darling *et al.*, 1999). En general, los foraminíferos espinosos tienen algas simbiotas cuya adquisición se remonta al Cretácico tardío (Houston y Huber, 1998), ésta simbiosis puede ser obligada ó facultativa y ocurre con diatomeas, dinoflagelados y crisofitas (Hemleben *et al.*, 1989),

La simbiosis con organismos fotosintetizadores determina en gran parte la función ecológica, los requerimientos alimenticios y por ende la distribución espacio-temporal, lo que los hace diferentes a las especies sin simbiotas (Jørgensen *et al.*, 1985; Gastrich y Bartha, 1988; Ortiz *et al.*, 1995). Resultados de experimentos en laboratorio con *G. sacculifer* y *G. ruber*, muestran que los simbiotas aportan gran parte del carbono citoplásmico, permiten el reciclaje interno de nutrientes, contribuyen a la calcificación de la concha y la concentración de oxígeno en la periferia del foraminífero aumenta debido a la fotosíntesis (Jørgensen *et al.*, 1985; Gastrich y Bartha, 1988). Debido a esto, son menos dependientes de la disponibilidad de alimento que los organismos sin simbiotas. De hecho, se cree que *G. sacculifer* sólo captura presas para adquirir nitrógeno y fósforo, mientras que los requerimientos energéticos son cubiertos por la fotosíntesis de los simbiotas (Jørgensen *et al.*, 1985). Aunque el grado de dependencia energética de los foraminíferos hacia sus simbiotas varía entre especies, la asociación con organismos fotosintéticos les permite vivir en ambientes oligotróficos, pobres en alimento. Se ha encontrado que su abundancia disminuye cuando hay un incremento de la biomasa del fitoplancton, por el efecto de sombra que estos ejercen, y aumenta al incrementarse la disponibilidad de luz (Hemleben, 1989; Ortiz *et al.*, 1995).

Otro factor que podría explicar la disminución de biomasa de foraminíferos (espinosos y no espinosos) en zonas altamente productivas, es la reducción de la concentración de

oxígeno en profundidad, debido a la oxidación de materia orgánica, por debajo de la zona de máxima productividad. Una baja concentración de oxígeno resulta desfavorable para la reproducción de estos organismos los cuales migran verticalmente durante la ontogenia (Oberhänsli *et al.*, 1992).

En general, los foraminíferos espinosos se alimentan de zooplancton (cópepodos, anfípodos, larvas nauplio de otros crustáceos) y los foraminíferos no-espinosos se alimentan de fitoplancton y tienen una mayor dependencia de las zonas eutróficas (Bé y Hutson, 1977; Hemleben, 1989; Ortiz *et al.*, 1995).

La mayoría de las especies espinosas y no espinosas, viven por encima de los 100 metros, tal vez debido a limitaciones de luz, ya sea que esta afecte la disponibilidad del fitoplancton como alimento o directamente a los simbioses (Ortiz *et al.*, 1995; Watkins *et al.*, 1996)

Los foraminíferos planctónicos son organismos semélparos, i.e. se reproducen una sola vez, y muchas especies presentan un patrón reproductivo acoplado al ciclo lunar (Hemleben, 1989, Bijma *et al.*, 1994). Durante la gametogénesis ocurre una calcificación de la concha, lo que la hace más resistente a la disolución, después de la liberación de miles de gametos, la concha queda vacía y se hunde por debajo de la zona fótica (Hemleben *et al.*, 1989). El flujo de conchas de foraminíferos es máximo después de un evento reproductivo, pero hay un flujo constante hacia el fondo de organismos muertos tanto por depredación como por otras causas (Bijma *et al.*, 1994).

En zonas cercanas a la costa, además del patrón mensual de flujo de calcita al fondo, existe otro patrón estacional debido a la variabilidad del alimento ocasionado por las surgencias (Thunell y Reynolds, 1984; Reynolds y Thunell, 1985; Sautter y Thunell, 1989; Sautter y Thunell, 1991; Niebler *et al.*, 1998; Watkins y Mix, 1998). Además de esta variación estacional, la abundancia de foraminíferos también es sensible a variaciones oceanográficas interanuales y decadales como eventos de El Niño y La Niña (Watkins *et al.*, 1998).

La composición de las especies en un mismo sitio cambia a lo largo del año, siguiendo los cambios físicos, químicos y biológicos del sistema. Esta sucesión de especies también sigue un patrón latitudinal y longitudinal, debido a que las especies siguen el movimiento de las masas de agua (Watkins y Mix, 1998; Watkins *et al.*, 1998).

### **I.1.1. Las especies del Pacífico Norte**

El Pacífico Norte ha sido dividido en cuatro grandes regiones: subártica, transicional, central y ecuatorial. En la cuenca San Lázaro es posible encontrar especies tanto de la región transicional como de la ecuatorial.

En la región subártica domina *N. pachyderma lev.* (~80%) y en menor proporción se encuentran *N. pachyderma dex.* y *N. quinqueloba*. En la zona de transición la importancia de *N. pachyderma lev.* disminuye; durante el florecimiento de primavera comparte la dominancia con *N. quinqueloba*. pero en el otoño *N. pachyderma dex.* es la especie dominante. En menor proporción se encuentra a *G. glutinata*, que está presente todo el año con máximos de abundancia en primavera y otoño. *G. bulloides* y *O. universa* son especies que ocurren sólo en verano cuando hay una termoclina bien desarrollada. En el Pacífico central, *G. ruber*, *G. sacculifer*, *G. tennellus*, *G. rubescens* y *G. glutinata* representan el 72% del total, las 23 especies restantes ocurren en menor proporción. Esta asociación es típica de aguas cálidas. En zonas tropicales existen 27 especies reportadas. En esta área hay una gran variación en la dominancia, dependiente de la longitud geográfica, la distancia a la costa y/o a las zonas de convergencia y divergencia ecuatoriales. En el Pacífico central ecuatorial, las 5 especies más abundantes son *G. conglomerata*, *G. tumida*, *G. sacculifer*, *P. obliquiloculata* y *N. dutertrei*. En general, la abundancia relativa de la especie más dominante es de sólo 20-30% del total, pero en ciertas épocas del año una sola especie puede representar el 60-80% de la muestra. En la cuenca de Panamá, 12 de las 27 especies reportadas conforman el 95% de la asociación, entre ellas se encuentran *N. dutertrei*, *G. glutinata*, *G. ruber*, *G. bulloides*, *G. menardii*, *N. pachyderma*, *G. sacculifer* y *G. quinqueloba*. La presencia de especies típicas de zonas más frías en el ecuador, es debida a las surgencias forzadas por los vientos alisios (Coulbourn *et al.*, 1980; Thunell y Honjo, 1981, Thunell y Reynolds, 1984, Reynolds y Thunell, 1985 y 1989; Watkins *et al.*, 1996).

En la cuenca de San Lázaro ocurren especies típicas de la región transicional, ecuatorial y posiblemente de la central, cada una con un intervalo de temperatura, talla y distribución diferente. También difieren en cuanto a su alimentación, la cual está en función a si presentan o no simbiosis (Tabla I).

Tabla I. Principales características de las especies más abundantes en la cuenca de San Lázaro

Especie	E*	Simbiosis	Talla	T(°C)	Distribución	Alimento
<i>Globigerinita glutinata</i>	no	Facultativa con diatomeas y crisofitas	21-35% >150µm moda 200µm	5° a 30°C mayor abundancia a los 26°C	Cosmopolita Menor abundancia en el centro de los giros	Fitoplancton (diatomeas)
<i>Globigerina bulloides</i>	si	no	55-68% >150µm moda 220µm	6° a 25°C mayor abundancia de 11° a 16°C	Márgenes continentales Asociada a zonas de surgencia	Zooplancton (copépodos)
<i>Globigerinoides ruber</i>	si	Dinoflagelados (tal vez <i>Meridinium sp.</i> )	55-72% >150µm moda 225µm	Temperaturas mayores a 15°C mayor abundancia a los 26°C	Tropical-subtropical Mayor abundancia en zonas oligotróficas	Zooplancton (copépodos y tintínidos)
<i>Orbulina universa</i>	si	si		9° a 20°C mayor abundancia entre 13° y 19.5°C	Cosmopolita Abundancia aumenta con la distancia a la costa	?
<i>Globigerinoides sacculifer</i>	si	dinoflagelados	40% >150µm moda 320µm	14° a 30°C mayor abundancia a los 24°C	Tropical-subtropical Baja productividad y capa de mezcla profunda	Zooplancton Los simbiosiontes cubren gran parte de sus requerimientos alimenticios
<i>Neogloboquadrina dutertrei</i>	no	Facultativa (diatomeas y crisofitas)	70% >150µm moda 350µm	12° a 20°C	Amplia distribución Mayor abundancia tropical-subtropical	Fitopláncton diatomeas principalmente
<i>Neogloboquadrina pachyderma</i> var. <i>dextrógira</i>	no	no	250 a 500µm	Aguas frías Mayor abundancia menos de 12°C	Polar y subpolar En el trópico ocurre en zonas productivas	Fitoplancton (Rhizosolenia)
<i>Globigerina quinqueloba</i>	si	no	Menor de 250µm	5° a 17°C desaparece a los 20°C	Subpolar En el trópico sigue la línea de costa de zonas productivas	Tal vez fitófaga

\*E=espinas



## **I.2. Fuentes de error**

Hay diferentes factores que pueden influir en las reconstrucciones de temperatura al modificar o contaminar la señal contenida en las asociaciones de foraminíferos de los sedimentos. Estos factores pueden ser biológicos, químicos, físicos y metodológicos.

La depredación puede influir en la señal contenida en sedimentos sobre todo en registros de alta resolución. Aunque no se ha reportado depredación selectiva sobre foraminíferos, una depredación intensa en cierta estación afectará más a la especie más abundante durante esa época del año sólo por probabilidad, cambiando la proporción relativa de ésta especie en sedimentos (Bé y Hutson, 1977).

La disolución de las conchas de calcita ocurre tanto en la columna de agua como en el fondo cuando están expuestas durante su enterramiento. Existe disolución diferencial de las especies, en general las especies de zonas más frías o que viven a mayor profundidad son más resistentes, por lo que en muestras disueltas están sobre representadas. La tasa de hundimiento también varía entre especies, dependiendo del tamaño, la densidad y la forma, por esta razón algunas especies están más expuestas a procesos de disolución al permanecer más tiempo en la columna de agua. La intensidad de la disolución está en función de la profundidad; por debajo de la lisoclina, que es el punto en donde las conchas empiezan a mostrar los efectos de disolución, la información original contenida en las muestras se modifica por disolución diferencial (Berger, 1971; Parker y Berger, 1971; Bé y Hutson, 1977; Vincent y Berger, 1981; Fok-Pun y Komar, 1983).

Los procesos advectivos pueden cambiar la distribución y abundancia de las especies en los sedimentos, ya sea trayendo especies de otras áreas o llevándoselas. También la turbulencia, al mantener por más tiempo las conchas en la columna de agua o resuspendiendo los sedimentos, puede modificar la composición faunística ya sea mezclando diferentes periodos ó manteniendo las conchas expuestas más tiempos a procesos de disolución.

Otra fuente de error muy importante es la bioturbación de los sedimentos por organismos bentónicos que mezclan las faunas de los primeros centímetros del sedimento y, dependiendo de la velocidad de sedimentación en el lugar, las faunas que se preservan

son una media de decenas de miles de años, por lo que se pierde la información de escalas menores de tiempo. Éste factor se minimiza cuanto mayor sea la velocidad de sedimentación y cuando las concentraciones de oxígeno son tan bajas que inhiben la actividad biológica.

Desde el punto de vista metodológico, una fuente de error importante es la heterogeneidad cronológica de las muestras superficiales utilizadas como base de referencia, su edad puede variar entre 500 a 2000 años.

Existen errores inherentes al modelo utilizado (Dryden, 1931; Imbrie y Kipp, 1971; Bé y Hutson, 1977; Peeters *et al.*, 1999). Pero además, al utilizar datos de diversas fuentes o generados por diferentes personas, es posible introducir errores por incongruencia en la identificación de especies o discrepancias en su clasificación; por diferencias en el número total de organismos contados entre muestras; y por el tamaño del tamiz utilizado, el cual influye fuertemente en el porcentaje estimado de cada especie, debido a que la composición de la fauna cambia a lo largo del espectro de tallas. En el caso de núcleos, otra fuente de error es el intervalo de muestreo utilizado, que también es dependiente de la velocidad de sedimentación y que puede estar mezclando faunas de diferentes épocas.

### **I.3. La Corriente de California**

El sistema de la Corriente de California, es un sistema de frontera oriental que está controlado principalmente por los vientos. El sistema lo constituyen la Corriente de California (CC), la Corriente costera (Cc) y la Contracorriente subsuperficial (CcS). La Corriente de California fluye hacia el sur y es relativamente somera (0-300m). Tiene una velocidad promedio de 25 cm/s y las mayores velocidades ocurren cerca de superficie, mientras que por debajo de los 150m es difícil encontrar velocidades mayores a 4 cm/s. El límite de occidental está a 850-900km de la costa y en general el núcleo de la corriente se observa a 300 – 400 km fuera de la costa en California Central y Sur, al llegar a Baja California la corriente se acerca más a la costa y el núcleo puede encontrarse a 200km de ella (Lynn y Simpson, 1987).

La Corriente Costera cuando existe es muy angosta (30 a 40 km), fluye siguiendo la línea de costa y transporta aguas relativamente más salinas, pobres en oxígeno y en nutrientes. La Cc puede llegar a tener velocidades de 10 cm/s y la dirección del flujo varía estacionalmente: el flujo es generalmente hacia el norte aunque en algunas zonas en ciertas épocas del año la Corriente costera se revierte hacia el sur, mientras que en otras se debilita y no existe. También la Cc puede desaparecer por el transporte de aguas subsuperficiales durante las surgencias que suprimen la contracorriente somera, reemplazándola por numerosos remolinos (Lynn y Simpson, 1987).

La Contracorriente Subsuperficial se localiza a lo largo de toda la CC a profundidades entre 100 y 300m, fluye hacia el norte. Tiene velocidades entre 30 a 50 cm/s y es estrecha (Lynn y Simpson, 1987).

La CC transporta hacia el sur una masa de agua subantártica fría y caracterizada por un mínimo superficial de salinidad y con alto oxígeno disuelto. En su ruta hacia el trópico la CC se hace más cálida, salina y pobre en nutrientes al mezclarse con aguas del Pacífico Central. Del sur proviene la masa de agua ecuatorial característica de la CcS, ésta agua es relativamente más cálida, salina, rica en nutrientes y con poco oxígeno disuelto. La confluencia de ambas masas de agua ocurre aproximadamente entre los 22°N a 30°N y está caracterizada por intensos gradientes de salinidad (Badan, 1997; Parés *et al.*, 1997), la profundidad donde se mezclan ambas masas de agua se encuentra entre 150 y 250m por debajo de la superficie (D'Anglejan, 1967). Hacia el sur de Punta Eugenia, la influencia del agua ecuatorial predomina sobre la de la Corriente de California (Parés *et al.*, 1997).

Los factores atmosféricos que más influyen sobre este sistema, son los centros de baja presión de las Aleutianas y de México y el centro de alta presión del Pacífico Norte (Baumgartner y Christensen, 1985). Estos centros de presión varían durante el año, lo que genera una marcada estacionalidad en la intensidad de los vientos. En los meses de marzo a junio el centro de alta presión del Pacífico Norte migra hacia el norte, lo que ocasiona vientos intensos y predominantes en dirección suroeste; como consecuencia el flujo hacia el sur de la CC se incrementa y también se producen surgencias (Reid *et al.* 1958; Parés *et al.*, 1997). Las surgencias ocurren cerca de la costa (hasta 50km), el agua

que aflora es relativamente fría, salada, rica en nutrientes y empobrecida en oxígeno (Lynn y Simpson, 1987). Las aguas influenciadas por las surgencias, pueden ser observadas a más de 100km de la costa, después de ser transportadas hacia el oeste por advección y difusión por remolinos (Huyer, 1983).

Otras fuentes de variabilidad con un periodo mayor al estacional son las generadas por fenómenos como El Niño-Oscilación Sur (ENOS) y la oscilación del Pacífico Norte (OPN), que influyen en la intensidad de la corriente y en el desplazamiento latitudinal de sus masas de agua.

En la fase cálida/negativa del ENOS (Fase El Niño), hay un flujo de calor desde el ecuador hacia el norte y el sur de la costa oriental, por medio de una onda de Kelvin, parte de esta energía se transfiere a la atmósfera y en la CC ocasiona un debilitamiento de los vientos, un calentamiento de las aguas superficiales, el empobrecimiento de nutrientes y en general una disminución de la productividad primaria (McGowan, 1983); durante el modo frío/positivo (Fase La Niña), ocurre el fenómeno inverso. La variabilidad interanual del ENSO esta concentrada en la banda de 3-7 años, sin embargo el ENSO también se encuentran modos decadales e interdecadales (Norton *et al.*, 1985; Mann y Park, 1994; Zhang *et al.*, 1997).

Otra fuente de variabilidad recientemente descrita es la Oscilación del Pacífico Norte cuyas consecuencias se observan a escala de cuenca y tiene una señal similar al ENOS. La fase positiva del OPN (condiciones similares a El Niño) está asociada a la intensificación del centro de baja presión de las Aleutianas, durante esta fase hay anomalías negativas de la TSM (aguas frías) en el borde oriental y en las latitudes medias del Pacífico Central y anomalías positivas (aguas más calientes) a lo largo de la costa de Norte América. Cuando el centro de baja presión de las Aleutianas se debilita ocurre el fenómeno contrario (similar a condiciones La Niña), hay aguas más cálidas en la costa oriental y Pacífico Central y frías en la costa de Norte América. Los cambios de fase de esta oscilación duran entre 2 y 3 décadas. La interacción del ENOS y del OPN es constructiva cuando coincide el modo negativo (positivo) del ENOS y el positivo (negativo) del OPN, si esto ocurre el efecto de los Niños (las Niñas) se intensifica y llega a latitudes

más septentrionales. Cuando están en contrafase hay una interacción destructiva y los efectos se contrarrestan (Mantua *et al.*, 1997; Gershunov *et al.*, 1999).

El área de estudio, la cuenca San Lázaro, se encuentra dentro de la zona de convergencia de la masa de agua más fría proveniente del norte y la masa de agua cálida transportada desde el sur. Variaciones en la influencia de ambas masas de agua sobre la zona debidas a oscilaciones como el ENOS o el OPN, pueden ocasionar cambios en la fauna registrada. De tal forma que durante épocas de intensificación de la CC se encuentra la fauna típica de la CC y que en épocas de intrusión de aguas cálidas se encuentre fauna proveniente de los trópicos. Esto hace que la cuenca San Lázaro, funcione potencialmente como un interruptor, registrando estos cambios de masas de agua, siempre y cuando los periodos de duración de los diferentes estados sean mayores que el periodo de tiempo que se puede resolver en sedimentos.

#### **I.4. Área de estudio**

La cuenca de San Lázaro se encuentra frente a la costa de Baja California Sur, entre Punta Eugenia y Cabo San Lázaro (25°15'N y 112°45'E). Tiene una profundidad media de 540m y está dentro del sistema de la Corriente de California (Fig. 1).

Por su ubicación, la cuenca de San Lázaro se encuentra dentro de la zona de convergencia de las aguas ecuatoriales y las subárticas de la Corriente de California. El bajo contenido de oxígeno de las aguas ecuatoriales a subtropicales, junto con la descomposición de la materia orgánica generada por la alta productividad debida a las surgencias, ocasionan que en la columna de agua a profundidades mayores de los 200m haya un mínimo de oxígeno (<0.2 O<sub>2</sub>ml/l). Debido a la configuración batimétrica y orientación de la cuenca de San Lázaro, el recambio de agua del fondo de la cuenca con aguas del Pacífico abierto de por sí pobres en oxígeno, es relativamente bajo, por lo que en el fondo prevalecen condiciones subóxicas propicias para la preservación de sedimentos laminados (D'Anglejan, 1967). Otra característica que hace que la cuenca de San Lázaro sea propicia para la formación de un registro de alta resolución es su poca profundidad; el fondo se encuentra por encima de la lisoclina del Pacífico Norte y hay poca disolución de carbonato, lo que unido a la alta tasa de acumulación que prevalece en la zona, ayudan a preservar el componente calcítico que llega al sedimento.

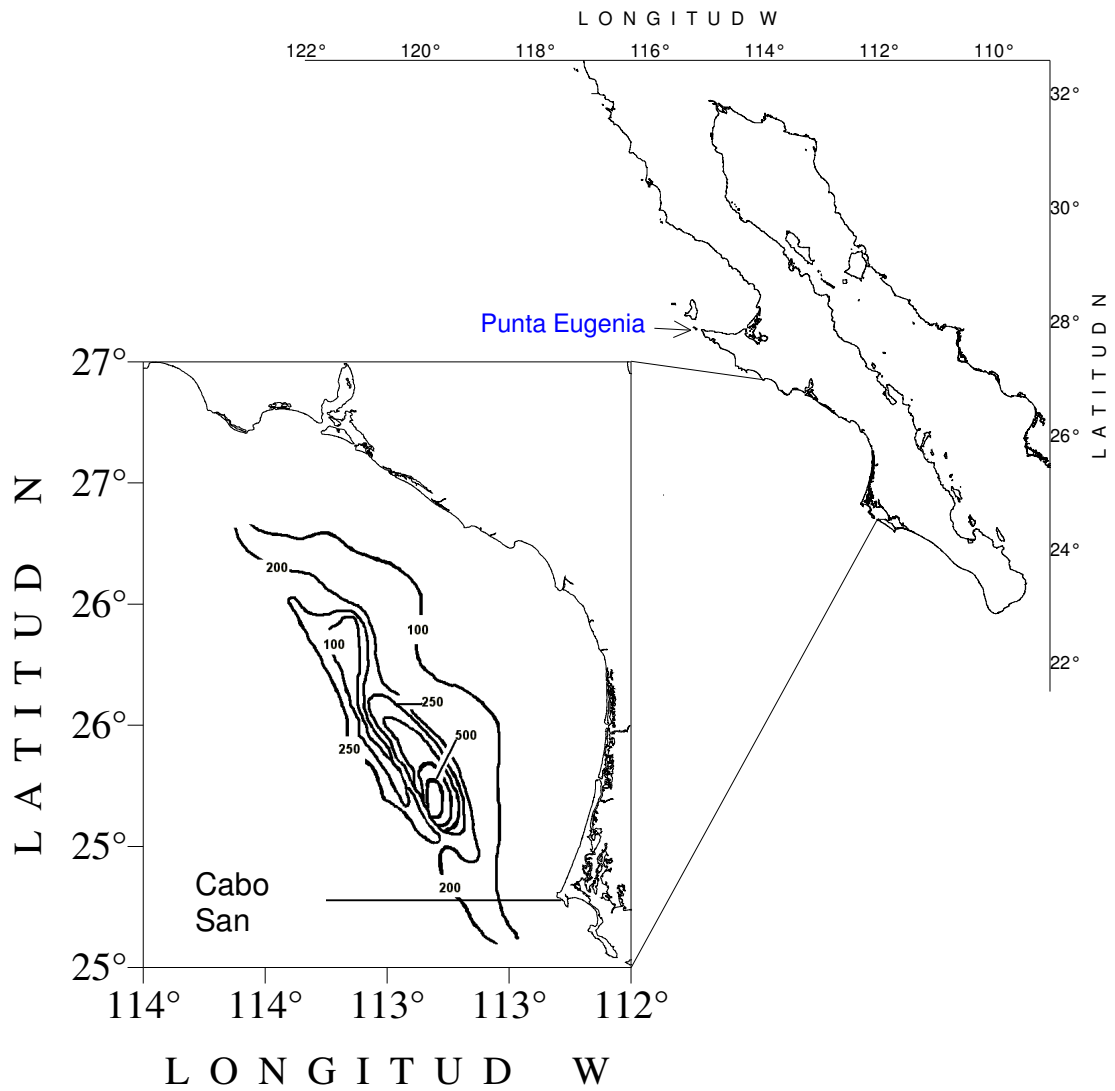


Figura 1. Ubicación del área de estudio y batimetría de la cuenca San Lázaro.

La época más intensa de surgencias se produce durante la primavera y principios de verano y estas se intensifican en los promontorios de Punta Eugenia y Punta Abreojos, pero también ocurren surgencias en toda la cuenca debido a que la orilla de la plataforma se encuentra a 200m de profundidad y es necesaria poca energía eólica para desplazar aguas deficientes en oxígeno y ricas en nutrientes sobre los bancos (zonas más someras) y sobre la plataforma (D'Anglejan, 1967).

Las temperaturas registradas para los últimos 50 años en San Lázaro tienen una media anual de 22.9 °C con un intervalo de 20.7 °C a 24.9 °C; la temperatura mínima reportada es de 16.1 °C y la máxima de 30.6 °C. A finales de primavera y principios de verano ocurren las surgencias y es cuando las aguas se encuentran más frías, con temperaturas promedio entre 17.1 °C y 24.6 °C, durante el otoño las aguas se tornan más cálidas y alcanzan temperaturas entre 24.7 °C y 29.6 °C. En esta cuenca, las temperaturas frías tienen mayor variación interanual (~7.6 °C) que las cálidas (~5 °C; datos obtenidos de [www.cdc.noaa.gov.edu](http://www.cdc.noaa.gov.edu)).

### **I.5. Objetivos**

Reconstrucción, calibración y validación de la temperatura superficial del mar para el último siglo, utilizando datos de foraminíferos planctónicos de 4 núcleos de alta resolución de la cuenca de San Lázaro.

Explorar la respuesta y sensibilidad del método MAR a los cambios en la cobertura geográfica y al número de especies.

Determinar si hay correlación entre la variabilidad de las especies en el tiempo con factores climáticos.

## II. METODOLOGÍA

Imbrie y Kipp (1971) proponen el primer método cuantitativo para reconstruir temperatura superficial del mar (TSM). Generaron funciones de transferencia a partir de datos de foraminíferos de muestras superficiales de todo el mundo, reduciendo el número de variables (especies) a un número menor de factores (asociaciones) utilizando el análisis de componentes principales modo-Q, con estos factores se hace una regresión lineal contra las variables ambientales medidas, de esta forma se obtienen las ecuaciones o funciones de transferencia que pueden ser aplicadas a cualquier muestra del mismo océano.

Hutson (1980) desarrolló una técnica con una aproximación diferente, la técnica de análogos recientes (TAR), que posteriormente fue modificada por Prell (1985). Con el TAR, la reconstrucción de variables ambientales se hace a partir del promedio pesado de la TSM de las 10 muestras de referencia más parecidas en composición faunística a la de la muestra a reconstruir [mejores análogos] (Prell, 1985).

Las ventajas de éste método son que es más directo por que se aplica a los porcentajes de especies y no requiere ningún análisis de factores que suavice o generalice los datos, sólo se hace una comparación entre muestras de la composición taxonómica relativa y se eligen las más similares; la identificación de los mejores análogos provee de información geográfica que puede ayudar en la interpretación de las condiciones ambientales del pasado; la reconstrucción se basa en promedios y no en ecuaciones de regresión; cada estimación tiene una desviación estándar asociada; y si hay disolución en alguna de las muestras esto no afecta a toda la reconstrucción, únicamente afecta aquellos puntos en donde la muestra disuelta fue utilizada para su reconstrucción (Prell, 1985).

Por otro lado, este método tiene la desventaja de que requiere una amplia cobertura de las muestras de referencia, de lo contrario puede ocurrir que alguna de las muestras no tenga buenos análogos, además de que la elección de número de análogos utilizados es subjetiva, ya que los coeficientes de disimilitud no tienen una distribución normal estadística que permita fijar intervalos de confianza. Por lo que al aplicar un mismo criterio para conservar los mejores análogos de muestras de altas y bajas latitudes (con



diferentes niveles de biodiversidad), se podría estar introduciendo un error en la reconstrucción (Prell, 1985; Waelbroeck *et al.*, 1998).

Waelbroeck *et al.*, en 1998, proponen el método de análogos revisado (MAR), que está basado en el TAR, pero al cual se le han hecho dos modificaciones. Con éste método, la reconstrucción de TSM es mejor que con el de MIK y el TAR. Debido a la aproximación indirecta hay una mejor cobertura del intervalo de temperatura representado por las asociaciones, la diferencia entre el valor estimaciones y el observado es menor en reconstrucciones de temperatura actuales, por lo que se decidió utilizar este método.

### **II.1. Método de Análogos Revisado**

Para la reconstrucción de temperaturas por medio del Método de Análogos Revisado (Waelbroeck *et al.*, 1998), se requiere de una base de datos de referencia con temperaturas conocidas, contra la cual comparar las faunas del núcleo a reconstruir. Una vez identificadas las muestras más similares, los datos de temperatura asociados se promedian para obtener el valor correspondiente a cada muestra del núcleo.

Se generaron tres bases de datos: 1) abundancia faunística del núcleo a partir del cual queremos reconstruir la temperatura; 2) abundancia faunística de muestras de referencia que cubran una amplia zona geográfica, que en este caso fue el Océano Pacífico; y 3) las temperaturas promedio correspondientes a la época más cálida y la más fría del lugar en donde se tomaron cada una de las muestras de referencia.

Antes de comparar las muestras del núcleo con la base de referencia se crean datos virtuales adicionales, por medio de la aproximación indirecta (Bartlein *et al.*, 1986). Estos permiten homogeneizar la cobertura de las bases de datos de fauna y de temperatura, reduciendo de esta forma los huecos de información. Este método genera una malla en el espacio de las temperaturas, teniendo como ejes la TSM cálida y la TSM fría. Los límites superiores e inferiores de cada eje son las temperaturas máximas y mínimas de cada estación y la distancia entre cada nodo de la malla está definida por un factor  $a$ . En esta malla se cartografiaban los datos de temperatura de las muestras de referencia (Fig. 2a). Después para generar las muestras virtuales, se calculan las asociaciones que corresponderían a los nodos de la malla. Para esto, se identifican las muestras que se





encuentren a una distancia  $R$  del nodo y se hace una interpolación de la fauna de estos núcleos, haciendo un promedio pesado por la distancia euclidiana de cada núcleo al nodo. Al restringir la interpolación a un cierto radio se asegura que el promedio se está haciendo con faunas generadas en condiciones de temperatura similares a ambas estaciones (Fig. 2b).

Una vez ampliada la base de datos de referencia, se compara cada muestra del núcleo contra cada muestra de referencia para identificar las que le sean más similares (Fig. 2c). El índice de disimilitud utilizado en la selección de análogos es la Distancia de Cuerda Cuadrada (DCC)

$$DCC = \sum_k (P_{ik}^{1/2} - P_{jk}^{1/2})^2 \quad (1)$$

donde  $i$  es el número de lámina del núcleo,  $j$  es el número de la muestra análoga,  $k$  es el número de especie y  $P$  es la proporción de la especie  $k$  con respecto al total de especies en la muestra. Los valores de este índice van de 0 a 1, valores pequeños indican muestras más similares. Este índice le da menos peso a las especies más comunes, por lo que eleva la proporción entre señal sobre el ruido en la serie reconstruida (Andersson, 1997).

La selección de los mejores análogos para cada muestra se hace utilizando un 'criterio de selección objetivo', que supone que muestras con valores de disimilitud parecidos pertenecen a una fauna similar y que un cambio abrupto en los valores de disimilitud corresponde al cambio de un tipo de fauna a otro o a la falta de buenos análogos debidos a una cobertura deficiente de la base de referencia. Los índices de disimilitud se ordenan de menor a mayor y se siguen dos criterios para la selección de las faunas afines: el primero es que se retienen las muestras encontradas antes del primer aumento abrupto del índice, la diferencia umbral entre muestras consecutivas se fijó en 0.3 (Waelbroeck *et al.*, 1998) y el segundo es que en caso de que no se observe un cambio abrupto se retienen las 10 primeras muestras (Fig. 2d).

Una vez seleccionados los mejores análogos se hace el promedio pesado para cada una de las temperaturas (cálida y fría). Estos promedios de TSMcálida y TSMfría son

asignados a la lámina del núcleo (Fig. 2e). El promedio pesado se hace utilizando el coeficiente de similitud  $S$

$$S_{ij} = \sum_k (P_{ik} \cdot P_{jk})^{1/2} \quad (2)$$

donde el promedio pesado de temperatura  $X^*$

$$X^*_i = \sum_j (T_j \cdot S_{ij}) / \sum S_{ij} \quad (3)$$

donde  $T_j$  es la temperatura (cálida o fría) del análogo  $j$  y  $n$  es el número de análogos utilizado en la estimación.

De esta forma, en la estimación de la temperatura se le da el mismo peso a todas las muestras con valores de disimilitud parecidos, mientras que la contribución de las muestras más disímiles es menor.

## II.2. Bases de datos

Se reconstruyó la temperatura de 4 núcleos de alta resolución (láminados) de la cuenca de San Lázaro: et97-3c, bap96-6c, ca94-8k, bap96-6k-II. Los núcleos bap96-6c y ca94-8k, fueron procesados por Olivier (1998), en donde se contaron todas las especies de foraminíferos planctónicos correspondientes a la fracción  $>125\mu\text{m}$ . En los núcleos et97-3c y bap-96-6k-II se contaron las 13 especies más abundantes de la zona para la fracción  $>125\mu\text{m}$ , aunque en las primeras 32 láminas del núcleo et97-3c se contaron sólo 9 especies. El procesamiento de estos núcleos fue hecho por Bertha Acosta (Tabla II y Apéndice 1).

Tabla II. Relación de los 4 núcleos utilizados en la reconstrucción de la TSM de San Lázaro.

Núcleo	número de láminas	número de especies contadas	Intervalo aproximado de tiempo
et97-3c	71	9 (lám. 1-32) 13 (lám. 33-71)	1864-1994
bap96-6c	128	32 (28)	1923-1995
ca94-8k	58	30 (26)	1840-1983
bap96-6k-II	113	13	1554-1963

La base de referencia contiene 301 asociaciones de foraminíferos planctónicos provenientes de trampas de sedimentos y de muestras superficiales (Fig. 3). Los datos de trampas de sedimentos son los reportados por Reynolds y Thunell (1985), Sauter y Thunell (1991) y Ortiz y Mix (1997). Los datos de las muestras superficiales se colectaron de la base actualizada de Prell *et al.* (1999) que se encuentra en [ftp://ngdc.noaa.gov/paleo/paleocean/brown\\_foram](ftp://ngdc.noaa.gov/paleo/paleocean/brown_foram) y de los artículos de Parker y Berger (1971), Coulbourn *et al.* (1980) y Thompson (1981). Hubo muestras repetidas entre los datos de Coulbourn (1980) y Prell (1999); se conservaron los datos de Prell por ser una base revisada y actualizada. También se eliminaron muestras con localidades erróneas.

Se utilizaron sólo los datos de muestras superficiales provenientes de profundidades menores a los 2500m en la zona ecuatorial y de 3000 m en el resto del océano, que es la profundidad promedio de la lisoclina de esos sitios. Esto se hizo para evitar sesgos debidos a la disolución diferencial de las especies.

Cuatro especies presentes en los núcleos bap-96-6c y ca94-8k, *T. clarkei*, *G. uvula*, *G. cavernula* y *G. unguata* fueron eliminadas debido a la ausencia de estas especies en la base de datos del Pacífico; por lo que quedaron 28 y 26 especies respectivamente. En los datos de referencia, se agruparon las variedades de *G. sacculifer* con y sin saco, las variedades levógira y dextrógira de *G. crassaformis* y *G. hirsuta*, ya que en los núcleos no se hizo esta distinción. Sólo se utilizaron los datos de *G. ruber* var. blanca, ya es la que se encuentra en San Lázaro y en la mayoría del Pacífico. El centro de distribución de *G. ruber* var. rosa se encuentra en el Océano Índico (Bé y Hutson, 1977).

Los datos de Temperatura Superficial del Mar se extrajeron de la base de COADS ([www.cdc.noaa.gov.edu](http://www.cdc.noaa.gov.edu)). Para el Pacífico, se utilizaron 17 años de datos (1980-1997) con una resolución de 2°latitud x 2° longitud y para el área de estudio, se utilizaron 37 años de datos con una resolución de 1°latitud x 1° longitud. A cada muestra de referencia se le asignaron dos TSM: cálida y fría, que correspondieron al promedio de temperatura de los 3 meses más cálidos y los 3 meses más fríos de todos los años. Para comparar las reconstrucciones de TSM con datos instrumentales, se obtuvieron las series de TSM cálida y fría de San Lázaro y Punta Eugenia. La serie fría es el promedio de temperatura de abril-junio y la cálida el promedio de agosto-octubre de cada año

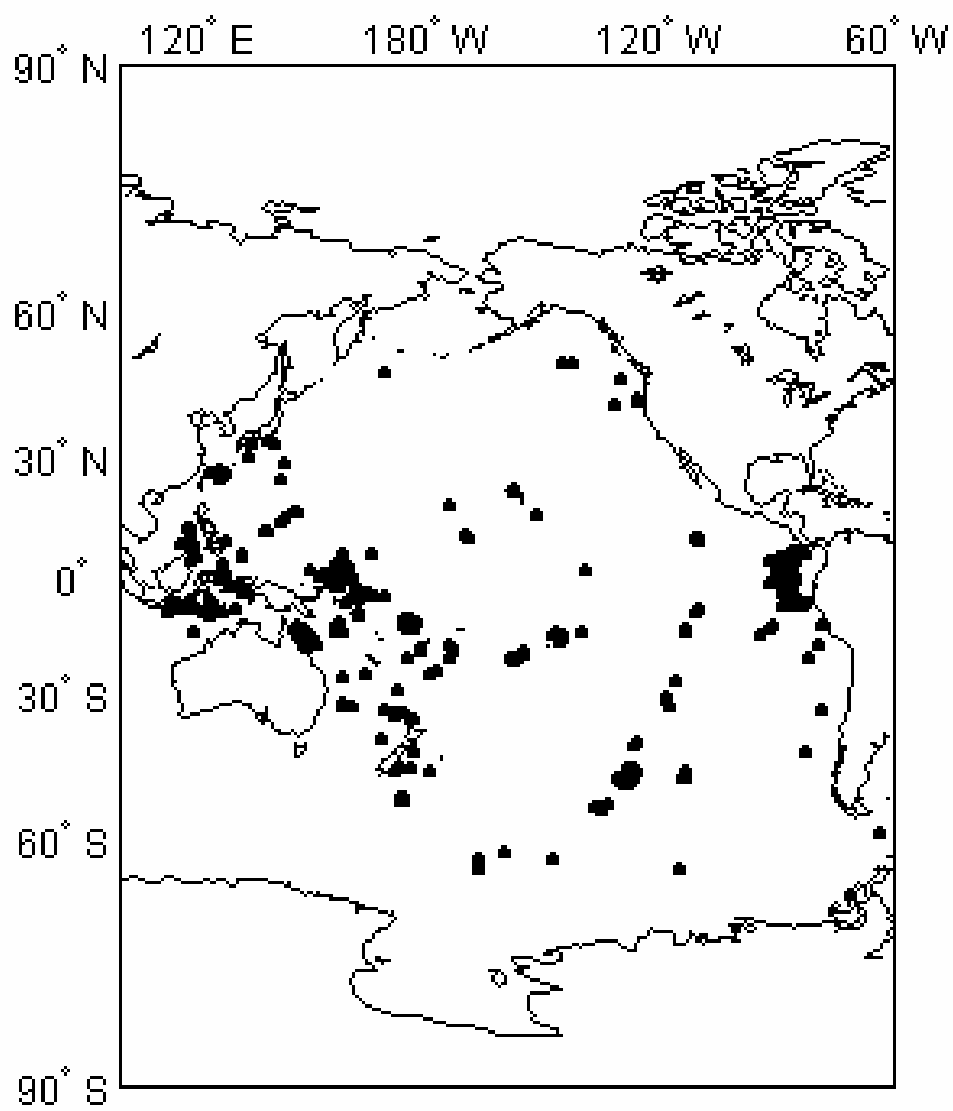


Figura 3. Ubicación de las muestras superficiales utilizadas como base de referencia.

### II.3. Índices de disolución

El grado de preservación de los núcleos, se determinó utilizando 2 índices de disolución. El rango de valores en los que una muestra puede considerarse bien preservada, se definió aplicando los diferentes índices a datos de trampas de sedimentos (Ortiz y Mix, 1997; Sautter y Thunell, 1991) y de muestras superficiales a diferentes profundidades (Prell, 1999). En ambos valores altos de los índices indican una mayor disolución. El IF y el IPA de los núcleos ca94-8k y bap96-6c fueron calculados por Olivier (1998).

#### Índice de Fragmentación (Vincent y Berger, 1981)

Es la razón entre los fragmentos y los organismos completos

$$IF = \frac{frg}{fp + fb + frg} \quad (4)$$

donde **frg**, es el número de fragmentos de foraminíferos plásticos, **fp**, total de foraminíferos planctónicos y **fb**, total de foraminíferos béticos. Valores altos del IF indican un mayor grado de disolución.

El intervalo de confianza de este índice se obtuvo a partir de las muestras superficiales del Pacífico que se utilizaron como base de referencia, ya que en los datos de trampas no se reportan fragmentos.

#### Índice Paleoecológico (Vincent y Berger, 1981)

Es la razón entre especies con diferente resistencia a la disolución, donde a cada especie se le asigna un rango según su resistencia (Berger, 1979).

$$IPA = \frac{\sum(pi * r)}{\sum pi} \quad (5)$$

donde **pi** es la proporción de cada especie con respecto al total y **r** es el rango de disolución (1-7, de menor a mayor resistencia a la disolución). Con el aumento del valor del IPA aumenta la probabilidad de que la muestra esté disuelta.

El intervalo de confianza del IPA se calculó a partir de los datos de trampas y de muestras superficiales. Se utilizaron los datos de 7 trampas ubicadas entre 1°-42°N en la margen



oriental del Pacífico (Ortiz y Mix, 1997), los datos de una trampa en San Pedro, California (33°N y 118°W), con muestreos quincenales durante 7 meses (Sautter y Thunell, 1991) y 149 muestras superficiales tomadas a menos de 3000 metros de profundidad (Prell, 1999).

#### II.4. Error probable de estimación

La proporción de cada especie tiene un error asociado que está en función del número de organismos contados de cada especie. Se calculó el porcentaje del error probable (**ep**) de cada especie

$$ep = \sqrt{n/n} \quad (6)$$

donde **n** es el número total de organismos contados por especie.

#### II.5. Simulaciones

Buscando el arreglo de datos que redujera el error entre la serie reconstruida y la serie de COADS, y para que las series entre núcleos pudieran ser comparables, además de la reconstrucción utilizando todas las especies y todas las muestras de referencia, se hicieron diferentes simulaciones que consistieron básicamente en modificar la extensión del área geográfica y el número de especies comparadas, con el objetivo de probar la sensibilidad del método a diferentes condiciones.

Para inspeccionar la sensibilidad del método a la cobertura de la base de datos, se hicieron modificaciones del área geográfica abarcada. Las simulaciones fueron a) utilizando toda la base de referencia excepto las muestras ubicadas por debajo de los 40°S y, b) restringiendo la base de datos a la zona comprendida entre los 30°N y 30°S.

En cuanto al número de especies comparadas, tanto en la base de datos como en la de los núcleos, se utilizaron c) las 9 especies contadas en todas las láminas de los 4 núcleos, d) las 13 especies más abundantes, y e) las especies que viven por arriba de los 100 m la mayor parte de su vida (especies someras). De las 9 especies anteriores se eliminó a *N. pachyderma* y *G. siphonifera* y se incluyó a *G. conglobatus* y *P. obliquiloculata* (ver Apéndice 1).

### III. RESULTADOS

#### III.1. Disolución de las muestras

##### IPA

En las tres bases de datos utilizadas para definir los intervalos de confianza del IPA (Prell, 1985; Ortiz y Mix, 1997; Sautter y Thunell, 1991) no hubo diferencias significativas entre las medias (Prueba de  $F_{(2,181)}=1.45$ ,  $p<0.23$ ), a pesar de que se compararon datos de trampas con datos de muestras superficiales, en las que esperaríamos mayor disolución. Las muestras superficiales mostraron una mayor dispersión, debido a que el área de cobertura es todo el Pacífico, y el índice es sensible a las variación longitudinal, latitudinal y a la disolución (Tabla III, Fig. 4b).

Tabla III. Índices Paleoecológicos (IPA) obtenidos a partir de datos de trampas de sedimentos y muestras superficiales (n=número de datos; X=media; d.e.=desviación estándar).

Sitio	Tipo de muestreo	n	X	d.e.
San Pedro (33°N,118°W)	Trampa de sedimentos. Semanal por 7 meses	28	4.34	0.62
Pacífico Oriental Norte (1°-42°N)	Trampa de sedimentos. mes- año	7	4.47	0.69
Pacífico (<3000m)	Muestras superficiales	149	4.04	1.11

En San Pedro, el IPA fluctuó entre 3.5 y 5.8 (Fig. 5), esta oscilación fue debida cambios estacionales de la composición de la comunidad y no a procesos de disolución. Las trampas de sedimentos se encontraban a 500m y los foraminíferos tardan en promedio menos de una semana en llegar a esa profundidad suponiendo una tasa de hundimiento de 75m/día (Sautter y Thunell, 1991), por lo que es poco probable que ocurra una disolución importante en ese corto periodo de tiempo y a esa profundidad. Los dos periodos en dónde el IPA está por encima del intervalo de confianza corresponden al aumento de *N. pachyderma* ocurrido en abril y al aumento de *N. dutertrei* en junio. Ambas especies son las de mayor abundancia relativa durante esos meses y tienen el rango más alto de resistencia a la disolución (Sautter y Thunell, 1991), por lo que es clara su influencia en el valor del IPA y muestra la alta proporción de información ecológica que integra este índice de preservación.

En el Pacífico Oriental Norte, el intervalo de valores del IPA fue similar al de San Pedro: de 3.22 a 5.69. No se pudo reconocer ningún patrón en función de la latitud. El valor del

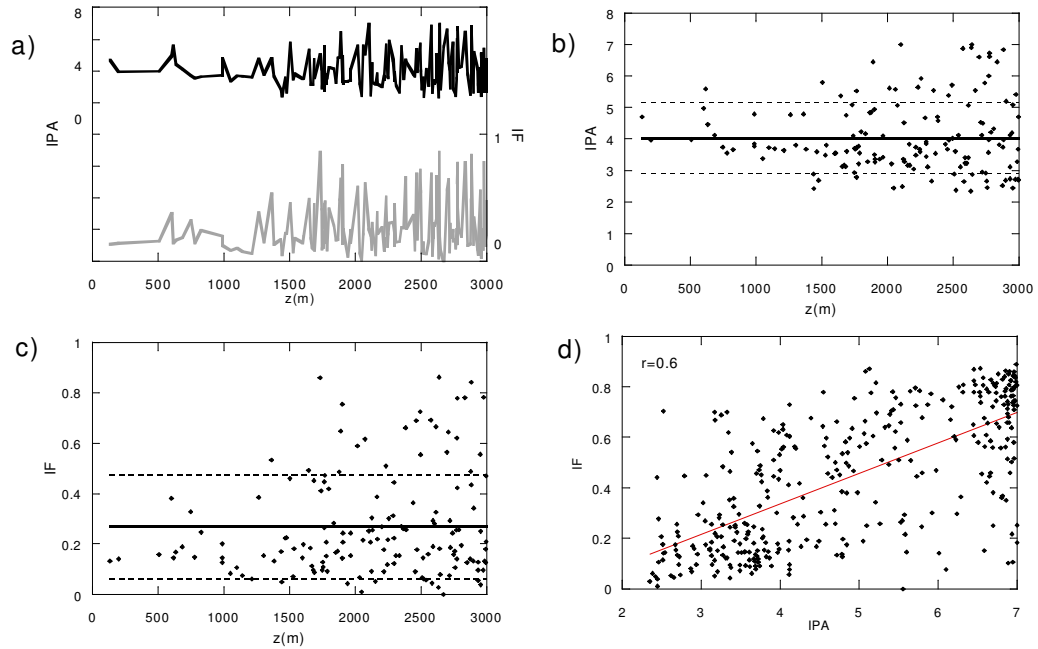


Figura 4. Índices de disolución calculados a partir de las muestras superficiales del Pacífico: a) Índice Paleoecológico (IPA) e Índice de Fragmentación (IF), b) intervalo de confianza del IPA (media  $\pm$  d.e.), c) intervalo de confianza del IF y d) correlación del IPA vs. IF.

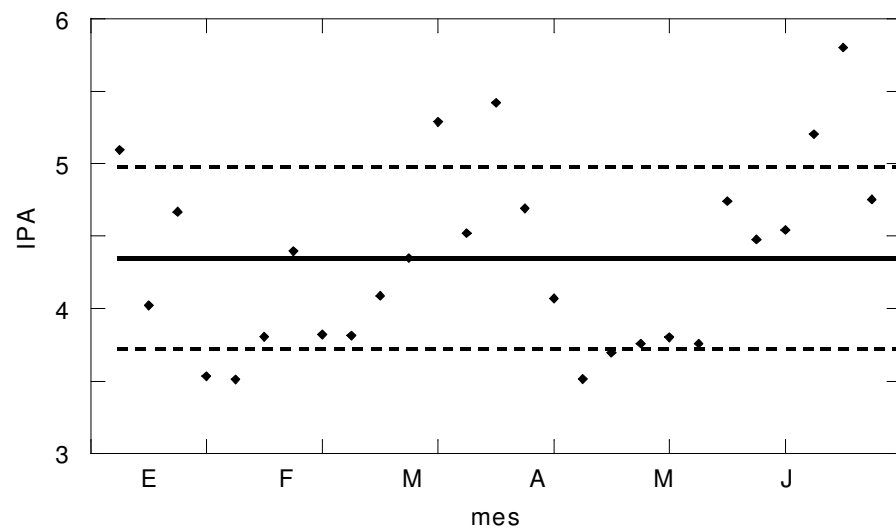


Figura 5. IPA e intervalo de confianza calculados a partir de los datos de 7 meses de muestreo con trampas en San Pedro, California.

IPA correspondiente a la muestra superficial de San Pedro (Fig. 6) es muy cercano a la media obtenida a partir de trampas por 7 meses en el mismo sitio (4.14 vs. 4.34, Figs. 5 y 6).

Debido a que San Pedro es el sitio más cercano a San Lázaro, a que ambos se encuentran dentro del mismo sistema de corrientes y a que en San Pedro se tuvo la menor desviación estándar, se decidió utilizar estos datos para generar el intervalo de confianza para los núcleos de San Lázaro. El intervalo se fijó en  $\pm 1$  d.e. con respecto a la media.

## **IF**

El intervalo de confianza del índice de Fragmentación se obtuvo de las muestras superficiales del Pacífico. Este índice tuvo una gran dispersión y se observa una ligera tendencia a aumentar con respecto a la profundidad (Figura 4c). Los valores del IF estuvieron entre 0.01 y 0.86, con una media de 0.269 y desviación estándar de 0.207.

En las muestras superficiales, el IPA y el IF mostraron una correlación positiva ( $r=0.66$ ). Se puede observar que en la mayoría de los casos, a un aumento del IPA corresponde un aumento en los valores del IF (Figs. 4a y 4d). El hecho de que dos índices obtenidos con diferentes métodos den resultados similares, nos sugiere que utilizando ambos se pueden detectar muestras con problemas de disolución.

### **III.2.1. Núcleos de San Lázaro**

Contrariamente a lo ocurrido con las muestras superficiales de todo el Pacífico, la correlación entre el IPA y el IF encontrada en los 4 núcleos fue débil e incluso en el núcleo ca94-8k, la correlación fue negativa (bap96-6c,  $r=0.12$ ; et97-3c,  $r=0.26$ ; ca94-8k,  $r=-0.02$ ; bap96-6k-II,  $r=0.29$ ; Figs. 7a, 7d, 8a, 8d, 9a, 9d, 10a y 10d).

Las láminas de los núcleos, tienen un nivel de resolución temporal más cercano al de las trampas de sedimentos que a las muestras superficiales, por lo que es probable que la baja correlación entre los índices de los núcleos sea debida a un efecto de las variaciones interanuales del ecosistema sobre el IPA. Como se encontró en los datos de San Pedro, las oscilaciones estacionales tienen un efecto marcado en el IPA y las variaciones

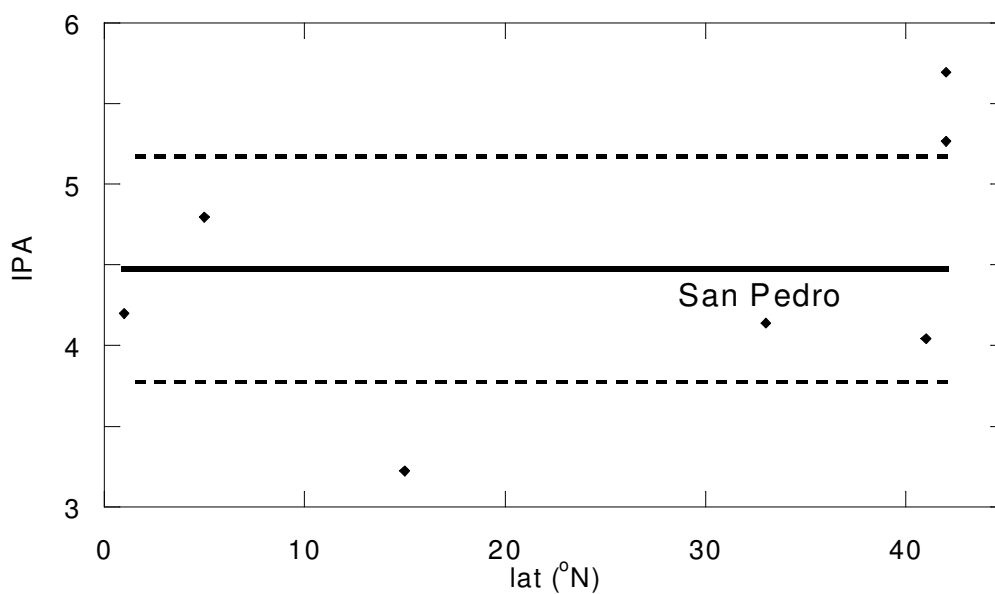


Figura 6. IPA e intervalo de confianza calculados a partir de datos de trampas de sedimentos en el Pacífico Oriental Norte.

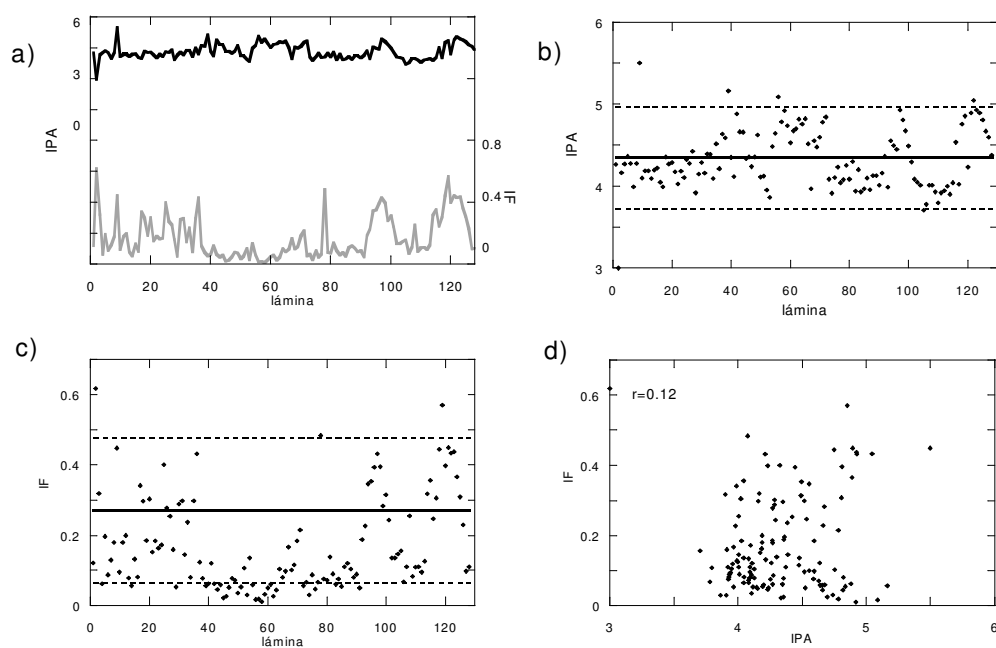


Figura 7. Índices de disolución del bap96-6c: comparación de a) IPA e IF, b) IPA con el intervalo de confianza obtenido de los datos de San Pedro, c) IF con el intervalo de confianza obtenido de muestras superficiales del Pacífico y d) correlación entre el IPA e IF.

interanuales podrían tener un efecto similar, por lo que valores altos no necesariamente implican un efecto de disolución. En el caso de las muestras superficiales, lo que se tiene es un promedio de un intervalo mayor de tiempo (500 a 2000 años), por lo que las variaciones estacionales tendrán un menor efecto en el IPA.

#### **bap96-6c**

Con base en el IPA y el IF, la mayoría de las láminas del núcleo bap96-6c tienen buena preservación. El 97% de las láminas se encontraron dentro del intervalo de confianza asignado para el IPA y el 98% dentro del intervalo del IF. Sin embargo, ninguna de las láminas que estuvieron fuera del intervalo de confianza del IPA cayó fuera del intervalo de confianza del IF y viceversa (Figs. 7b y 7c). Esto puede ser debido a que, como se mencionó anteriormente, a este nivel de resolución la correlación entre ambos índices fue baja y no necesariamente un valor alto del IPA corresponde a un valor alto del IF, lo que podría estarnos indicando que las láminas se encuentran en buen estado de preservación. Se decidió considerar a las muestras que caen fuera intervalo de confianza de ambos índices, como posiblemente disueltas, por lo que 7 de las 128 láminas (5%) podrían tener problemas de disolución.

#### **et97-3c**

Este núcleo mostró una disolución mayor que el bap96-6c, sin embargo, puede considerarse en buen estado de preservación. El 91% de las láminas estuvieron dentro del intervalo de confianza del IPA y sólo una muestra cayó fuera del intervalo de confianza del IF (Figs. 8b y 8c) y como en el caso anterior no fue ninguna de las muestras fuera del intervalo del IPA. En total 8 de las 71 láminas (11%) podrían tener problemas de disolución.

#### **ca94-8k**

Éste núcleo muestra una mayor disolución, sólo el 76% de las láminas cayó dentro del intervalo de confianza del IPA y 93% dentro del intervalo de confianza del IF (Figs. 9b y 9c). Ninguna de las láminas que cayeron fuera del intervalo del IPA se encontró fuera del intervalo de confianza del IF. Por lo que considerando ambos índices 21 de las 58 láminas (36%) podrían estar afectadas por procesos de disolución.

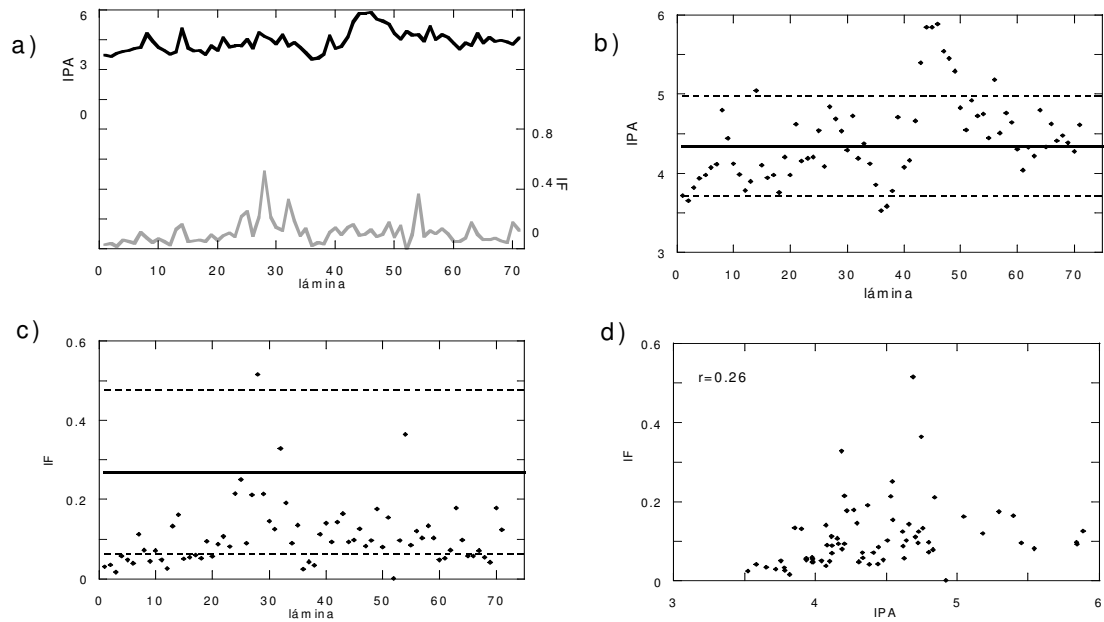


Figura 8.  ndices de disolución del núcleo et97-3c. Leyendas igual que en Fig. 7.

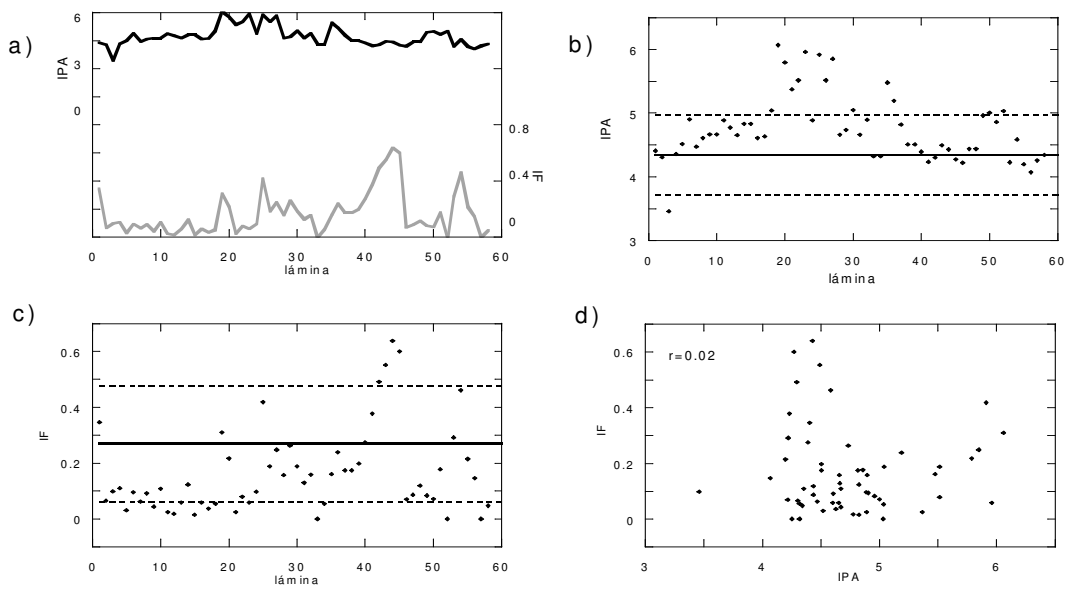


Figura 9.  ndices de disolución del núcleo ca94-8k. Leyendas igual que en Fig. 7.

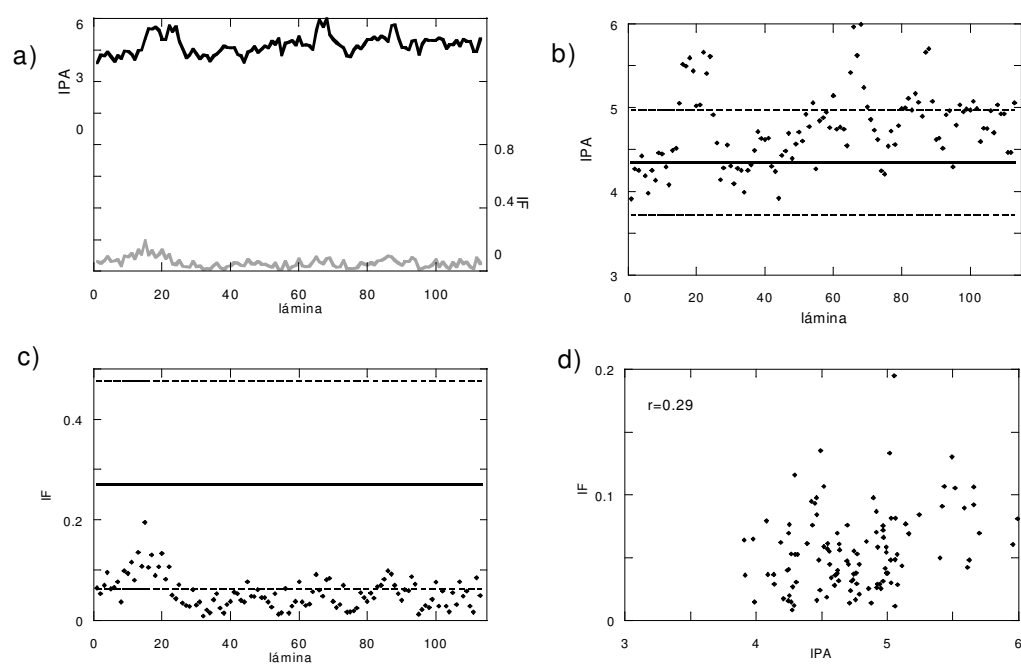


Figura 10. Índices de disolución del bap96-6k-II. Leyendas igual que en Fig. 7.



### **bap96-6k-II**

Este es el núcleo con mayor disolución de los 4. Sólo 72% de las láminas están dentro del intervalo de confianza del IPA, aunque no hubo ninguna lámina que cayera fuera del intervalo de confianza del IF (Figs.10b y 10c), lo que resulta en 32 de las 113 láminas (28%) con posibles problemas de disolución.

### **III.3. Error probable**

El error probable de los porcentajes de especies para los cuatro núcleos fluctuó entre 1% y 100%. Esto fue debido a que hubo especies en las que sólo se contó un organismo y por lo tanto el error fue de 100%. La media del error se encontró entre 1 y 76%. Sólo se presentan los cálculos hechos para las 13 especies más abundantes en los cuatro núcleos, el error del resto de las especies está dentro de este mismo intervalo (Tabla IV). Se hizo el ejercicio de hacer simulaciones variando los valores de las especies en función su error probable tanto para la base de referencia como para el núcleo bap96-6c, los resultados se muestran en el apéndice 2.

Tabla IV. Error probable (en porcentaje) de las 13 especies más abundantes en los cuatro núcleos utilizados (I=intervalo; X=media).

<b>Especie</b>	<b>bap96-6c</b>		<b>et97-3c</b>		<b>ca94-8k</b>		<b>bap96-6k-II</b>	
	I (%)	X (%)	I (%)	X (%)	I (%)	X (%)	I (%)	X (%)
<i>G.bulloides</i>	2 - 58	13	1 - 41	9	5 - 100	21	2 - 21	7
<i>N.dutertrei</i>	4 - 70	15	3 - 71	11	4 - 71	17	2 - 19	4
<i>N.pachyderma</i>	4 - 100	30	5 - 41	18	12 - 100	44	3 - 25	9
<i>G.ruber</i>	5 - 100	26	4 - 100	20	9 - 100	32	4 - 100	12
<i>G.sacculifer</i>	8 - 100	28	6 - 100	22	9 - 100	34	5 - 100	21
<i>O.universa</i>	13 - 100	37	7 - 100	24	11 - 100	44	4 - 58	18
<i>G.quinqueloba</i>	4 - 100	36	5 - 100	32	10 - 100	39	3 - 100	13
<i>G.glutinata</i>	6 - 71	19	9 - 100	28	6 - 100	35	6 - 71	16
<i>G.siphonifera</i>	7 - 100	37	12 - 100	51	14 - 100	51	7 - 100	26
<i>G.rubescens</i>	8 - 100	35	6 - 71	30	12 - 100	53	3 - 49	14
<i>G.cultrata</i>	12 - 100	45	9 - 71	29	12 - 100	44	7 - 100	26
<i>G.hexagonus</i>	13 - 100	46	27 - 100	62	17 - 100	62	21 - 100	49
<i>P.obliquiloculata</i>	27 - 100	78	11 - 100	42	24 - 100	76	11 - 100	34

### III.4. Reconstrucción de temperatura

Antes de aplicar el MAR a los datos de los núcleos, se hizo la reconstrucción de la TSM de las 301 muestras superficiales del Pacífico, para explorar si había sesgos debido a la distribución espacial de las muestras. Se reconstruyó la TSM fría (TSMf) y cálida (TSMc) de cada muestra, excluyendo de la base de datos de referencia la muestra a reconstruir. La correlación de los datos observados (TSM COADS), contra los reconstruidos, fue bastante alta para ambas temperaturas. Sin embargo, el error de reconstrucción fue mayor en las TSMf que en las TSMc (TSMf:  $r^2=0.98$ , e.e.=1.05 °C ( $r^2$ =coeficiente de determinación, e.e.=error estándar); TSMc:  $r^2=0.98$ , e.e.=0.95°C; Fig. 11a).

En el análisis de residuales, en ambas reconstrucciones, hubo 2 grupos de datos que mostraron mayor dispersión. En la TSMf la mayor dispersión ocurrió entre 0°-10 °C y 20°-30°C y en la TSMc entre 3°-16 °C y 23°-30 °C (Fig. 11b). A pesar de que la media de los residuales fue igual a 0 tanto de las TSMf como de las TSMc, se hizo un análisis de homogeneidad de varianzas entre los 2 grupos de datos más dispersos y en ambos casos se encontró que las varianzas fueron significativamente diferentes (TSMf: prueba de Bartlett  $\chi^2_1=30.8$ ;  $p<0.01$  y TSMc:  $\chi^2_1=229.9$ ;  $p<0.01$ ).

Para comprobar la relación de estos errores con su ubicación geográfica, se hizo un mapa con aquellas muestras con un error de reconstrucción mayor a 0.5°C ( $n=71$ ). La mayoría de ellas están situadas entre los 15°N y 15°S, excepto por un grupo de muestras en el centro del Pacífico Sur, las cuales corresponden a los datos dispersos de las bajas temperaturas (Fig. 12). En general, en las muestras de zonas mal representadas los errores se debieron a la falta de buenos análogos. Pero a pesar de haber pocas muestras de referencia en el Pacífico Norte la reconstrucción de TSM de las muestras fue buena (error <0.5°). Algunas muestras de zonas bien representadas y con composición específica muy similar a la de las muestras aledañas, tuvieron errores de reconstrucción grandes debido a que una de las especies era anómalamente abundante. Esto generó el artificio de que los mejores análogos resultaran ser muestras de distinta ubicación geográfica y con un rango de temperatura distinto. También se observó que en las muestras con un error >0.5°C, no siempre hay correlación entre un error grande en la temperatura fría y un error grande en la cálida (Fig. 11b y 12). Posiblemente parte de la dispersión de los datos sea debida a efectos de disolución (Ravelo, *et al.*, 1990).

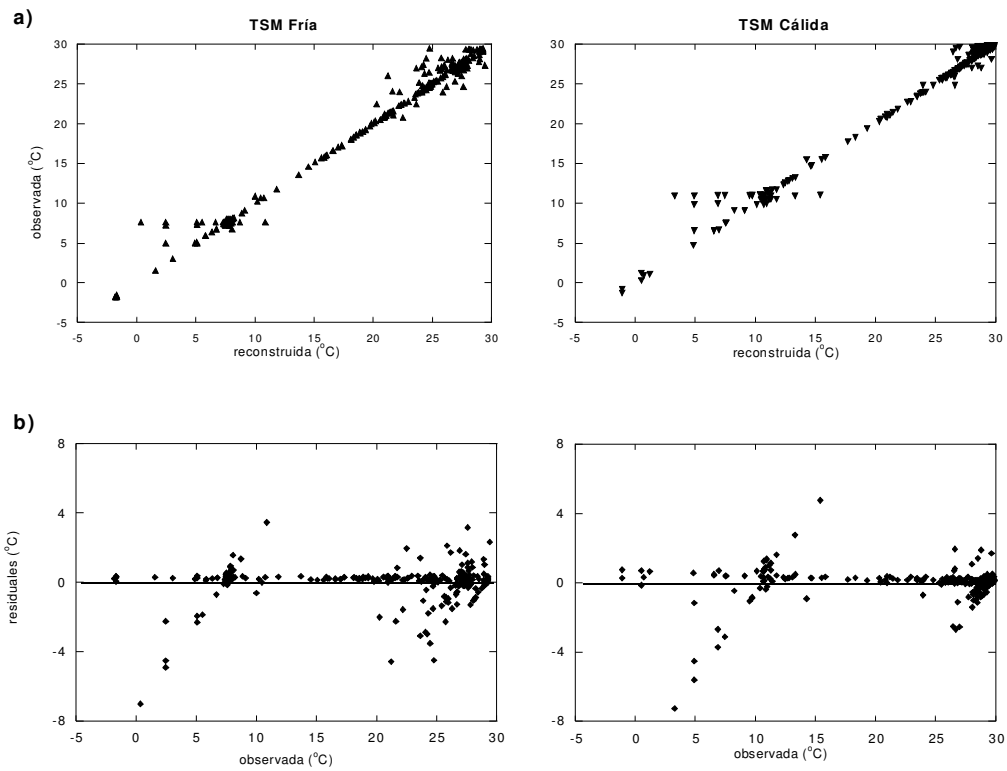


Figura 11. Reconstrucción de a) temperaturas frías y cálidas de las muestras superficiales del Pacífico y b) los residuales asociados.

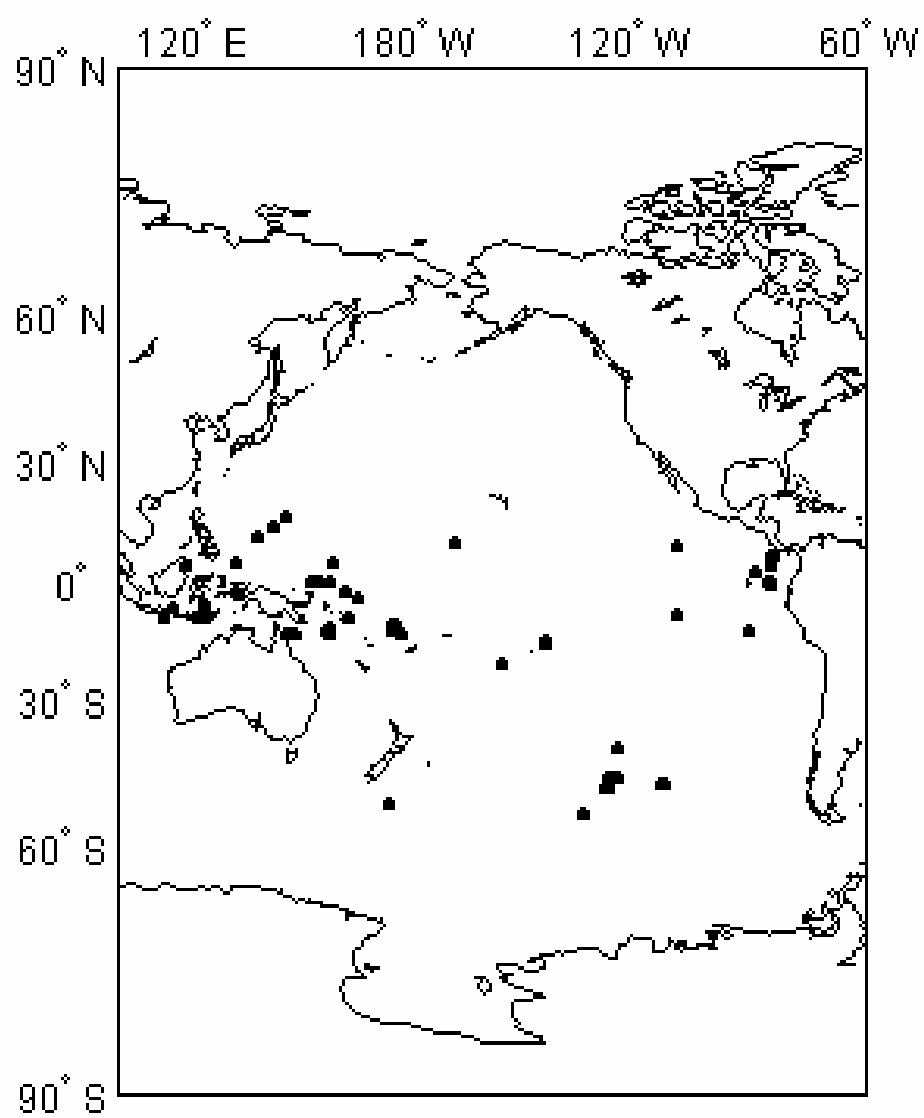


Figura 12. Ubicación de las muestras superficiales que tuvieron un error de reconstrucción de temperatura  $>0.5^{\circ}\text{C}$ .

### **Reconstrucción de la TSM de San Pedro**

Para probar la eficacia del método en la reconstrucción de variaciones temporales en un mismo lugar, se utilizaron los datos de trampas de San Pedro (Sautter y Thunell, 1991). Se reconstruyó la TSMf y TSMc de los 28 periodos de colecta de las trampas (Figura 13), la forma de las curvas de las TSM reconstruidas no se parecen a la de la TSM medida instrumentalmente (Fig. 14a). En el mes de enero, la TSM promedio está más de 7 grados por encima de la medida instrumentalmente y después a principios de febrero es más baja. Durante marzo, tanto la temperatura reconstruida promedio como la observada oscilan alrededor de los 15°C. En los meses de abril a junio, que es cuando ocurren las surgencias, la TSM reconstruida es más fría que la registrada. Sin embargo, durante esta época la isoterma de 10°C, se hace más somera aunque no llega a irrumpir en superficie (Figura 14b). La temperatura promedio reconstruida para ese periodo es de 9.5°C. Después durante junio-julio se registró un aumento de temperatura hasta llegar a los 22°C, este aumento aún siendo reconstruido por el método, lo hace 2°C por encima de lo observado (Figs. 13 y 14b).

Aún cuando no fue posible reconstruir la temperatura superficial, el patrón de la temperatura reconstruida es inverso al patrón de las isotermas. Posiblemente con esta resolución temporal, la reconstrucción de TSM está influida por la estructura de la columna de agua. Cuando la isoterma de los 13°C está por encima de los 50 metros a finales de enero, es cuando se tiene el primer descenso abrupto de la temperatura reconstruida, después desciende ligeramente y vuelve a hacerse más somera a finales de marzo, esta condición prevalece hasta mediados de julio, época en que la isoterma de los 13 °C se vuelve a hacer profunda, y que corresponde a un aumento de la temperatura reconstruida (Figs. 13 y 14).

### **Reconstrucción de TSM de los núcleos**

Se determinó la amplitud de la variación estacional de TSM en San Lázaro utilizando la base de datos COADS. El promedio de la TSMf fue de 18.7°C y de la TSMc de 26.2°C, con una diferencia entre estaciones de 7.5°C. La presentación de los resultados se centrará en el núcleo bap96-6c, que es el núcleo con mejor resolución de muestreo, mejor preservación y en donde se contaron todas las especies. En el núcleo ca94-8k también se contaron todas las especies, sin embargo, fue muestreado a menor resolución y muestra

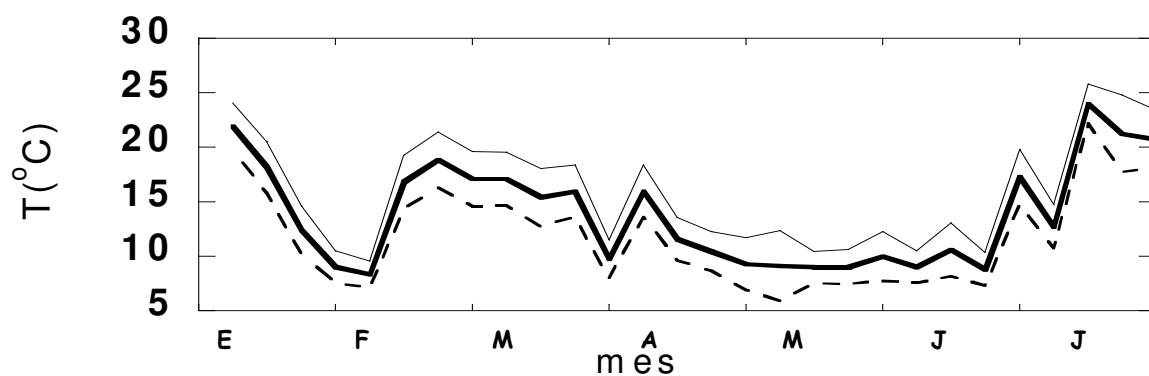


Figura 13. Reconstrucción de la TSM de San Pedro, utilizando datos de trampas de sedimentos de 7 meses. Temperatura cálida (—), promedio (—) y temperatura fría (---)

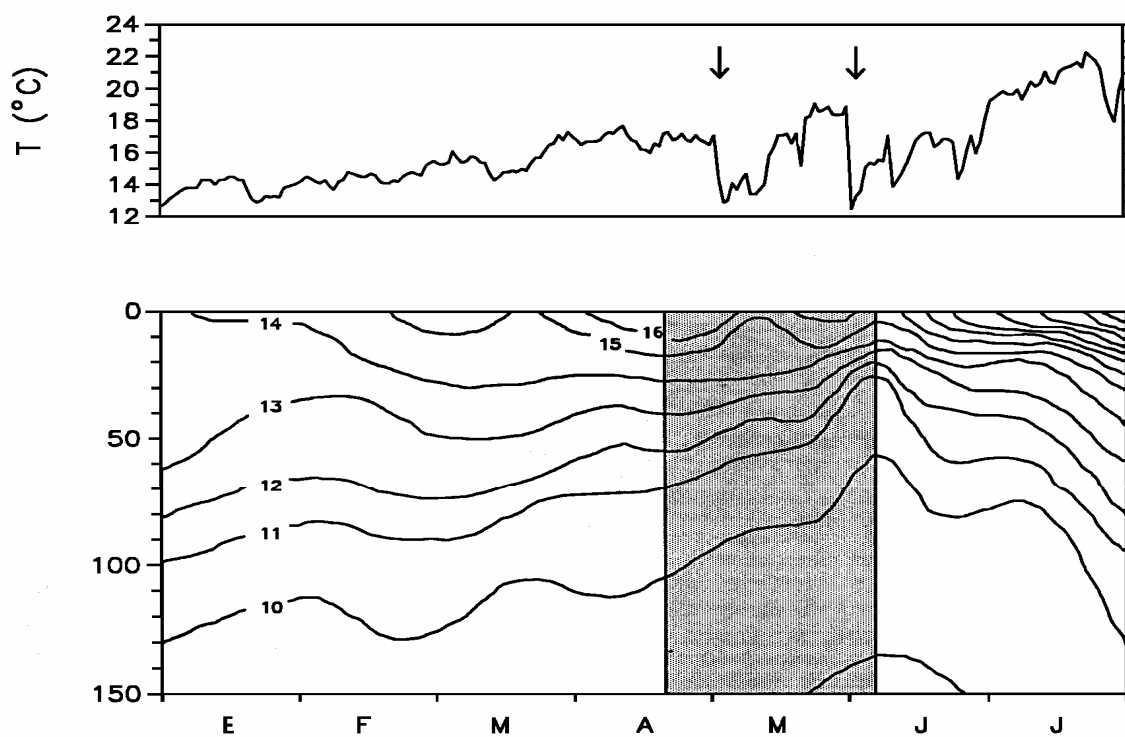


Figura 14. Perfil de temperatura de enero a julio de 1988 en San Pedro, California. Está sombreado el periodo de surgencias (Sautter y Thunell, 1991)

una mayor disolución relativa. El et97-3c tuvo buena preservación además de cubrir un periodo de tiempo similar al bap96-6c, lo que permite las comparaciones a pesar de tener diferente resolución temporal.

### **bap96-6c**

Una vez obtenidas las TSM fría y cálida, algunos valores se promediaron, debido a que, de acuerdo con la cronología, había años que estaban representados por dos ó tres láminas. Se hizo el promedio entre láminas, para tener un dato por año.

Cuando se utilizó la base de referencia completa, tanto la temperatura fría como la cálida estuvieron sobrestimadas (TSMf:  $X=26.05^{\circ}\text{C}$ , TSMc  $X=27.66^{\circ}\text{C}$ ), además de que la diferencia entre ambas fue mínima,  $1.6^{\circ}\text{C}$ , lo que no concuerda con la amplitud estacional típica de la zona. Las dos series tuvieron poca estructura, con periodos en los que la temperatura fue la misma durante varios años (Fig. 15).

Los resultados fueron similares al eliminar las muestras por debajo de los  $40^{\circ}\text{S}$  de la base de referencia. Se sobrestimaron ambas temperaturas (TSMf:  $X=26.37^{\circ}\text{C}$ , TSMc:  $X=28.04^{\circ}\text{C}$ ) y la diferencia entre ambas fue mínima:  $1.67^{\circ}\text{C}$ . Las series tampoco reconstruyeron la variación interanual, aunque hacia el pasado la TSMf se separa más de la TSMc y muestra más estructura (Fig. 15).

Al restringir la base de datos a la zona entre los  $30^{\circ}\text{N}$  y los  $30^{\circ}\text{S}$ , la temperatura fría se hizo ligeramente más cálida (TSMf:  $X=26.6^{\circ}\text{C}$ , TSMc:  $X=28.1^{\circ}\text{C}$ ) y la diferencia entre ambas temperaturas se redujo: 1.51. La estructura de las series se perdió casi totalmente, debido a que la mayoría de las láminas tuvieron los mismos análogos (Fig. 15).

Cuando se utilizaron solamente 13 especies en ambas bases de datos, las temperaturas fueron menos cálidas (TSMf:  $X=18.5^{\circ}\text{C}$ , TSMc:  $X=23.7^{\circ}\text{C}$ ). Las dos series son casi paralelas con una diferencia de  $5.2^{\circ}\text{C}$  entre ellas y muestran una mayor variación

Después de 1950, la temperatura se hace más cálida, con un periodo importante de temperaturas altas entre 1950-1960 y otro menos marcado a finales de los años 60 y principios de los años 70 (Fig. 15).

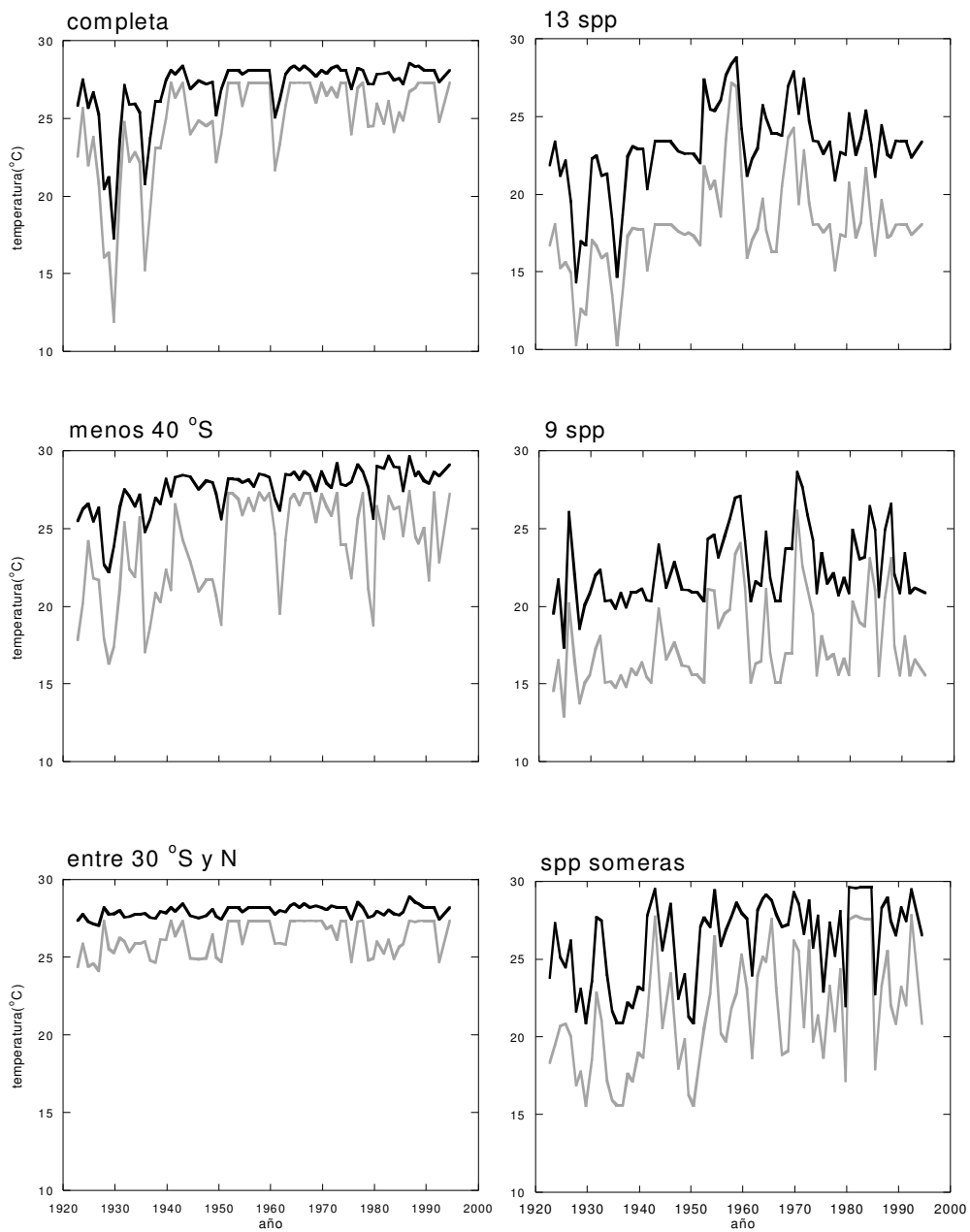


Figura 15. Núcleo bap96-6c. Temperaturas reconstruidas cálida ( — ) y fría ( — ) en las 6 simulaciones.



Con 9 especies, las temperaturas se hacen ligeramente más frías (TSMf:  $X=18.1^{\circ}\text{C}$ , TSMc:  $X=22.9^{\circ}\text{C}$ ) y la diferencia estacional se reduce a  $4.9^{\circ}\text{C}$ . Aunque la forma de las curvas entre esta simulación y utilizando 13 especies sea diferente, siguen presentándose dos periodos cálidos, pero en este caso ya no es tan clara la distinción entre antes y después de 1950 (Fig. 15).

Por último, al utilizar solamente las especies someras, las temperaturas fueron más cálidas que con 13 y 9 especies (TSMf:  $X=23.2^{\circ}\text{C}$ , TSMc:  $X=27.5^{\circ}\text{C}$ ), aunque no tanto como cuando se utilizaron todas las especies en ambas bases de datos. En este caso también se redujo la diferencia estacional a  $4.3^{\circ}\text{C}$ . La oscilación de la serie aumentó y ya no es posible distinguir los dos periodos cálidos del resto de la serie (Fig. 15).

Se compararon las series de temperatura obtenidas en las 6 simulaciones con las series de temperatura de COADS en San Lázaro. Se intentó hacer la correlación cruzada entre las series reconstruidas y observadas, pero debido a que sólo se tienen 38 años de datos de COADS y a que la cronología de los núcleos tiene un error de  $\pm 3$  años, para los últimos 40 años, esto no fue posible.

Todas las correlaciones obtenidas, aún haciendo promedios corridos en ambas series, fueron menores a 0.1 (datos no mostrados), por lo que sólo se compararon las medias. La comparación se hizo entre los 38 años de datos de COADS y los últimos 34 años de la series reconstruidas (1960-1994) (Tabla V y Fig. 16).

De las 6 simulaciones solamente en dos casos las medias de las series reconstruidas no fueron significativamente diferentes. Las TSMf de las reconstrucciones hechas utilizando 13 y 9 especies resultaron ser similares a los datos de COADS en San Lázaro. Ninguna de las 6 series de TSMc reconstruidas fueron parecidas a la TSMc COADS (Tabla V y Fig. 16a).

Se hizo un promedio entre la TSM COADS de San Lázaro y Punta Eugenia que es un sitio importante de surgencias localizado a 440Km al norte de San Lázaro y que podría estar aportando organismos a los sedimentos de San Lázaro por procesos de advección. Tanto la TSMf como la TSMc de la reconstrucción con 13 especies fueron similares al

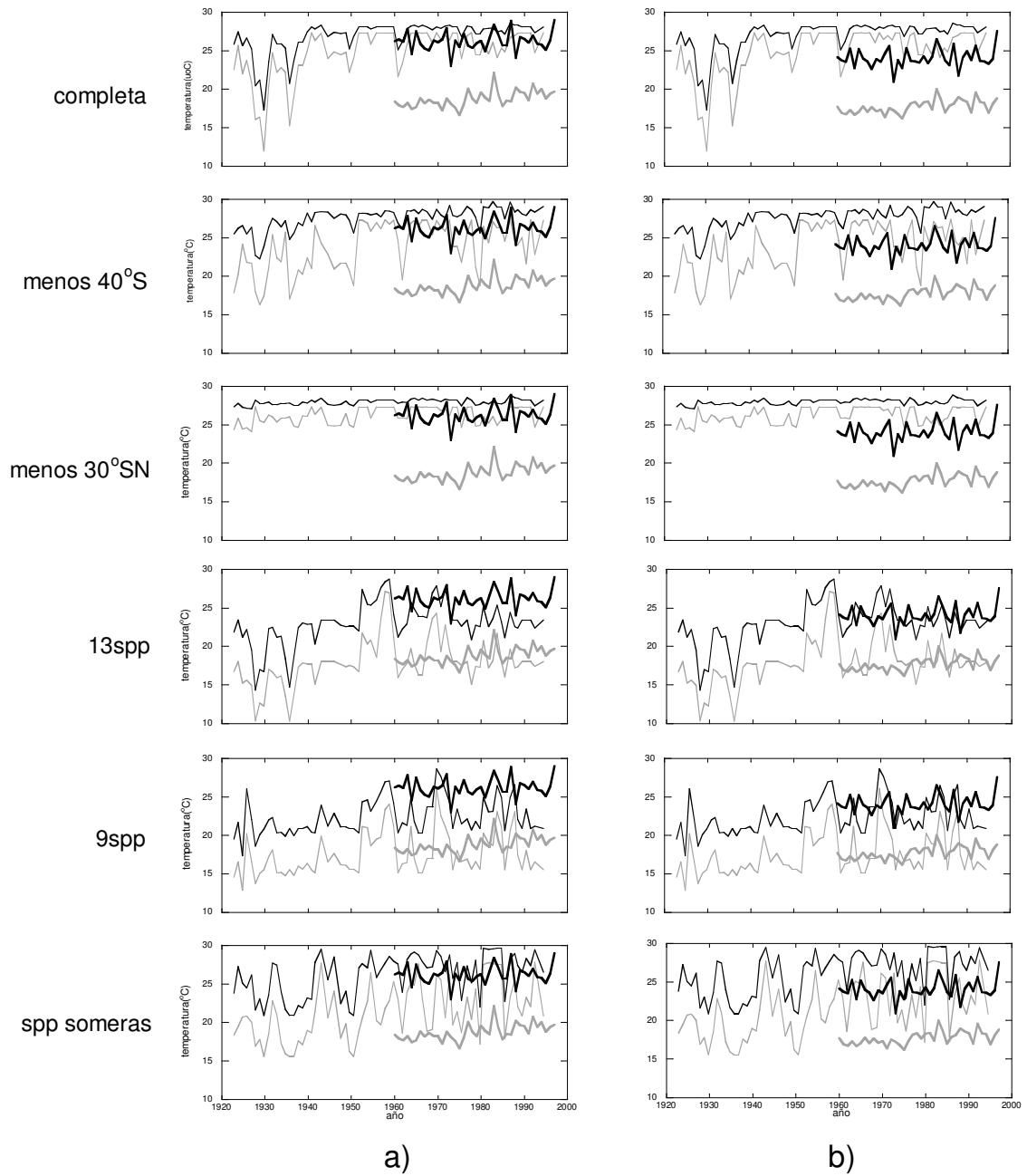


Figura 16. Núcleo bap96-6c. Comparación de las TSM reconstruidas cálidas ( — ) y frías ( — ) de las 6 simulaciones contra las temperaturas de COADS cálidas ( — ) y frías ( — ) de a) San Lázaro y b) el promedio de San Lázaro con Punta Eugenia.

promedio de ambos lugares de los datos de COADS, así como la TSMf obtenida en la reconstrucción con 9 especies. La TSMc reconstruida con 13 especies fue más fría que la registrada en San Lázaro, pero al compararla con el promedio entre los dos sitios las temperaturas medias reconstruidas fueron similares. Aunque la TSMc reconstruida con 9 especies fue significativamente diferente al promedio COADS, los valores reconstruidos se aproximaron a los valores instrumentales (Tabla V y Fig. 16b).

Tabla 5. Comparación entre las series de temperatura reconstruidas para el núcleo bap96-6c y los datos observados de COADS en San Lázaro y el promedio de San Lázaro con Punta Eugenia.

Simulaciones	TSM		San Lázaro		SnLzPEug	
	X	d.e	t*	p	t*	p
<b>completo</b>						
fría	26.05	1.64	27.9	<0.001	26.2	<0.001
cálida	27.16	0.87	5.8	'	13.3	'
<b>menos 40°S</b>						
fría	26.37	1.41	25.2	'	30.5	'
cálida	28.04	0.79	7.6	'	15.2	'
<b>menos 30°SN</b>						
fría	26.58	0.99	31.3	'	39.2	'
cálida	28.09	0.31	9.1	'	17.4	'
<b>con 13 spp.</b>						
fría	18.48	2.13	-0.5	0.6*	1.8	0.07*
cálida	23.72	1.65	-7.2	'	-1.1	-1.07*
<b>con 9 spp.</b>						
fría	18.08	2.83	-1.2	0.23*	0.06	0.54*
cálida	22.94	2.29	-7.4	<0.001	-2.6	<0.001
<b>spp. someras</b>						
fría	23.22	3.30	7.6	'	9.4	'
cálida	27.49	2.06	3.2	'	8.2	'

(\*Prueba t-Student, en todos los casos 67 grados de libertad. Temperaturas instrumentales promedio con desviación estándar: San Lázaro: TSMf=18.7±1.1; TSMc=26.2±1.2; SnLzPEug: TSMf=17.8±0.9, TSMc=24.1±1.2).

Las gráficas de los índices de disimilitud de las 6 simulaciones muestran que los análogos elegidos durante las 3 reconstrucciones hechas variando la cobertura geográfica (completa, menos 40°S y sólo 30°SN) y utilizando todas las especies tienen índices de disimilitud parecidos y que sus valores son mayores (análogos más disímiles) que los obtenidos utilizando un menor número de especies (Fig. 17). Esto, aunado a que utilizando menos especies las temperaturas reconstruidas son más cercanas a las medidas instrumentalmente, sugiere que el método es más sensible al número o tipo de especies utilizadas que a la cobertura espacial. Muchas de las especies raras podrían no

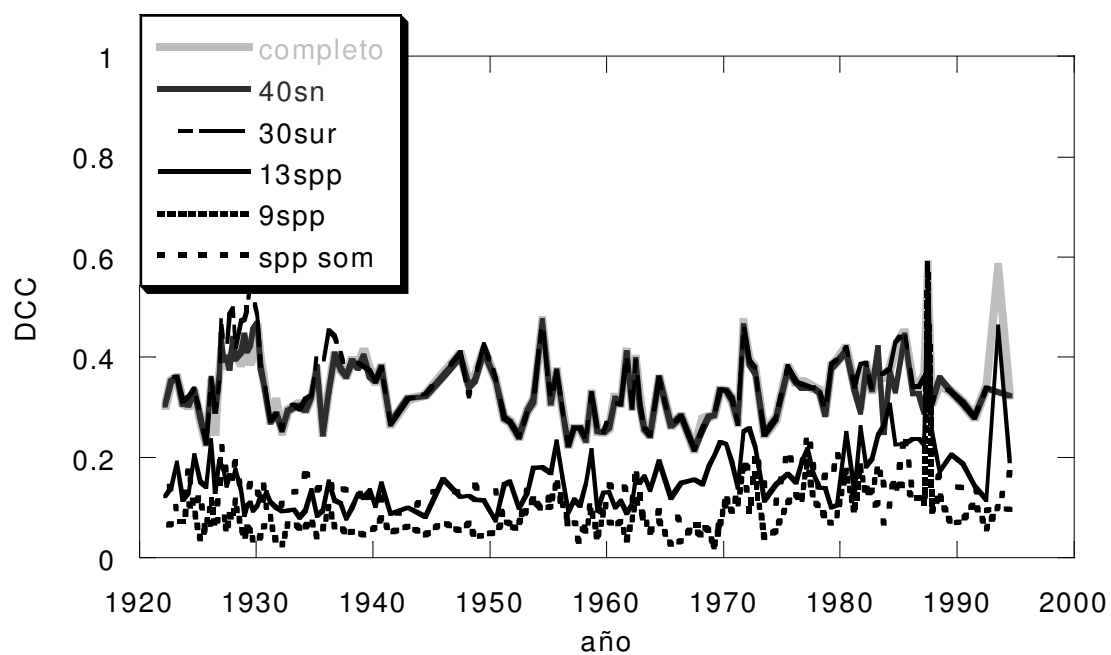


Figura 17. Núcleo bap96-6c. Índices de disimilitud (DCC) entre las faunas del núcleo y las de las muestras análogas obtenidos en las 6 simulaciones.

tener información ambiental relevante, o al encontrarse en bajas proporciones la señal es pequeña con respecto al ruido, lo que podría explicar la sobrestimación de temperatura cuando se utilizaron todas las especies. En los otros núcleos (et97-3c, ca94-8k y bap96-6k-II), se encontró el mismo patrón: mayores coeficientes de disimilitud en las simulaciones en las que se variaba la cobertura geográfica pero utilizando todas las especies y coeficientes menores al reducir el número de especies en la simulación (datos no mostrados). En todos los núcleos, en las simulaciones utilizando pocas especies (13 y 9 spp. y especies someras), los índices de disimilitud fueron menores o cercanos a 0.3, que es un valor reportado en la literatura como el adecuado para asegurar que se están eligiendo buenos análogos (Andersson, 1997 y Ortiz y Mix 1997).

Para mostrar las diferencias entre una lámina y otra dentro del núcleo y determinar si es posible extraer una señal de mayor frecuencia y no sólo la media de un largo periodo, se hizo un análisis de componentes principales y también se calculó la autosimilitud de la serie.

Se obtuvieron los 2 primeros modos de los datos de la base de referencia, con el análisis de componentes principales, y en ellos se proyectaron los datos del conjunto de 13 especies. La cobertura espacial de las láminas en el área generada por los 2 modos, es relativamente amplia. Esto podría estar indicando que la variación interláminas (tiempo) está dentro del mismo orden que la variación de los datos de referencia (espacio), lo que sugiere que hay suficiente información en las láminas para reconstruir oscilaciones menores a 100 años y no sólo la temperatura promedio. Sin embargo, en el área cubierta por el núcleo hay poca representación de las muestras de referencia (bajo número de buenos análogos), por lo que pequeñas variaciones entre láminas no pueden ser resueltas con esta base de referencia. También debido al bajo número de análogos, variaciones mayores en la posición de las láminas dentro de este espacio, implican la selección de grupos de análogos con condiciones ambientales muy diferentes (Fig. 18).

La autosimilitud del núcleo se obtuvo calculando el índice de disimilitud (DCC) de cada lámina con respecto a la primera. Se encontró que la similitud de la serie seguía muy de cerca la variación en el tiempo de *G. bulloides*, que es la especie más abundante. Se eliminó esta especie del núcleo y se volvió a calcular la disimilitud y el patrón fue

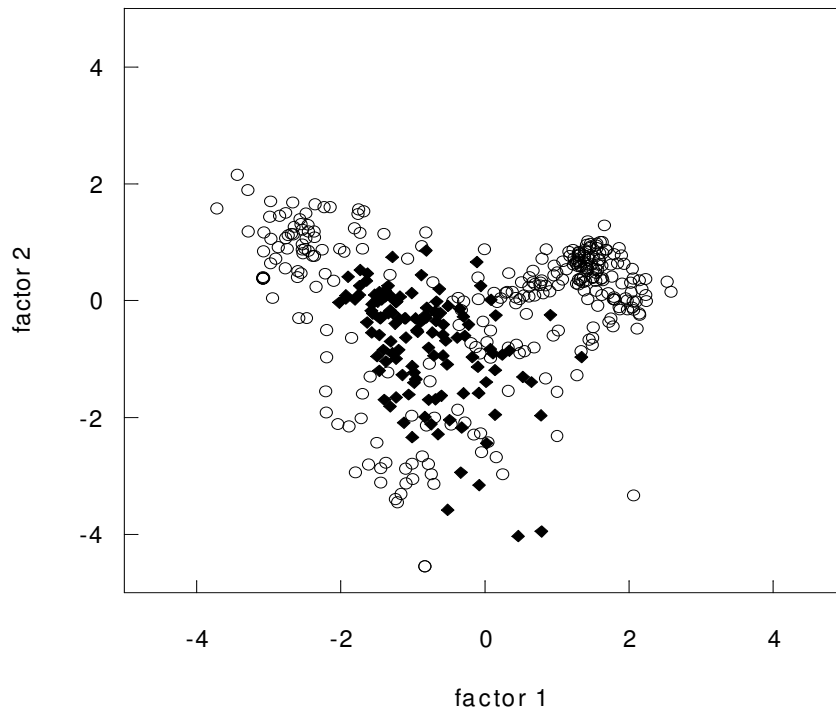


Figura 18. Proyección del núcleo bap96-6c (  $\blacklozenge$  ) en el espacio generado por los dos primeros factores de la base de referencia del Pacífico (  $\circ$  ).

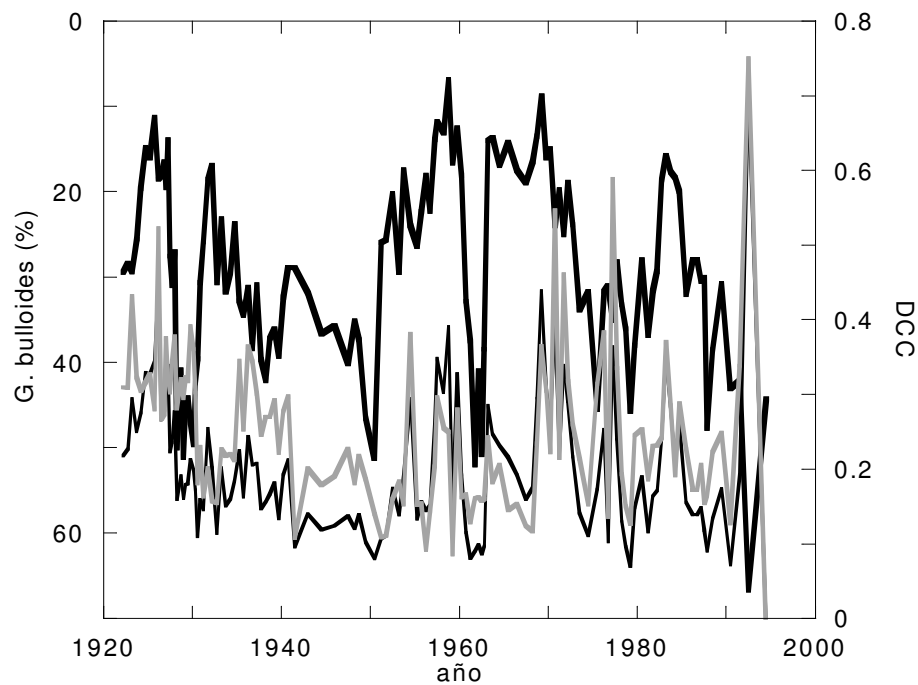


Figura 19. Comparación de *G. bulloides* (  $\text{—}$  ) con la autosimilitud (DCC) del núcleo bap96-6c, incluyendo a *G. bulloides* (  $\text{—}$  ) y sin *G. bulloides* (  $\text{—}$  ).

básicamente el mismo (Fig. 19). Esto sugiere que el resto de las especies en conjunto responden de una forma similar a *G. bulloides* a las variaciones ambientales, aún cuando de forma individual el patrón de cada especie sea diferente, sin embargo, como el DCC se calcula con base en porcentajes no es posible descartar un efecto de cierre de la matriz, debido a la dominancia de *G. bulloides*. Los patrones de autosimilitud de los demás núcleos (et97-3c, ca94-8k y bap96-6k-II) fueron parecidos a los encontrados en éste núcleo. Estos resultados no se reportan por que no aportan ninguna información adicional en la interpretación de los datos.

### **et97-3c**

Los resultados obtenidos en éste núcleo no son totalmente comparables con el bap96-6c, debido a que en éste sólo se contaron 9 especies en todas las láminas y 13 especies en las últimas 38 láminas. Por lo que sólo son comparables las reconstrucciones en donde en ambas bases de datos se utilizan 13 y 9 especies. Sin embargo, se presentan las demás reconstrucciones para explorar el efecto de comparar sólo las especies más abundantes del sitio contra una base de datos completa.

Al utilizar la base de referencia completa, se nota un cambio importante con respecto al bap96-6c: la diferencia entre las series reconstruidas fría y la cálida es mayor que en el bap96-6c (3.6 °C), además de que en este caso las temperaturas no están sobrestimadas y muestran mayor variabilidad (Fig. 20). De hecho, la media de la TSMc fue similar a la media de COADS en San Lázaro (Tabla VI). Al utilizar la base sin las muestras por debajo de los 40°S, no se nota un cambio importante, la diferencia estacional entre las series aumenta (6.9°C), pero en este caso ninguna de las medias es similar a la de COADS en San Lázaro (Tabla VI y Fig. 20). Con la base de datos restringida a los 30°NS, también hay una sobrestimación de la temperatura, como ocurrió con el bap96-6c, aunque no tan marcado y la diferencia entre las series fría y cálida se reduce (2.3°C), aunque no tanto como en el bap96-6c (Tabla VI y Fig. 20). Tanto con la base completa como con la base con las muestras 30°NS, la diferencia entre las series fría y cálida fue menor después de 1940 que fue cuando sólo se contaron 9 especies (Fig. 20).

Otra diferencia importante con el bap96-6c, es que al utilizar en ambas bases de datos 13 y 9 especies tanto la temperatura fría como la cálida se subestiman, están por debajo de

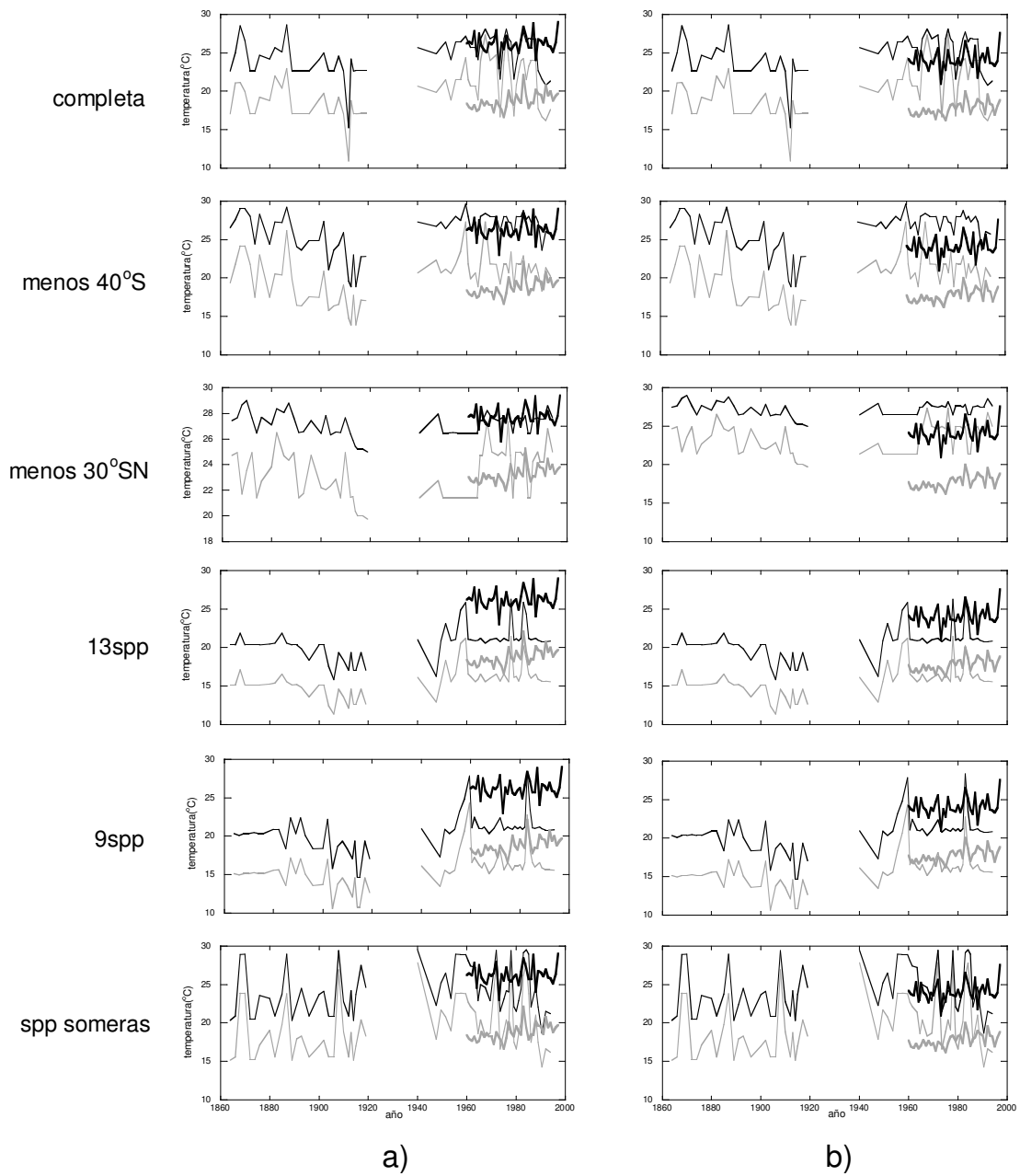


Figura 20. Núcleo et97-3c. Comparación de las temperaturas reconstruidas en las 6 simulaciones contra la temperatura de COADS a) de San Lázaro y b) el promedio de San Lázaro y Punta Eugenia (misma leyenda que Fig. 16).



la temperatura observada (con 13 especies: TSMf=16.5, TSMc=21.5; con 9 especies: TSMf=16.49, TSMc=21.47) y ninguna de las cuatro series resultó ser similar a las temperaturas de COADS en San Lázaro (Tabla VI y Fig. 20a). Cuando se utilizaron sólo las especies someras la similitud entre las series reconstruidas y observadas aumenta aunque esta no es significativa (Tabla VI y Fig. 20).

Al comparar las diferentes simulaciones con los datos de COADS en San Lázaro la única que no fue significativamente diferente fue la serie de TSMc reconstruida con la base de referencia completa (Tabla VI y Fig. 20a). Las series obtenidas con 13 y 9 especies respectivamente tuvieron temperaturas por debajo de las reportadas en la zona (Fig. 20a). Con la reconstrucción de temperatura hecha con las especies someras a pesar de que las series se sobrelaparon, las medias resultaron ser significativamente diferentes (Tabla VI y Fig. 20a).

Tabla VI. Comparación entre las series de temperatura reconstruidas para el núcleo et97-3c y los datos observados de COADS en San Lázaro y el promedio de San Lázaro con Punta Eugenia.

Simulaciones	TSM		San Lázaro		SnLzPEug	
	X	d.e	t*	p	t*	p
<b>Completo</b>						
fría	21.7	3.7	27.9	<0.001	6.5	<0.001
cálida	25.3	2.3	5.8	0.07*	2.5	‘
<b>menos 40°S</b>						
fría	21.3	1.7	25.2	<0.001 ‘	10.7	‘
cálida	27.2	1.2	3.4	‘	10.4	‘
<b>menos 30°SN</b>						
fría	24.3	1.8	15.1	‘	17.5	‘
cálida	27.4	0.6	4.8	‘	14.1	‘
<b>con 13 spp.</b>						
fría	16.5	1.4	-6.8	‘	-3.5	‘
cálida	21.5	1.5	-13.5	‘	-5.5	‘
<b>con 9 spp.</b>						
fría	16.5	1.4	-6.7	‘	-3.1	‘
cálida	21.5	1.5	-13.6	‘	-5.4	‘
<b>spp. someras</b>						
fría	20.2	3.8	2.3	‘	1.9	0.05*
cálida	24.5	3.1	-2.8	‘	-0.5	0.62*

(\*Prueba t-Student, en todos los casos 47 grados de libertad. Temperaturas instrumentales promedio con desviación estándar: San Lázaro: TSMf=26.2±1.2, TSMc=18.7±1.1; SnLzPEug: TSMf=17.8±0.9, TSMc=24.1±1.2)

Al comparar las series del núcleo et97-3c con el promedio de las temperaturas de San Lázaro y Punta Eugenia, resultó que las únicas medias similares fueron las obtenidas de la reconstrucción con especies someras (Tabla VI y Fig. 20b). En cambio, la serie cálida reconstruida con la base de referencia completa resultó ser significativamente diferente, a pesar de que la serie reconstruida se traslapa con la observada. Esto es debido a la gran amplitud que presenta la serie que incluso se traslapa con la serie fría de COADS (Tabla VI y Fig. 20b). En las demás series los patrones permanecieron; con las bases de datos reducidas a 40° S y 30°NS las temperaturas se sobrestimaron y con 13 y 9 especies las temperaturas se subestimaron (Tabla 6 y Figura 20b).

#### **ca94-8k**

En este núcleo no se realizaron pruebas estadísticas para comparar las medias reconstruidas con las instrumentales, por el bajo número de datos existentes entre 1950-1997, pero se incluyen las graficas para efectos de comparación. Utilizando todas las especies contadas y variando la cobertura geográfica (Fig. 21), en las reconstrucciones las temperaturas están por encima de lo observado en la zona y la diferencia entre la serie fría y cálida es mínima. Cuando se reduce el número de especies ambas series se separan y muestran gran variabilidad, mucho mayor que la presentada en las temperaturas instrumentales. Las reconstrucciones derivadas de utilizar 13 y 9 especies generan series que subestiman la temperatura observada (Fig. 21). Esto es más evidente con la reconstrucción obtenida al utilizar sólo las especies someras en donde las temperaturas antes de 1950 están por debajo de las esperadas sin embargo aumenta hacia el pasado (Fig. 21).

#### **bap96-6k-II**

Éste es el núcleo con el registro más largo, pero con pocas muestras que se traslapen con el registro instrumental. Se encontró que hubo poca variabilidad en la señal reconstruida en las diferentes simulaciones. En general hubo largos periodos en donde la temperatura reconstruida fue la misma, debido a la elección de los mismos análogos para todas las muestras. Los efectos encontrados en los otros núcleos al variar la cobertura geográfica o el número de especies, no son tan marcados en este núcleo. A pesar de que con 13 y 9 especies la amplitud reconstruida es similar a las observadas, la serie con más estructura y variabilidad fue la obtenida de la simulación con especies someras (Fig. 22).

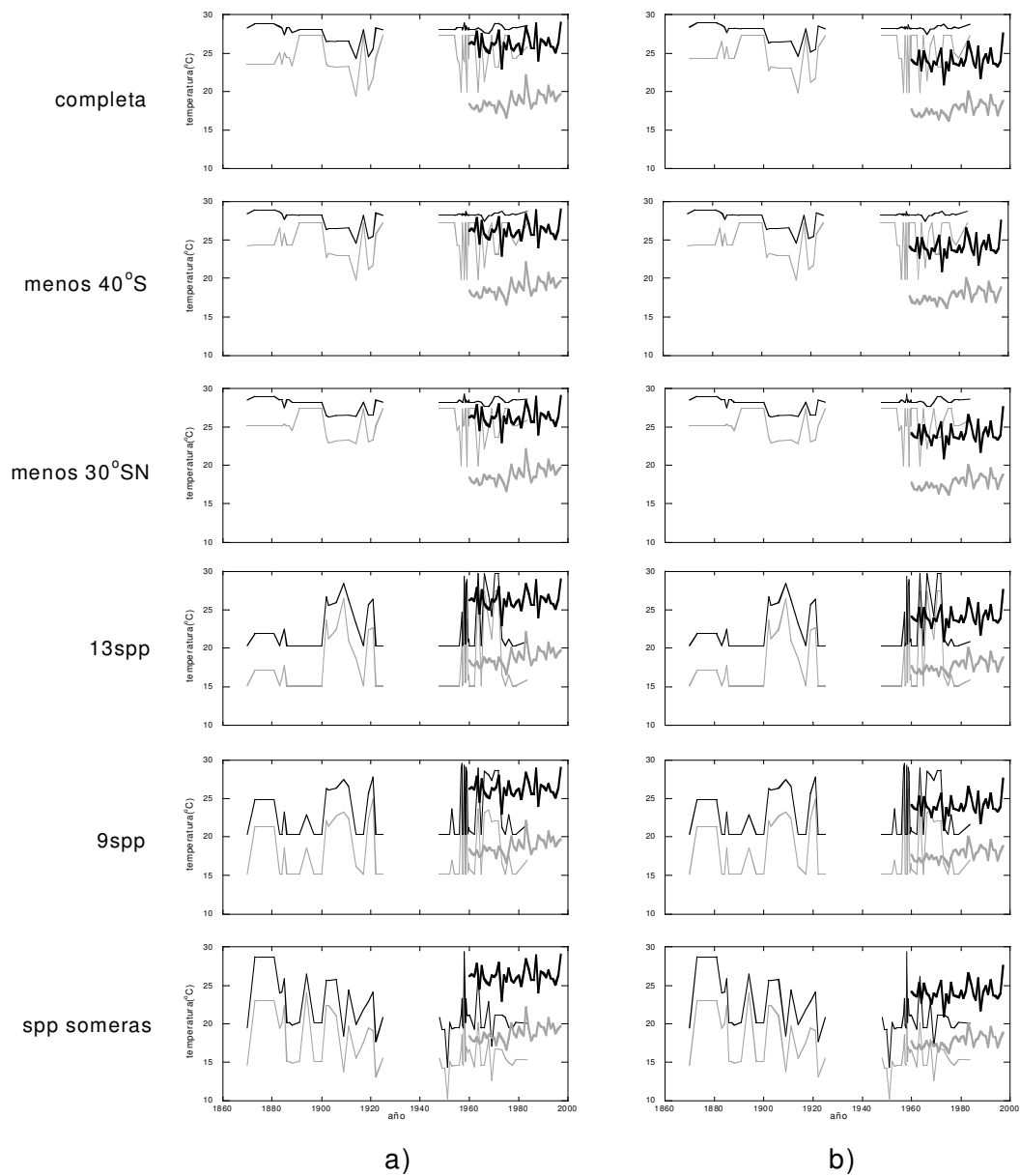


Figura 21. Núcleo ca94-8k. Comparación de las temperaturas reconstruidas en las 6 simulaciones contra la temperatura de COADS a) de San Lázaro y b) el promedio de San Lázaro y Punta Eugenia (misma leyenda que Fig. 16).

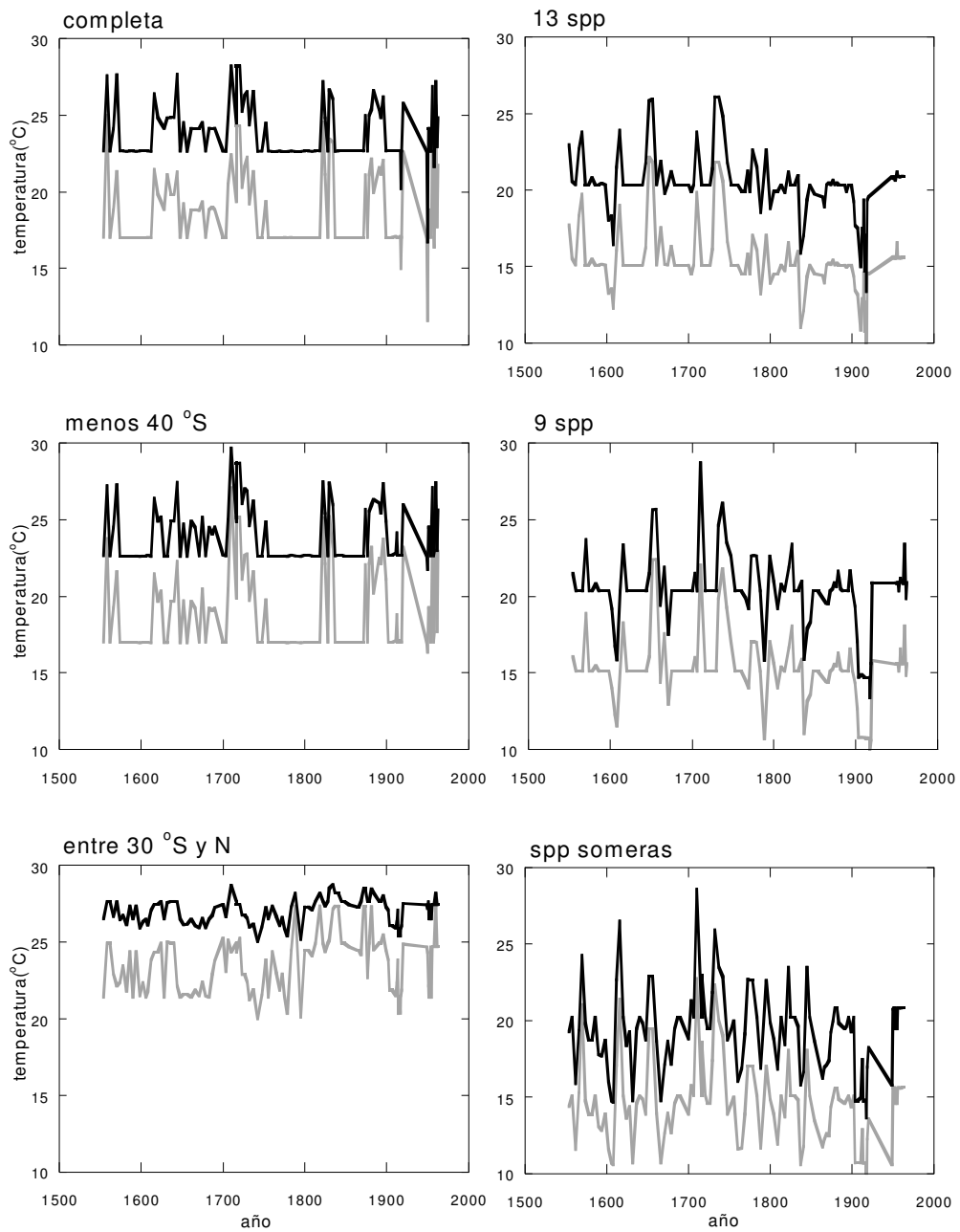


Figura 22. Núcleo bap96-6k-II. Temperaturas reconstruidas en las 6 simulaciones (misma leyenda que en Fig. 15).

### III.5. Comparación del MAR vs TAM

Para comparar los resultados cuando se utilizan sólo los datos de la base de referencia original y los 10 primeros análogos; se reconstruyó la TSM con el TAM, utilizando solamente las 13 especies más abundantes del núcleo bap96-6c. Esta fue la reconstrucción que resultó ser más similar a los datos instrumentales utilizando el MAR.

Se compararon las series completas exceptuando 3 muestras que en ambas series dieron valores cercanos a 0. Se encontró que no hubo diferencias significativas entre las temperaturas frías reconstruidas por ambos métodos (MAR  $X=17.9(3.1)$  (media(d.e.)); TAM  $X=17.3(2.8)$ ;  $t=1.14$ , g.l.=138,  $p=0.25$ ). Las temperaturas cálidas reconstruidas con el método TAM fueron significativamente más bajas que las obtenidas con el MAR (MAR  $X=22.9(2.7)$ ; TAM  $X=21.9(2.5)$ ;  $t=2.28$ , g.l.=138,  $p<0.02$ ; Fig. 23).

Al comparar las series con los datos instrumentales para el mismo periodo de tiempo (1960 al presente), la serie de temperatura fría reconstruida con el TAM no fue significativamente diferente a la serie de COADS en San Lázaro y el promedio de San Lázaro y Punta Eugenia de los meses más fríos (MAT<sub>f</sub>=18.2(2.5); SnLz=18.7(1.1),  $t=-1.03$ , g.l.=67,  $p=0.304$ ; SnLzEu=17.8(0.9),  $t=0.96$ , g.l.=67,  $p=0.33$ ; Fig. 23) que fue un resultado similar al obtenido con el MAR. En cambio las temperaturas cálidas reconstruidas fueron significativamente más bajas que las registradas en ambos sitios para el mismo periodo de tiempo (MAT<sub>c</sub>=22.8(2.1); SnLz=26.2(1.2),  $t=-8.2$ , g.l.=67,  $p<0.000$ ; SnLzEu=24.1(1.3),  $t=-3.1$ , g.l.=67,  $p=0.002$ ; Fig. 23).

### III.6. Las especies

Al investigar qué especies respondían más sensiblemente durante los dos periodos cálidos encontrados en el núcleo bap96-6c utilizando 13 y 9 especies, se encontró que correspondían a un aumento de *G. glutinata* acompañado de un empobrecimiento en *G. bulloides*. Las abundancias de ambas especies están en contrafase, de hecho tienen una correlación negativa ( $r=-0.6$ ). Al buscar la misma relación en los núcleos et97-3c y ca94-8k esta no es tan evidente, incluso en el núcleo ca94-8k las poblaciones están en fase. Sin embargo, se hicieron promedios de 5 años y se encontró que en el núcleo et97-3c se pueden distinguir dos periodos en los que las poblaciones están en contrafase (1870-1920 y en la década de 1980) y en el ca94-8k un periodo entre 1880-1910.

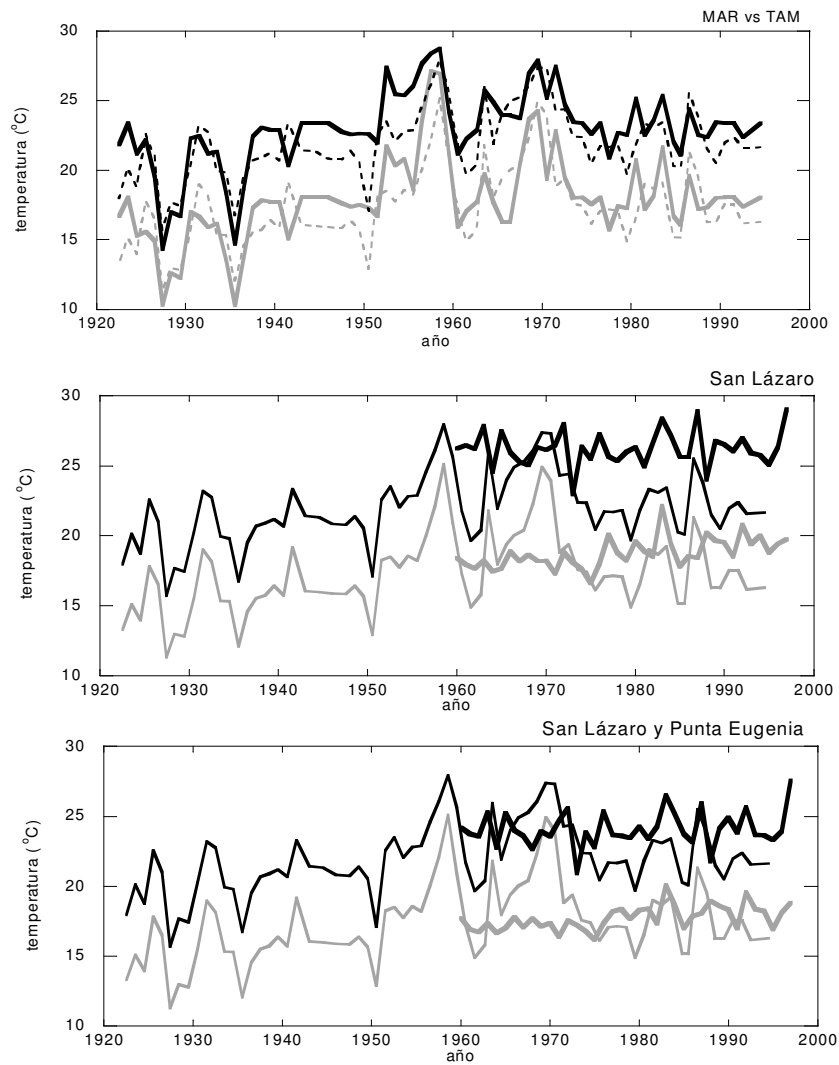


Figura 23. Comparación de las temperaturas reconstruidas con el método TAM (--) y el MAR (-) y de éstas contra las temperaturas de San Lázaro y Punta Eugenia (misma leyenda que Fig. 16).

Como se dijo antes el núcleo bap96-6c es el que está mejor preservado y fue muestreado a mayor resolución, mientras que esta relación entre especies se pierde en núcleos con mayor disolución y menor resolución en el muestreo. De hecho, al hacer los promedios de 5 años esta relación ya no es tan evidente en el núcleo bap96-6c y entre 1920-1925 y 1930-1933 esta covarianza se pierde (Fig. 24).

### **Cambios en la abundancia de especies con simbioses vs. especies sin simbioses.**

En la Corriente de California, la abundancia de las especies con simbioses y de las especies sin simbioses, varía en función a la disponibilidad de luz y alimento (Ortiz *et al.*, 1995). Las especies con simbioses son indicadoras de aguas 'azules', oligotróficas y las especies sin simbioses de aguas 'verdes', eutróficas.

A fin de corroborar esta observación, se calcularon las proporciones entre especies superficiales con simbioses (*G. sacculifer*, *G. glutinata* y *G. ruber*) y sin simbioses (*G. bulloides*, *N. pachyderma* y *G. quinqueloba* [ss/as]). Para dar el mismo peso a cada especie dentro del cálculo de la proporción, independientemente de su abundancia absoluta, las especies se normalizaron dividiendo la frecuencia absoluta en cada lámina entre el valor máximo de cada una dentro del núcleo, por lo que los valores de cada especie van de 0 a 1. También se calculó la proporción entre las especies superficiales con simbioses de zonas cálidas (exceptuando *G. glutinata*) contra las especies profundas con simbioses *O. universa* y *N. glutinata*, (ssc/ps).

La relación entre especies superficiales con simbioses sobre especies superficiales sin simbioses, nos indica la relación entre aguas oligotróficas sobre eutróficas. Valores altos corresponden a la prevalencia de condiciones oligotróficas y valores bajos la prevalencia de condiciones eutróficas. La relación entre especies con simbioses superficiales sobre profundas, podría dar información sobre la relación entre aguas oligotróficas cálidas sobre aguas oligotróficas frías.

En el núcleo bap96-6c, se pueden identificar 4 máximos en la serie ss/as (especies superficiales con simbioses/asimbioses), con centro en los años 1941, 1957, 1969-1971 y 1982. Estos máximos coinciden con Los Niños de 1940-41, 1958, 1969-70 y 1982-1983, en donde prevalecen las condiciones oligotróficas sobre la cuenca (Fig. 25).





En el núcleo et97-3c, los máximos tienen valores menores y ocurren en los años 1868, 1885, 1929, 1959, 1972 y 1983 que dentro del rango de error de la cronología ( $\pm 3$  años) podrían corresponder a Los Niños de 1926, 1958, 1969-70 y 1983. El Niño de 1940 no alcanza a resolverse en esta serie, en el núcleo existe un hiato alrededor de estos años por lo que posiblemente la señal se perdió (Fig. 25).

En el núcleo bap96-6k-II, no se resuelven ninguno de estos años, los máximos encontrados corresponden a los años 1586, 1616, 1632, 1687, 1705-1710, 1830 y 1891. Sin embargo, la cronología de éste tiene un mayor error asociado, además de un intervalo de muestreo también mayor, por lo que posiblemente estos máximos correspondan a periodos cálidos de mayor duración y no estrictamente a eventos de El Niño (Fig. 25). Sin embargo, dentro del error cronológico asociado a este núcleo, el pico máximo entre los años 1705-1710 puede corresponder a los Niños que ocurrieron en los años 1720 y 1728, que fueron clasificados por Quinn *et al.* (1987) como fuerte(+) y muy fuerte. Por otro lado, antes de El Niño de 1728 hubo varios Niños continuos 1701, 1707-1708, 1714-1715 y 1720, todos clasificados como fuerte y fuerte(+), por lo que el máximo encontrado en la serie ss/as puede ser a los efectos de algunos de ellos.

En cuanto a la relación entre especies cálidas someras con simbiontes y profundas (ssc/sp), en general, los máximos en los núcleos bap96-6c y et97-3c, corresponden a los máximos encontrados en la serie ss/as, aunque también en el núcleo bap96-6c, en la década de los años 30 (1935, 1939), ocurren varios años relativamente más cálidos. En el núcleo et97-3c, también coinciden los máximos con los de la serie ss/as, pero son de menor magnitud, aunque en los años 1887, 1902 y 1912, hay tres máximos que podrían corresponder a Los Niños de 1905 y 1911-15, los cuales no se distinguen en la serie ss/as (Fig. 25).

En el bap96-6k-II, se observa una tendencia en las especies someras de aguas oligotróficas a aumentar hacia el presente, lo que podría ser reflejo de la tendencia a largo plazo del calentamiento actual (Fig. 25).

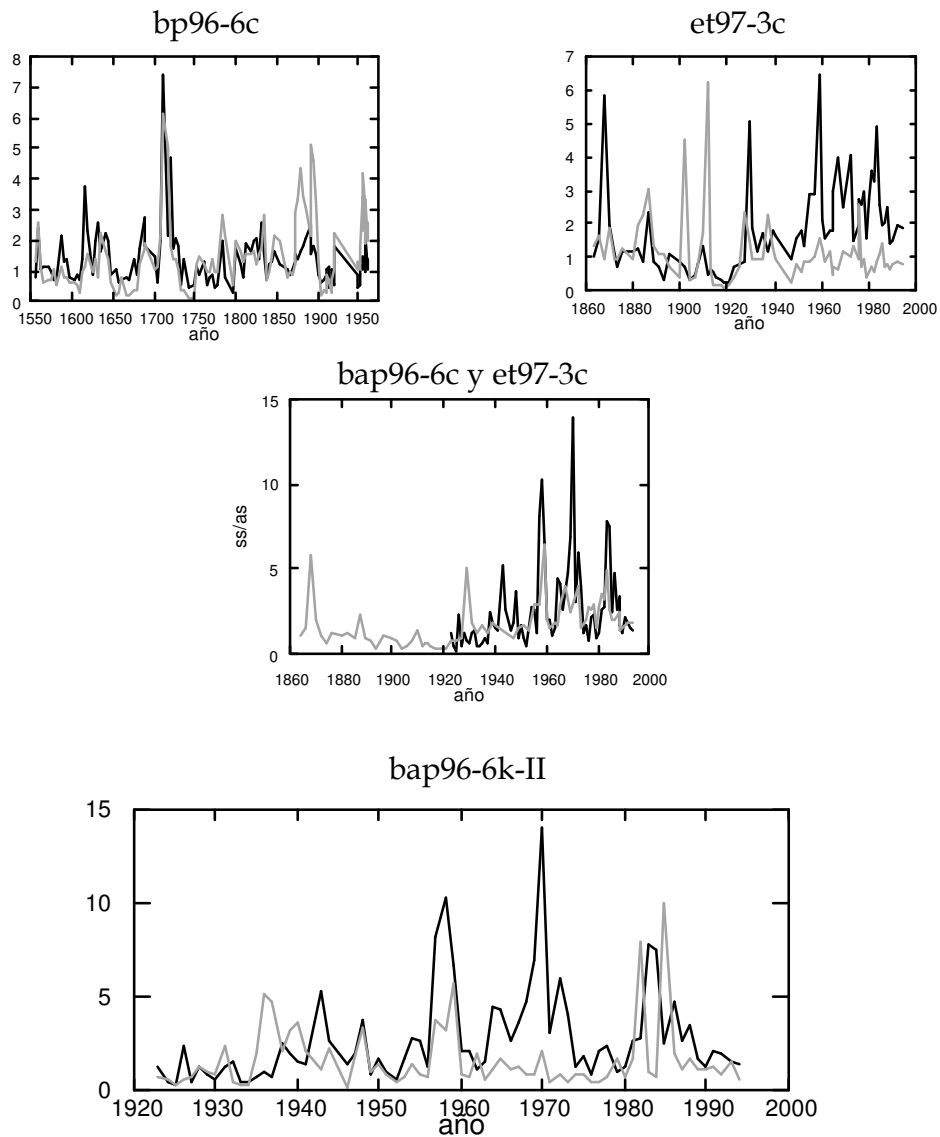


Figura 25. Variación de las proporciones de especies con simbioses superficiales contra especies sin simbioses (línea negra) y la proporción entre especies con simbioses superficiales contra especies con simbioses profundas (línea gris), para los núcleos bap96-6c, et97-3c y bap96-6k-II.

### **Patrones de variabilidad de *G.bulloides***

Esta especie es de las dominantes en todos los núcleos, por lo que la autosimilitud de los núcleos esta regida en gran parte por la abundancia de *G. bulloides* y al patrón opuesto de esta especie con *G. glutinata*.

Se exploró la relación de esta especie con variables ambientales, comparando el porcentaje de *G. bulloides* del núcleo bap96-6c contra las temperaturas de invierno, se utilizaron los meses de diciembre a abril de los datos de COADS con resolución de  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ ,. Se eligieron estos meses por que en ellos hay mediciones casi continuas desde 1926 y sólo se utilizaron aquellos años en que había datos en por lo menos 4 de los 5 meses. Se comparó *G. bulloides* contra la TSM por que la temperatura es un indicador indirecto de la profundidad de la capa de mezcla; temperaturas más frías sugieren una capa de mezcla más somera y por lo tanto una mayor posibilidad de que las aguas que surjan sean más ricas en nutrientes que las aguas provenientes de épocas en las que la TSM es más cálida y hay una capa de mezcla más profunda.

A pesar de que tuvieron un coeficiente de correlación bajo ( $r=0.27$ ), la concordancia entre las series es notable (Fig. 26a). Se hicieron promedios corridos de ambas series y la correlación máxima se encontró al hacer promedios de 5 años ( $r=0.52$ ; Fig. 26b). Con los promedios corridos se disminuye el efecto de la incertidumbre en la cronología.

Al comparar la serie de *G. bulloides* y la serie ss/as se observa que dos de los máximos de la serie ss/as que coinciden con años El Niño ocurren durante los dos periodos en que hay una disminución del porcentaje de *G. bulloides* (Fig. 26c). Con *G. glutinata* no se encontró tanta concordancia con las temperaturas instrumentales de invierno (Fig. 26d).

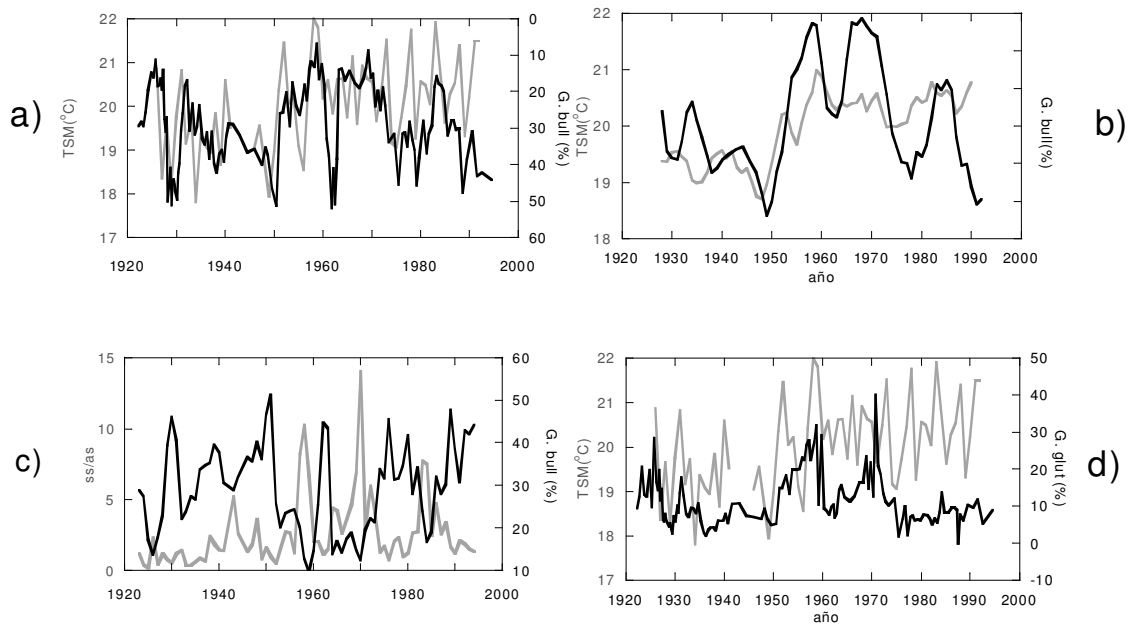


Figura 26. Comparación de la temperatura de invierno en San Lázaro contra a) *G. bulloides*, b) *G. bulloides* pero con promedios corridos de 5 años y d) *G. glutinata*. También se compara c) *G. bulloides* contra la serie ss/as. Para todos los casos TSM y ss/as ( — ) y las especies ( — )

## IV. DISCUSIÓN

### IV.1. Fuentes de error

No fue posible determinar cuantitativamente todas las fuentes de error que influyen en la reconstrucción, sin embargo se intentó determinar hasta donde fue posible la importancia y/o contribución de cada uno de los factores. En los casos en que se carecía de información para determinar el error cuantitativamente se buscaron referencias en la literatura para intentar determinar la importancia relativa.

**Depredación.** Hasta el momento, no hay estudios sobre el efecto de la depredación en las poblaciones de foraminíferos. Se han reportado conchas de foraminíferos en contenidos estomacales ó heces fecales de tunicados, pterópodos, eufáusidos, serguéstidos, salpas, camarones y cangrejos, pero parece ser una alimentación ocasional y no selectiva (Bé y Hutson, 1977), por lo que aún cuando no es posible de cuantificar, se espera que el error producido por la depredación sea pequeño o por lo menos aleatorio. Sin embargo, no es posible descartar que existan interacciones específicas depredador-presa, que produzcan un sesgo en el registro.

**Disolución en la columna de agua.** En foraminíferos, el intervalo de tiempo entre la producción inicial y el hundimiento por debajo de la zona fótica tiene una duración de dos a cinco semanas dependiendo del ciclo de vida y del tamaño del organismo (Berger, 1971; Thunell y Honjo 1981; Sautter y Thunell, 1991). Sin embargo, una vez muertos, suponiendo un hundimiento desde la superficie y considerando una velocidad de hundimiento promedio de 75m/día, llegan al fondo de la cuenca en San Lázaro (540m) en 7.2 días (Fok-Pun y Komar, 1983; Sautter y Thunell, 1991). En tan poco tiempo, es poco probable que ocurran procesos importantes de disolución en la columna de agua. En los sedimentos, la degradación de materia orgánica y por lo tanto la producción de CO<sub>2</sub> es relativamente importante debido a las condiciones subóxicas de la cuenca (0.15-0.35 mlO<sub>2</sub>/l). En San Lázaro hay una alta tasa de aporte de carbono orgánico al sedimento, lo que unido a la baja tasa de ventilación del fondo de la cuenca, propician el abatimiento del oxígeno. Esto también propicia que la fuente de energía de los organismos sea la reducción de los sulfatos, lo que a su vez aumenta la alcalinidad en el medio y con ello una mejor preservación de los carbonatos.

**Tasa de sedimentación.** En San Lázaro la tasa de sedimentación es alta, lo que propicia que los procesos de disolución en el fondo sean relativamente lentos y favorezcan la preservación de los foraminíferos. Lo obtenido en los cuatro núcleos con los índices de disolución IPA e IF, corrobora esta suposición. A pesar de que hubo 2 núcleos con ~25% de las muestras fuera de los intervalos de confianza (ca94-8k y bap96-6k-II), la mayoría de las muestras cayeron fuera del intervalo de confianza del IPA pero no del IF (Figs. 8 y 9). Como se mencionó anteriormente, es posible que el IPA con esta resolución temporal también tenga información ecológica y no sólo de disolución, por lo que no necesariamente todas las muestras estarían mal preservadas.

Para este tipo de registros, es necesario generar índices alternativos que complementen la información del IF y que no sean tan sensibles a los cambios poblacionales como el IPA. Con los datos disponibles se generaron diversos índices (proporciones entre diferentes especies), pero ninguno resultó ser un buen indicador por lo que no mostramos estos datos.

**Advección.** La advección puede ser un factor importante en la modificación de la señal en los sedimentos. En el núcleo bap96-6c, la similitud entre las temperaturas reconstruidas y las instrumentales mejoró cuando se hizo el promedio entre San Lázaro y Punta Eugenia, por lo que es posible que el registro de San Lázaro esté influido fuertemente por la producción en Punta Eugenia, aunque es difícil de determinar la magnitud de este aporte. Punta Eugenia se encuentra aproximadamente a 440Km al norte de San Lázaro y considerando una velocidad promedio de la Corriente de California de 25cm/s (Lynn y Simpson, 1987), los foraminíferos tardarían ~20 días en llegar a San Lázaro. Suponiendo que la advección ocurra desde el momento de su producción, y que por lo tanto se trate de organismos vivos capaces de mantenerse en la columna de agua, y no después de muertos en cuyo caso sólo tardarían 7 días en llegar al fondo, es bastante probable que en 20 días los foraminíferos puedan ser transportados hasta San Lázaro antes de llegar al fondo. Este efecto será mayor en las especies pequeñas, que son más fácilmente transportadas (Parker y Berger, 1971). Las variaciones en el aporte de foraminíferos desde Punta Eugenia, dependerán de las variaciones anuales y estacionales de la intensidad de la corriente. El flujo hacia el ecuador de la Corriente de California es máximo de marzo a mayo y coincide con las surgencias de primavera-verano. Un segundo pico

ocurre entre agosto y septiembre (Lynn y Simpson, 1987), por lo tanto es más probable que los organismos producidos en Punta Eugenia durante estos meses estén más representados en los sedimentos de San Lázaro, en comparación a los producidos en otras épocas del año. El hecho de que la similitud entre series instrumentales y reconstruidas aumente al promediar las temperaturas medidas en San Lázaro y Punta Eugenia (Figs. 15, 19 y 20), nos sugiere que estos procesos de advección están ocurriendo.

Las condiciones subóxicas de la cuenca de San Lázaro inhiben la bioturbación por organismos bentónicos, los cuales podrían generar ruido en la señal al mezclar organismos producidos en diferentes años. De hecho la presencia de láminas en los sedimentos es un buen indicador de esta falta de bioturbación.

**Heterogeneidad cronológica.** De los errores debidos a la metodología, el error producido por la heterogeneidad cronológica de las muestras superficiales es difícil de cuantificar. La edad estimada de las muestras varía entre los últimos 500 a 2000 años (Imbrie y Kipp, 1971; Bé y Hutson, 1977). La pequeña edad de hielo ocurrió entre los años 1640 a 1880 (Ogilvie y Jónsson, 2001), por lo que posiblemente en esa época pudieron prevalecer condiciones ambientales diferentes a las actuales (no análogas). Por lo que al asignarle a esas muestras la temperatura promedio de los últimos 17 años se puede estar incurriendo en un error grave. Sin embargo, es poco probable que haya muestras que representen exclusivamente esta época, por lo que la señal estaría suavizada por la acumulación constante de conchas en el resto del tiempo. En general, se supone que en los últimos 11,000 años han prevalecido condiciones similares al presente, por lo que puede considerarse a las muestras superficiales como buenos análogos, en el sentido de que cuando se formaron la respuesta de los organismos al ambiente era similar (Imbrie y Kipp, 1971; Bé y Hutson, 1977).

**Clasificación de las especies.** En las bases de referencia utilizadas; sitio de red de la NOAA (Prell, 1999), Parker y Berger (1971), Coulbourn *et al.* (1980) y Thompson (1981), no hubo discrepancias importantes en los criterios de clasificación. No se utilizó el grupo de los morfos intermedios entre *N. pachyderma* y *N. dutertrei*, por que no fue reconocida en todos los trabajos ni en los núcleos. En los casos en que se distinguieron las

variedades levógira y dextrógira, ó con y sin saco, estas fueron agrupadas (exceptuando *N. pachyderma* en donde sí se hizo la distinción), ya que ni en el resto de las bases de datos, ni en los núcleos fueron separadas. Por lo que puede considerarse que en la base de datos utilizada y en los núcleos hay coherencia en la asignación de los nombres a las especies.

**Estimación de las proporciones.** En la mayoría de las muestras de referencia se contaron por lo menos 300 testas de foraminífero, y hubo muestras en que se contaron hasta 1500 foraminíferos. Sólo hubo un bajo porcentaje de muestras en las que el número contado fue menor a 300, y correspondieron a muestras monoespecíficas de *N. pachyderma*. La reducción en el error de estimación del porcentaje según el número de testas contadas, se comporta de manera logarítmica y la inflexión de la curva ocurre aproximadamente a los 300 individuos, por arriba de ese número el incremento en la precisión es mínimo, casi asintótico (Dryden, 1931). Esta es la razón por la que en los trabajos recientes se tome la convención de contar mínimo 300 foraminíferos por muestra. En cuanto a los núcleos, la mayoría de las especies tuvo un error de estimación promedio menor al 2% (Tabla IV), por lo que consideramos que la proporción de la señal recuperada contra el error de estimación es aceptable.

**Tamaño del tamiz.** Puede considerarse que con el tamaño del tamiz utilizado tanto en las muestras (150 $\mu$ m) como en los núcleos (125 $\mu$ m), la estimación de las proporciones de las diferentes especies es aceptable. Incluso en las especies pequeñas, la moda está cercana o por arriba de los 125 $\mu$ m (Vincent y Berger, 1981; Peeters *et al.*, 1999). La especie que podría ser más difícil de estimar es *G. quinqueloba*. Esta es la especie más pequeña de todas las utilizadas, y su mayor abundancia ocurre por debajo de los 125 $\mu$ m (Vincent y Berger, 1981).

**Resolución de muestreo.** El intervalo de muestreo utilizado es muy importante tratándose de registros de alta resolución, por que es posible que se mezclen condiciones oceanográficas diferentes, como años Niño y años no-Niño. En estos casos la señal puede perderse, suavizarse o contaminarse. Cambios en la cronoestratigrafía también pueden producir cambios importantes en las estimaciones de diversidad de una muestra. Al utilizar un intervalo de muestreo erróneo o al asignar una edad errónea se puede estar



sub o sobre-estimando la composición específica de una época (Smol, 1981). En núcleos de hielo y oceánicos se ha reportado un periodo de alrededor de 1500 años. Este máximo ocurre precisamente en el periodo predicho si se considera una contaminación debida al ciclo estacional ocasionada por un muestreo y una asignación cronológica de múltiplos enteros del año convencional (365 días). La duración de los ciclos estacionales está acoplada al año solar y este es ligeramente mayor al convencional (365.25 días). El efecto de contaminación en las bajas frecuencias debidos a muestreos incorrectos de las altas frecuencias (por lo menos dos muestreos por periodo), aún cuando en ocasiones es imposible de evitar, debe ser tenido en cuenta en los análisis de núcleos (Wunsch, 2000). Contaminación de este tipo, podría estar ocurriendo en algunas de las muestras del núcleo ca94-8k, y en menor medida en el et97-3c, en los que el muestreo fue hecho a menor resolución que en el bap96-6c, lo que explicaría el hecho de que no sea tan claro el patrón en contra fase de *G. bulloides* y *G. glutinata* (Figura 23).

#### **IV.2. Efectos del método.**

Al utilizar porcentajes de especies en la comparación entre muestras, hay una incertidumbre asociada: cada especie es parcialmente dependiente de las variaciones de las otras especies. Cuando una especie está presente en bajas proporciones, el utilizar porcentajes (efecto de cierre de la matriz), tiene gran influencia en la variación de sus abundancias (Loubre y Qian, 1997).

Además con los porcentajes se pierde información importante: dos condiciones ambientales diferentes pueden generar porcentajes similares aún cuando la abundancia absoluta sea diferente. Por ejemplo, condiciones ambientales subóptimas para las especies pueden generar porcentajes similares a condiciones óptimas, aún cuando la abundancia total en el primer caso sea menor, es suficiente que las especies más abundantes sean las mismas en ambos casos para que se tengan porcentajes parecidos.

En la reconstrucción de temperatura de San Pedro (Fig. 14), las temperaturas de enero y de marzo fueron similares debido en gran parte a que el porcentaje de *G. bulloides*, en ambos meses fue parecido, aún cuando la abundancia total difería en casi un orden de magnitud. Sin embargo, hasta el momento es imposible evitar el problema asociado al

porcentaje, aún cuando este problema es mayor en especies raras o en muestras con gran dominancia de una especie, es necesario tomarlo en cuenta en la consideración de los resultados.

Se ha demostrado que calibraciones regionales dan mejores resultados que calibraciones globales (Le y Shackleton, 1994). La base de referencia utilizada está limitada al Pacífico y hubiera sido deseable que estuviera restringida al Pacífico Nororiental, pero debido a las pocas muestras disponibles en esa zona, ésto no fue posible. Los resultados podrían mejorarse con una mejor cobertura en esta área y con repeticiones entre sitios.

Otro problema del método es que faunas similares pueden provenir de sitios con amplitudes estacionales diferentes. Debido a que las especies tienen una cierta tolerancia a la temperatura, valores cercanos al óptimo de temperatura darán abundancias similares, difíciles de distinguir con el error asociado al porcentaje o a la preservación. Sin embargo pueden estar respondiendo a condiciones de temperatura ambientales ligeramente diferentes. También puede ocurrir que en algunos sitios haya un sesgo estacional de las condiciones oceanográficas representadas en la fauna de los sedimentos. En estos casos sólo parte de los ciclos anuales, los de mayor producción de conchas, estarían preservados en el registro fósil (Loubre, 1982). El hecho de que las muestras de referencia integren intervalos de tiempo largos, puede ayudar a evitar estos sesgos, ya que se espera que a largo plazo se registre la variabilidad del sitio, por suavización de anomalías anuales a centenarias. Sin embargo, podría ayudar a explicar por que las amplitudes reconstruidas son mucho mayores que las observadas. Esto puede ser ocasionado por elegir análogos faunísticos provenientes de sitios con amplitudes estacionales diferentes y excluir análogos con condiciones estacionales similares pero con registro faunístico sesgado hacia una estación, lo cual ocasiona mayor dispersión en la reconstrucción. En reconstrucciones de temperatura de intervalos con mayor duración (glacial-interglacial), este efecto no es tan importante, por que los cambios de temperatura y por lo tanto faunísticos son mayores. Sin embargo, en registros de alta resolución como en este caso este efecto cobra mayor importancia. Por ejemplo, para una de las muestras en la simulación con 13 especies del bap96-6c, las temperaturas fría y cálida correspondientes al mejor análogo fueron  $18.04^{\circ}$  y  $23.45^{\circ}\text{C}$  y para uno de los últimos análogos elegidos fue de  $14.96^{\circ}$  y  $21.21^{\circ}\text{C}$  respectivamente.

Otro factor que influye en la magnitud de las amplitudes reconstruidas, es el bajo número de buenos análogos en la base de referencia. Esta falta de información fuerza a la elección de análogos con condiciones ambientales diferentes (Fig. 17). Cuando existen pequeñas variaciones entre las muestras del núcleo. Esta sensibilidad del método a la distribución de las muestras de referencia, ha sido mostrada por otros autores (Prell, 1985; Crosta *et al.*, 1998) y es uno de sus principales problemas.

Posiblemente el mayor problema en las reconstrucciones es la diferencia en la resolución entre la base de referencia y las muestras de los núcleos. El tiempo integrado en las muestras de referencia (500 a 2000 años) es el adecuado para reconstruir parámetros de igual o mayor escala de tiempo. En reconstrucciones con escalas de tiempo mayores (cientos a miles de años) los resultados con este tipo de aproximación (métodos TAM y MAR) son mejores que con el MIK (TAM: Hutson, 1980; Prell, 1985; Andersson, 1997; Crosta *et al.*, 1998; MAR: Waelbroeck *et al.*, 1998), obteniendo una mayor correlación entre las temperaturas observadas y las reconstruidas (Fig. 10). Con los registros de alta resolución, se pretende reconstruir variaciones de mayor frecuencia (años a décadas), registradas en las muestras de los núcleos, utilizando muestras superficiales con una resolución temporal menor. Esto puede explicar también el hecho de que es posible en algunos casos reconstruir la media instrumental, pero no variaciones del sistema de periodos cortos. Lo ideal sería utilizar datos de flujos obtenidos de trampas de sedimentos, del mismo sitio y de zonas aledañas, en la reconstrucción de registros de alta resolución, para de esta forma tener una base de referencia con mayor resolución que la que se pretende reconstruir.

Otro problema que se detectó en el MAR, es que cuando hay una sobre representación de ciertas zonas en la base de referencia, al generar las muestras virtuales, por el tipo de método utilizado (interpolando en cierto radio), esta sobrerrepresentación se magnifica, lo que genera que la elección de los mejores análogos esté sesgada hacia los ambientes más representados.

En cuanto a las diferentes simulaciones, al utilizar todas las especies y variando la cobertura geográfica en los 2 núcleos en donde se contaron todas las especies (bap96-6c y ca94-8k) hubo una sobreestimación de las temperaturas fría y cálida. La mayoría de las

especies encontradas en San Lázaro con abundancias menores a 5% son típicas de zonas subtropicales y tropicales, y al incluirlas en las simulaciones pueden estar sesgando la reconstrucción a temperaturas más altas que las registradas en la zona (Fig. 15 y 20). Este efecto se maximiza al restringir la base de datos a la zona tropical (simulación con muestras de 30°SN). Al disminuir el número de especies utilizadas (13 y 9 especies) la similitud entre las series reconstruidas y las observadas aumenta para los núcleos bap96-6c y ca94-8k (Fig. 15 y 20), lo que sugiere que el resto de las especies contienen poca información ambiental relevante para la reconstrucción de temperatura.

En el núcleo et97-3c, la temperatura reconstruida es más fría que la observada, posiblemente debido a que en este núcleo la proporción de *G. bulloides* es el doble que la siguiente especie más abundante *N. dutertrei*, una dominancia tan alta no ocurre en el resto de los núcleos. *G. bulloides* es típica de aguas frías de zonas de surgencias, lo que podría explicar la subestimación de temperatura instrumental (Fig. 19). El núcleo bap96-6k-II es el que tiene mayores problemas de disolución, las especies más resistentes a la disolución son las de zonas frías, por lo que posiblemente la subestimación de temperatura en este núcleo sea ocasionada por el sesgo debido a la disolución (Fig. 21). En las simulaciones con especies someras, la serie del núcleo et97-3c fue la que tuvo mejor ajuste en las mediciones. Con el resto de los núcleos las temperaturas fueron sobre o subestimadas y no se encontró algún patrón que pueda explicar este fenómeno (Figs. 14, 19, 20 y 21).

A pesar de que sólo fue reconstruida la media de las temperaturas superficiales en San Lázaro, al calcular los índices de autosimilitud de los núcleos y en la proyección del núcleo bap96-6c en el espacio de la base de referencia, se encontró que hay variabilidad suficiente entre las muestras de los núcleos como para suponer que hay más información registrada en las faunas (Figs. 17 y 18). Esto se corrobora con las series generadas al calcular la proporción entre especies con simbiosis y sin simbiosis, en donde es posible correlacionar los máximos encontrados con eventos El Niño (Fig. 24). Puede ocurrir que sólo en años con condiciones climáticas extremas (años Niño o Niña) hubiera una alta correlación entre la fauna de sedimentos y la temperatura, y la coherencia disminuyera en años donde el forzamiento es débil. Los intervalos de baja coherencia podrían estar disminuyendo factibilidad de reproducir eventos de alta frecuencia (~2-3

años). Sin embargo, esto no excluye la posibilidad de reproducir fluctuaciones de mayor periodo, que en son los más importantes en estudios paleoceanográficos (Crowley *et al.*, 1999).

En los estudios ecológicos de foraminíferos planctónicos, se ha encontrado que localmente las especies responden también a otros factores como productividad primaria, estructura de la columna de agua, luz y profundidad de la capa de mezcla (Thunell y Reynolds, 1984; Reynolds y Thunell, 1985; Deuser y Ross, 1989; Sautter y Thunell, 1989; Sautter y Thunell, 1991; Oberhänsli, 1992; Ortiz *et al.*, 1995; Guptha *et al.*, 1997; Watkins *et al.*, 1996; Niebler *et al.*, 1998; Watkins y Mix, 1998 y Kincaid *et al.*, 2000). Utilizando este tipo de organismos, es posible reconstruir la profundidad de la termoclina (Andreasen y Ravelo, 1997) y la estructura de la columna de agua (Barash y Yushina, 1999). El problema de la respuesta de los foraminíferos a diversos factores, puede ser superado si antes de hacer la reconstrucción se hace una cuidadosa elección de la muestras de referencia utilizadas, que tengan una alta correlación con el parámetro a reconstruir lo que mejoraría la independencia estadística de las propiedades clave en las calibraciones (Oberhänsli *et al.*, 1992; Watkins y Mix, 1998). Si se tiene precaución de calibrar previamente las bases de datos, se amplían las posibilidades del número de parámetros que se pueden reconstruir utilizando datos faunísticos.

### **IV.3. Las especies**

El índice de las especies con simbioses superficiales contra asimioses, resultó ser un buen indicador de condiciones oligotróficas, ya que los máximos coincidieron con años El Niño, este índice puede ser utilizado en el pasado para reconocer variaciones en la productividad del sistema. Sin embargo, es necesaria una mayor exploración de éste índice o de índices similares, para saber si es posible identificar variaciones en la productividad de intensidades menores que los Niños y/o de periodos mayores.

*Globigerina bulloides* es una especie asociada a surgencias, su principal alimento es el zooplancton (Sautter y Thunell, 1991) por lo que, comparada con otras especies que se alimentan de fitoplancton, *G. bulloides* es un indicador indirecto de cambios en la productividad, sin embargo, ésta especie es muy sensible éstas variaciones. Durante años El Niño, en los que el agua que surge es pobre en nutrientes, el porcentaje de *G. bulloides*

disminuye; estos años coinciden con los máximos relativos de la serie ss/as (Fig. 25c). El aumento del porcentaje de *G. bulloides* en años más fríos y su disminución en años más cálidos disminuya (Fig. 25a y b), puede ser consecuencia de que en los años cálidos la termoclina sea más profunda y sea necesaria mayor energía para que el agua rica en nutrientes llegue a superficie.

Aún cuando *G. glutinata* se alimenta directamente de fitoplancton y tiene un patrón inverso a *G. bulloides*, su correlación con la temperatura es menor (Fig. 25d). En el Atlántico Norte, se detectó el aumento de *G. bulloides* asociado a la redistribución en toda la columna de agua de la biomasa de fitoplancton que se encontraba por debajo de la termoclina, ocasionada por los vientos,. En cambio, *G. glutinata* estuvo más asociada a la productividad nueva ocasionada por un aporte de nutrientes y al consiguiente florecimiento de diatomeas (Schiebel *et al.*, 2001). Aún en condiciones de abundancia de alimento (fitoplancton y el consiguiente aumento en zooplancton) ambas especies responden diferente, por lo que tal vez la explicación al patrón de *G. glutinata* sea más debido a causas ecológicas y no físicas; por ejemplo que se alimente de ciertas especies de diatomeas que ocurran en condiciones específicas, en cambio *G. bulloides* su alimento preferencial son los copépodos, que es el taxa más abundante de zooplancton, por lo que podría ser más bien una especie generalista. Otra posible explicación para esta falta de correlación, es que la especie más abundante es *G. bulloides* y cambios en su abundancia pueden generar variaciones la proporción del resto de las especies, por lo que las variaciones en el patrón de *G. glutinata*, pueden ser debidas un efecto de cierre de la matriz.

En la Corriente de California entre San Francisco y Ensenada, se ha encontrado una mayor correlación entre la abundancia del zooplancton y el transporte hacia el sur que a las surgencias locales; en los años en que la CC se debilita y hay menor advección hacia el sur de nutrientes de latitudes altas, la abundancia de zooplancton disminuye y cuando ésta se intensifica ocurre el patrón inverso (Bernal, 1981; Chelton, 1981; McGowan 1989). En términos generales, los dos periodos en los que el porcentaje de *G. bulloides* disminuye coinciden con periodos en los que el transporte hacia el sur fue débil. En la serie reportada por Chelton (1981), el transporte hacia el sur disminuye durante 1951-1954, se recupera durante dos años y vuelve a disminuir notablemente hasta 1960,

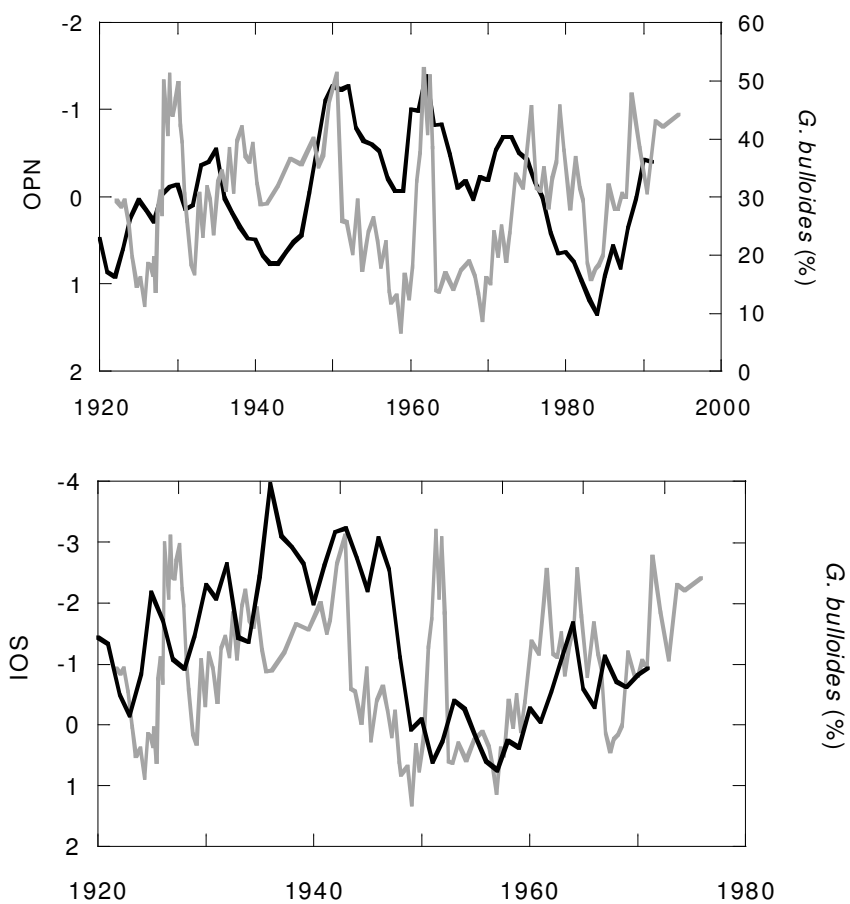


Figura 27. Comparación de la serie de *G. bulloides* ( — ) contra el primer modo del OPN ( — ) y el promedio corrido de 13 años de IOS ( — ).

después se intensifica y de 1965-1970 es muy débil. Estos años coinciden, en general, con los mínimos encontrados en *G. bulloides*, pero los cambios en el porcentaje de esta especie son de mayor magnitud que los cambios en la corriente, por lo que de alguna manera éste efecto se ve magnificado en ésta especie. El transporte hacia el sur tiene buena correlación con la temperatura del mar a 50m; en épocas en que la corriente se intensifica (mayor transporte hacia el sur) la temperatura es menor (por ser agua originaria de latitudes mayores) y viceversa (Chelton, 1981).

También se encontró relación entre la serie de *G. bulloides* y el primer modo del OPN. En general, los máximos de *G. bulloides* ocurren con el OPN negativo que es cuando prevalecen condiciones similares a La Niña en la Corriente de California (Mantua *et al.*, 1997; Gershunov *et al.*, 1999; Figura 27). Sorprendentemente, las variaciones de mayor periodo en la serie de *G. bulloides*, coinciden también con la serie del IOS (índice de oscilación del sur) a la que se le hizo un promedio corrido de 13 años. Contrariamente a lo esperado los periodos negativos del IOS (fase cálida) coinciden con épocas de mayor abundancia de *G. bulloides* (Figura 27). Sin embargo, en la Figura 26c, encontramos que durante años El Niño la abundancia de ésta especie disminuye. Una posible explicación es que en esta serie de promedios corridos de 13 años, los efectos intensos y puntuales de los Niños están suavizados y estamos viendo una variabilidad de mayor periodo, en los que prevalecen las condiciones cálidas pero de menor intensidad. Podría ocurrir que el efecto fuera una mayor intensificación de la Contracorriente Subsuperficial durante los modos cálidos, en los que se transportaran hacia el norte aguas cálidas pero ricas en nutrientes, que posteriormente afloraran a la superficie durante las surgencias. Ésta explicación sólo es válida si no ocurre también un hundimiento de la termoclina, como en condiciones El Niño, en cuyo caso veríamos un empobrecimiento de la corriente.

## V. CONCLUSIONES

Con el MAR fue posible reconstruir la temperatura media de San Lázaro para los últimos 40 años, cuando se utilizaron las 13 especies más abundantes del núcleo bap96-6c, que es el de mejor resolución y el mejor preservado, sin embargo, la amplitud de la serie reconstruida fue mayor a la observada y no se logró reconstruir la variabilidad del sistema.



El método fue más sensible al número y/o tipo de especies utilizadas que a la cobertura geográfica de la base de referencia. Por lo que es importante una cuidadosa selección y calibración de las especies a utilizar dependiendo del parámetro que se quiere reconstruir, esto con el fin de evitar la utilización de especies con baja correlación con la variable (Oberhänsli, 1992).

Cuando en la base de referencia algunas zonas están sobre representadas y otras sub representadas, el método de interpolación objetiva en lugar de suavizar las diferencias maximiza esta sobre representación. Por lo que en casos similares al nuestro es más recomendable no incluir ésta modificación al método TAM.

Debido a que en años normales la variabilidad estacional es similar a la interanual en la Corriente de California, tal vez sólo sea posible reconstruir las condiciones promedio y los eventos fuertemente anómalos (como El Niño y La Niña) y/o de largo plazo, pero no la variabilidad año con año.

Es posible que en los sedimentos de San Lázaro, se encuentre preservada tanto la fauna producida en la cuenca como la generada más al norte en las surgencias de Punta Eugenia. Por lo que en la reconstrucción de la variabilidad térmica de cualquier depósito de alta resolución se ha de tener en cuenta que esta no se refiere a un lugar puntual sino que integra patrones de producción regional.

Para la reconstrucción de temperatura en registros de alta resolución, es recomendable utilizar una base de referencia con mayor resolución a la que se quiere reconstruir (v.g. estacional) y de preferencia de cobertura regional y no de toda la cuenca oceánica.

El índice ss/as resultó ser un buen indicador de años El Niño, debido a que durante estos años prevalecen condiciones oligotróficas y las especies con simbioses están más representadas en las asociaciones de foraminíferos.

*G. bulloides* fue la especie que tuvo la mejor correlación con los cambios de temperatura en invierno, por lo que posiblemente pudiera ser utilizada en el futuro como una especie

indicadora. Sin embargo, son necesarios más estudios para ver si esta correlación se mantiene con el tiempo y es robusta.

## **VI. RECOMENDACIONES**

Es necesario generar un índice de disolución y/o determinar intervalos de confianza adecuados a los registros de alta resolución. El intervalo de confianza del IF, aunque adecuado para muestras superficiales, tal vez es muy amplio para núcleos laminados y el IPA tiene información ecológica que dificulta la identificación de muestras con problemas de disolución.

Tal vez *G. glutinata* pueda ser un indicador independiente que corrobore la información derivada de *G. bulloides*, debido a que muestra un patrón inverso a ésta especie, pero es necesario que el cálculo de los porcentajes de ambas especies sea independiente para evitar los problemas debidos al cierre de la matriz.

Para registros de alta resolución, la reconstrucción de la temperatura o de cualquier variable ambiental aumentaría en precisión y/o resolución, si la base de referencia utilizada tiene datos de trampas de sedimentos (mayor resolución a la que se quiere reconstruir) en lugar de muestras superficiales, y con los datos ambientales medidos durante el mismo periodo de tiempo en que se colectaron las muestras. Y una forma de evitar el problema del cierre de la matriz es utilizar flujos en lugar de porcentajes tanto del núcleo a reconstruir como de la base de datos de referencia. La base de referencia debería de tener cobertura regional e integrar información tanto de años normales como anómalos (años El Niño y La Niña).

## REFERENCIAS

- Andersson, Carin. 1997. Transfer Function vs. Modern Analog Technique for estimating Pliocene sea-surface temperatures based on planktic foraminiferal data, Western Equatorial Pacific Ocean. *Journal of Foraminiferal Research*, 27(2):123-132.
- Andreasen, D. J. y A. C. Ravelo. 1997. Tropical Pacific Ocean thermocline depth reconstructions for the last glacial maximum. *Paleoceanography*, 12(3):395-413.
- Badan, A. 1997. La Corriente de Costa Rica en el Pacífico Mexicano. En: M. F. Lavín (ed.). Contribuciones a la oceanografía física en México. Monografía No. 3, Unión Geofísica Mexicana, 99-112.
- Barash, M. S. y I. G. Yushina. 1999. Reconstruction of the Quaternary Paleoceanographic Parameters: New approaches. *Marine Geology*. 39(2):270-280.
- Bartlein, P., I. Prentice y T. Webb. 1986. Climatic response surfaces from pollen data for some eastern North American taxa. *Journal of Biogeography*., 13(35):57.
- Baumgartner, T. R. y N. Christensen. 1985. Coupling of the Gulf of California to large-scale interannual climatic variability. *Journal of Marine Research*. 43:825-848.
- Bé, A. y W. Hutson. 1977. Ecology of planktonic foraminifera and biogeographic patterns of life and fossil assemblages in the Indian Ocean. *Micropaleontology*, 23(4):369-414.
- Berger, W. 1971. Sedimentation of Planktonic Foraminifera. *Marine Geology*, 11:325-358.
- Berger, W. 1979. Planktonic Foraminifera: Differential production and expatriation off Baja California. *Limnology and Oceanography*, 15(2):183-204.
- Bernal, P.A. 1981. Low-Frequency response of California Current pelagic ecosystem. *CalCOFI Report*, 22:201-213.
- Bijma, J., W. W. Faber y Ch. Hemleben. 1990. Temperature and salinity limits for growth and survival of some planktonic foraminifers in laboratory cultures. *Journal of Foraminiferal Research*, 20:117-127.
- Bijma, J., C. Hemleben, H. Oberhänsli y M. Spindler. 1992. The effects of increased water fertility on tropical spinose planktonic foraminifers in laboratory cultures. *Journal of Foraminiferal Research*, 22(3):242-256.
- Bijma, J., C. Hemleben y K. Wellnitz. 1994. Lunar-influenced carbonate flux of the planktic foraminifer *Globigerinoides sacculifer* (Brady) from the central Red Sea. *Deep-Sea Research I*, 41(3):511-530.

- Caron, D., A. Bé y R. Anderson. 1981. Effects of variations in light intensity on life processes of the planktonic foraminifer *Globigerinoides sacculifer* in laboratory culture. *Journal of Marine Biology Association U.K.*, 62:435-451.
- Coulbourn, W., F. Parker y W. Berger. 1980. Faunal and solution patterns of planktonic foraminifera in surface sediments of the North Pacific. *Marine Micropaleontology*, 5:329-399.
- Crosta, X., J. J. Pichon y L. H. Burckle. 1998. Application of modern analog technique to marine Antarctic diatoms: Reconstruction of maximum sea-ice extent at the Last Glacial Maximum. *Paleoceanography*, 13(3):284-297.
- Crowley, T. J., T. Quinn y W. Hyde. 1999. Validation of coral temperature calibrations. *Paleoceanography*, 14(5):605-615.
- Chelton, D. 1981. Interannual variability of the California Current-Physical factors. *CalCOFI Report*, 22:34-43.
- D'Anglejan. 1967. Origin of marine phosphorites off Baja California, México. *Marine Geology*, 5:15-44.
- Darling K., C. Wade, D. Kroon, A. Lëigh Brown y J. Bijma. 1999. The diversity and distribution of modern planktic foraminiferal small subunit ribosomal RNA genotypes and their potential as tracers of present and past ocean circulations. *Paleoceanography*, 14(1):3-12.
- Deuser. W. G. y E. H. Ross. 1989. Seasonally abundant planktonic foraminifera of the Sargasso Sea: Succession, deep-water fluxes, isotopic compositions, and paleoceanographic implications. *Journal of Foraminiferal Research*, 19(4):268-293.
- Dreyden, A. L. 1931. Accuracy in percentage representation of heavy mineral frequencies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 17(5):233-238.
- Field, D. Y T. R. Baumgartner. 2000. A 900 year stable isotope record of Interdecadal and centennial change from the California Current. *Paleoceanography*, 15(6):695-708.
- Fok-Pun, L. y P. D. Komar. 1983. Settling velocities of planktonic foraminifera: Density variations and shape effects. *Journal of Foraminiferal Research*, 13(1):60-68.
- Gastrich, M. D. y R. Bartha. 1988. Primary Productivity in the planktonic foraminifer *Globigerinoides ruber* (D'Orbigny). *Journal of Foraminiferal Research*, 18(2):137-142.
- Gershunov, A., T. P. Barnett y D. R. Cayan. 1999. North-Pacific Interdecadal Oscillation seen as factor in ENSO-Related North American climate anomalies. *EOS, Transactions*, 80(3):25-30.

- Guptha, S., W. B. Curry, V. Ittekkot y S. Muralinath. 1997. Seasonal variation in the flux of planktic foraminifera: sediment trap results from the Bay of Bengal, Northern Indian Ocean. *Journal of Foraminiferal Research*, 27(1):5-19.
- Hemleben, Ch., M. Spindler y O. R. Anderson. 1989. Modern Planktonic Foraminifera. Springer Verlag, Berlín. pp.363.
- Houston, W. 1980. The Agulhas Current during the Late Pleistocene: Analysis of modern faunal analogs. *Science*, 207:64-66.
- Houston, R. M. y B. T. Huber. 1998. Evidence of photosymbiosis in fossil taxa? Ontogenetic stable isotope trends in some Late Cretaceous planktonic foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 34:29-46.
- Huyer, A. 1983. Coastal upwelling in the California Current system. *Progress in Oceanography*, 12:259-284.
- Imbrie, J. y N. G. Kipp. 1971. A new micropaleontological method for paleoclimatology: Application to a Late Pleistocene Caribbean core. En: K.K. Turekian (ed.). The Late Cenozoic Glacial Ages. Yale University Press, New Haven. pp. 71-181.
- Jørgensen, B., J. Erez, N. P. Revsbech y Y. Cohen. 1985. Symbiotic photosynthesis in a planktonic foraminiferan *Globigerinoides sacculifer* (Brady), studied with microelectrodes. *Limnology and Oceanography*, 30(6):1253-1267.
- Kincaid, E., R. Thunell, J. Le, C. Lange, A. Weinheimer, F. Reid. 2000. Planktonic foraminiferal fluxes in the Santa Barbara Basin: response to seasonal and interannual hydrographic changes. *Deep-Sea Research II*, 47:1157-1176.
- Langer, M. 1999. Origin of foraminifera: conflicting molecular and paleontological data?. *Marine Micropaleontology*, 38:1-5
- Le, J. y N. J. Shackleton. 1994. Reconstructing paleoenvironment by transfer function: Model evaluation with simulated data. *Marine Micropaleontology*, 24:187-199.
- Linsley, B., L. Rein, R. Dunbar y S. Howe. 2000. El Niño Southern Oscillation (ENSO) and decadal-scale climate variability at 10°N in the eastern Pacific from 1893 to 1994: A coral-based reconstruction from Clipperton Atoll. *Paleoceanography*, 15(3):322-335.
- Loubre, P. 1982. Plankton ecology and the Paleooceanographic- Climatic Record. *Quaternary Research*, 17:314-324.
- Loubre, P. y H. Qian. 1997. Reconstructing paleoecology and paleoenvironmental variables using factor analysis and regression: some limitations. *Marine Micropaleontology*, 31:205-217.

- Lynn, R. y J. Simpson. 1987. The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 92(C12), 12,947-12,966.
- Mann, M. y J. Park. 1994. Global-scale modes of surface temperature variability on interannual to century timescales. *Journal of Geophysical Research*, 99(D12):25,819-25,833.
- Mantua, N., S. Hare, Y. Zhang, J. Wallace y R. Francis. 1997. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6):1069-1079.
- McGowan, J.A. 1983. El Niño and biological production in the California Current. *Trop. Ocean. Atmos. Newsl. Univ. of Miami*. 21, 23p.
- McGowan, J. A. 1989. Pelagic ecology and Pacific Climate. *Geophysical Monograph*, 55:141-150.
- Mix, A. C., A. E. Morey, N. G. Pisias y S. W. Hostetler. 1999. Foraminiferal faunal estimates of paleotemperature: Circumventing the no-analog problem yields cool ice age tropics. *Paleoceanography*, 14(3):350-359.
- Niebler, H. S. y R. Gersonde. 1998. A planktic foraminiferal transfer function for the southern South Atlantic Ocean. *Marine Micropaleontology*, 34:213-234.
- Norton, J., D. McLain, R. Brainard y D. Husby. The 1982-1983 El Niño Event off Baja and Alta California and its ocean climate context. En: *El Niño North*. Eds. W. S. Wooster y D. L. Fluharty. Washington Sea Grant Program. Univ. Washington, Seattle, pp. 312.
- Oberhänsli, H., C. Bénier, G. Meinecke, H. Schmidt, R. Schneider y G. Wefer. 1992. Planktonic foraminifers as tracers of ocean currents in the Eastern South Atlantic. *Paleoceanography*, 7(5):607-632.
- Ogilvie, A. E. y T. Jónsson. 2001. 'Little ice age' research: a perspective from Iceland. *Climatic Change*, 48:9-52.
- Olivier Salomé, B. 1998. Fertilidad de la Corriente de California para los últimos 130 años: preservación, calibración y reconstrucción basada en foraminíferos planctónicos en sedimentos laminados de la Cuenca de San Lázaro. Tesis de Maestría en Ecología Marina, CICESE.
- Ortiz, J. D. y A. C. Mix. 1997, Comparison of Imbire-Kipp transfer function and modern analog temperature estimates using sediment trap and core top foraminiferal faunas. *Paleoceanography*, 12(2): 175-190.

- Ortiz, J. D., A. C. Mix y R. W. Collier. 1995. Environmental control of living symbiotic and asymbiotic foraminifera of the California Current. *Paleoceanography*, 10(6):987-1009.
- Parés Sierra, A., M. López y E. Pavía. 1997. Oceanografía del Pacífico Nororiental. En: M. F. Lavín (ed.). Contribuciones a la oceanografía física en México. Monografía No. 3, Unión Geofísica Mexicana, 1-24.
- Parker, F. y W. Berger. 1971. Faunal and solution patterns of planktonic foraminifera in surface sediments of the South Pacific. *Deep-Sea Research*, 18:73-107.
- Peeters, F., E. Ivanova, S. Conan, G. Brummer, G. Ganssen, S. Troelstra y J. van Hinte. 1998. A size analysis of planktic foraminifera from de Arabian Sea. *Marine Micropaleontology*, 36:31-63.
- Pisias, N. G., A. Roelofs y M. Weber. 1997. Radiolarian-based transfer functions for estimating mean surface ocean temperatures and ocean range. *Paleoceanography*, 12:365-379.
- Prell, W. 1985. The Stability of Low-Latitude Sea-Surface Temperatures: An evaluation of the CLIMAP reconstruction with emphasis on the positive SST anomalies. *Report TR025*, U. S. Department of Energy, Washington, D. C.
- Quinn, W., V. Neal y S. Antunez de Mayolo. 1987. El Niño occurrences over the past four and a half centuries. *Journal of Geophysical Research*, 92(C13):14,449-14,461.
- Ravelo, A. C., R. G. Fairbanks y S. G. H. Philander. 1990. Reconstructing Tropical Atlantic hydrography using planktonic foraminifera and an Ocean Model. *Paleoceanography*, 5(3):409-431.
- Reid, J. L., G. I. Roden y J. G. Wyllie. 1958. Studies of the California Current System. *CalCOFI Reports*, 6:27-56.
- Reynolds, L. y R. C. Thunell. 1985. Seasonal succession of planktonic foraminifera in the Subpolar North Pacific. *Journal of Foraminiferal Research*, 15(4):282-301.
- Sautter, L. R. y R. C. Thunell. 1989. Seasonal succession of planktonic foraminifera: Results from a four-year time-series sediment trap experiment in the Northeast Pacific. *Journal of Foraminiferal Research*, 19(4):253-267.
- Sautter, L. R. y R. C. Thunell. 1991. Planktonic foraminiferal response to upwelling and seasonal hydrographic conditions: sediment trap results from San Pedro Basin, Southern California Bight. *Journal of Foraminiferal Research*, 21(4):347-363.

- Schiebel, R., J. Waniek, M. Bork y C. Hemleben. 2001. Planktic foraminiferal production stimulated by chlorophyll redistribution and entrainment of nutrients. *Deep-Sea Research I*, 48:721-740.
- Smol, J. 1981. Problems associated with the use of 'Species diversity' in Paleolimnological studies. *Quaternary Research*, 15:209-212.
- Thompson, P. 1981. Planktonic foraminifera in the Western North Pacific during the past 150 000 years: comparison of modern and fossil assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 35:241-279.
- Thunell, R. y S. Honjo. 1981. Planktonic foraminiferal flux to the deep ocean: sediment trap results from the tropical Atlantic and the central Pacific. *Marine Geology*, 40:237-253.
- Thunell, R. y L. Reynolds. 1984. Sedimentation of planktonic foraminifera: seasonal changes in species flux in the Panama Basin. *Micropaleontology*, 30(3):243-262.
- Vincent, E. y W. Berger. 1981. Planktonic foraminifera and their use in paleoceanography. *The Oceanic Lithosphere*. C. Emiliani (ed.) *The Sea*, John Wiley and Sons, vol.7:1025-1119.
- Waelbroeck, C., L. Labeyrie, J. C. Duplessy, J. Guiot, M. Labracherie, H. Leclaire y J. Duprat. 1998. Improving past sea surface temperature estimates based on planktonic fossil faunas. *Paleoceanography*, 13(3):272-283.
- Watkins, J. M., A. C. Mix y J. Wilson. 1996. Living planktic foraminifera: tracers of circulation and productivity regimes in the central equatorial Pacific. *Deep-Sea Research*, 43(4-6):1257-1282.
- Watkins, J. M., y A. C. Mix. 1998. Testing the effects of tropical temperature, productivity, and mixed-layer depth on foraminiferal transfer functions. *Paleoceanography*, 13(1):96-105.
- Watkins, J. M. y A. C. Mix y J. Wilson. 1998. Living planktic foraminifera in the central tropical Pacific Ocean: Articulating the equatorial ' cold tongue' during La Niña, 1992. *Marine Micropaleontology*, 12(2):124-129.
- Weinheimer, A. L. y D. R. Cayan. 1997. Radiolarian assemblages from Santa Barbara Basin sediments: recent interdecadal variability. *Paleoceanography*, 12(5):658-670.
- Wunsch, C. 2000. On sharp spectral lines in the climate record and the millennial peak. *Paleoceanography*, 15(4):417-424.
- Zhang, Y., J. Wallace y D. S. Battisti. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *Journal of climate*, 10:1004:1020.



Zielinski, U., R. Gersonde, R. Sieger y D. Fütterer. 1998. Quaternary surface water temperature estimations: calibration of a diatom transfer function for the Southern Ocean. *Paleoceanography*, 13(4):365-383.

Apéndice 1. Listado de las especies identificadas en los 4 núcleos y en la base de datos de referencia.

Especies	Base de datos de referencia	bap96-6c	ca94-8k	bap96-8K-II	et97-3c
Globigerina bulloides ( d' Orbigny)	*	*	*	*	**
Neogloboquadrina dutertrei (d' Orbigny)	*	*	*	*	**
Neogloboquadrina pachyderma (Ehrenberg) dextrógira	*	*	*	*	**
Globigerinoides ruber (d'Orbigny) variedad blanca	*	*	*	*	**
Globigerinoides sacculifer (Brady)	*	*	*	*	**
Orbulina universa (d' Orbigny)	*	*	*	*	**
Globigerina quinqueloba (Natland)	*	*	*	*	**
Globigerinita glutinata (Egger)	*	*	*	*	**
Globigerina siphonifera (d'Orbigny)	*	*	*	*	**
Globoturborotalita rubescens (Hofker)	*	*	*	*	*
Globorotalia cultrata (d' Orbigny)	*	*	*	*	*
Globigerina calida (Parker)	*	*	*	*	*
Globorotaloides hexagonus (Natland)	*	*	*	*	*
Pulleniatina obliquiloculata (Parker y Jones)	*	*	*	*	*
Globigerina falconensis (Blow)	*	*	*	*	*
Globoturborotalita tenella (Parker)	*	*	*	*	*
Turborotalita humilis (Brady)	*	*	*	*	*
Turborotalita pumilio (Parker)	*	*	*	*	*
Globigerinita iota (Parker)	*	*	*	*	*
Globoquadrina conglomerata (Schwager)	*	*	*	*	*
Globorotalia hirsuta (d' Orbigny)	*	*	*	*	*
Globorotalia truncatulinoides (d' Orbigny)	*	*	*	*	*
Globorotalia tumida (Brady)	*	*	*	*	*
Globigerina digitata (Brady)	*	*	*	*	*
Globorotalia crotonensis	*	*	*	*	*
Globorotalia inflata (d' Orbigny)	*	*	*	*	*
Globigerina conglobatus (Brady)	*	*	*	*	*
Globigerinita uvula (Ehrenberg)	*	*	*	*	*
Turborotalita clarkei (Rogl y Bolli)	*	*	*	*	*
Globorotalia cavernula	*	*	*	*	*
Globorotalia unguolata (Bermudez)	*	*	*	*	*
Sphaeroidinella dehiscens	*	*	*	*	*
Globigerina adamsi (Banner y Blow)	*	*	*	*	*
Neogloboquadrina pachyderma (Ehrenberg) levógira	*	*	*	*	*
Globigerinoides ruber (d'Orbigny) variedad rosa	*	*	*	*	*
Candeina nitida	*	*	*	*	*
Globorotalia flexuosa	*	*	*	*	*
Globorotalia menardii (Parker, Jones y Brady)	*	*	*	*	*
Globorotalia anfracta (Parker)	*	*	*	*	*
Globorotalia scitula (Brady)	*	*	*	*	*
Globorotalia crassaformis (Galloway y Wissler)	*	*	*	*	*
Globigerinella aequilateralis (Brady)	*	*	*	*	*
Globorotalia trilobus	*	*	*	*	*

\*especies contadas en todas las láminas

\*\* especies contadas en algunas láminas

## Apéndice 2.

Debido a que el error probable de estimación de las proporciones tuvo valores muy altos (1-100%), se exploró que tan robusto era el método a pesar este error. Se hicieron 12 simulaciones con los datos del bap96-6c, en donde a cada dato se le sumó o se le restó el error de estimación correspondiente. Esto se hizo para tres especies (*G. bulloides*, *G. glutinata* y *G. sacculifer*) y se modificaron los valores tanto en la base de referencia como en los datos del núcleo utilizando sólo las 13 especies más abundantes que fue la que reconstrucción que tuvo mayor similitud con las temperaturas instrumentales.

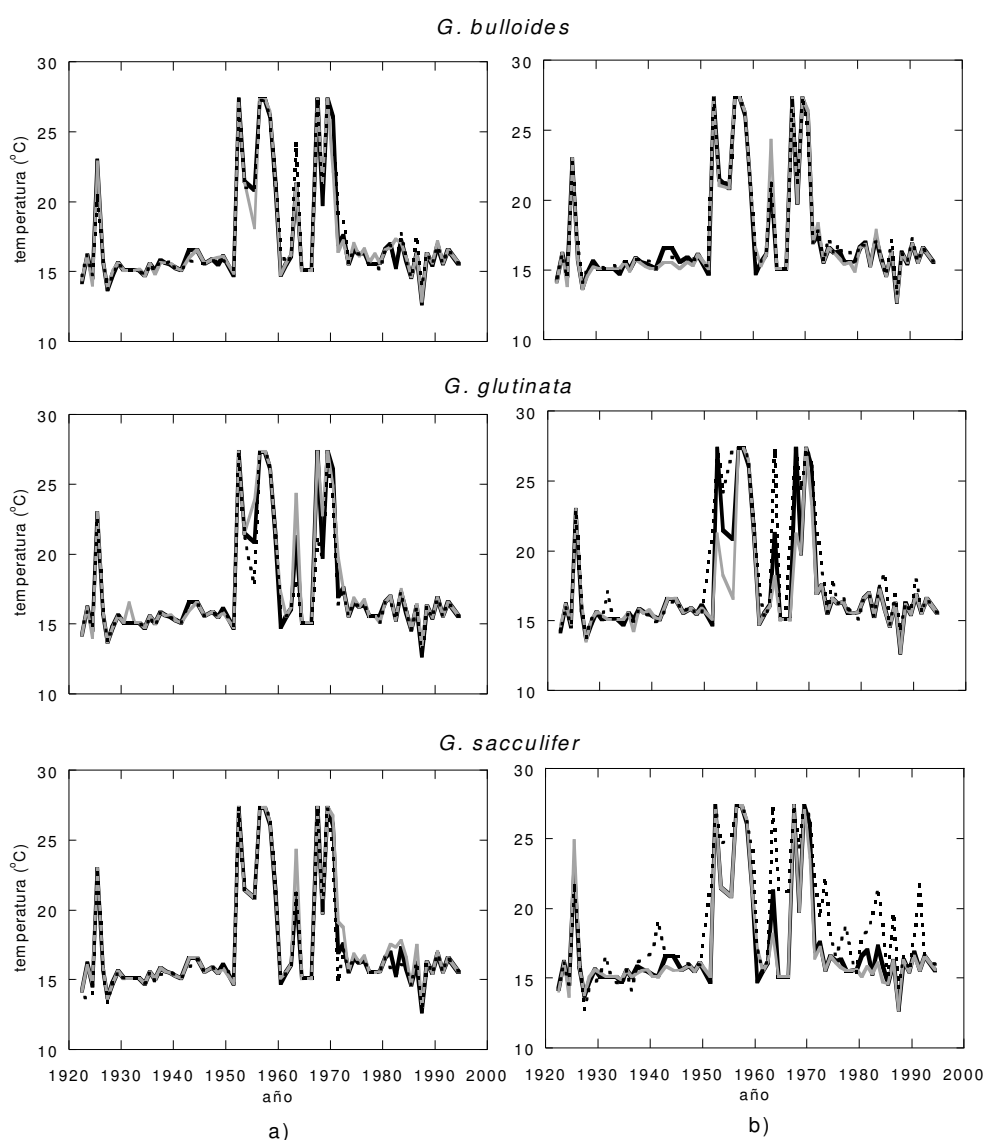


Figura 28. Núcleo bap96-6c. Comparación con la serie de 13 especies contra las series generadas al modificar la proporción de cada especie  $\pm$  el error mínimo de estimación de la proporción. Se modificó la proporción de la especie en a) en los datos del núcleo y b) en la base de referencia. Sólo se grafican las reconstrucciones de la temperatura fría, para las cálidas los resultados fueron similares.