

RESULTADOS PALEOCEANOGRÁFICOS DEDUCIDOS A PARTIR DEL CONTENIDO EN DIATOMEAS DE LOS SEDIMENTOS SILICEOS MIOCENOS («MORONITAS») EN LA CUENCA DEL GUADALQUIVIR

M.^a J. López García *

RESUMEN

Durante una parte del Mioceno (Langhiense medio-Tortonense medio) tuvo lugar en la actual Cuenca del Guadalquivir la formación de sedimentos con diatomeas («moronitas»). Esta sedimentación fue consecuencia de la formación de un área de alta productividad biogénica ocasionada por corrientes ascensionales costeras (coastal upwelling).

La existencia en esa época de una circulación de tipo estuarino en la zona, permite suponer que los nutrientes procedían, inicialmente, de las aguas profundas atlánticas, cuya circulación estaba ligada a situaciones climáticas globales.

Las corrientes ascensionales costeras no constituyen por sí solas un mecanismo efectivo para llevar a la superficie aguas oceánicas profundas. Por ello debió tener lugar un mecanismo hidrológico complejo que llevara, en primer lugar, las aguas oceánicas profundas a niveles intermedios. Desde allí esas aguas ricas en nutrientes serían traídas a la superficie por las corrientes ascensionales, desde niveles de agua subsuperficiales.

Es necesario considerar otros factores locales ligados a la morfología de la cuenca, compleja y variable a lo largo del tiempo, para comprender la localización de los antiguos centros de afloramiento de las corrientes ascensionales costeras.

Los resultados cuantitativos de las especies más abundantes (grupo *Crucidentacula nicobarica* + *Crucidentacula punctata*, *Denticulopsis hustedtii*, *Thalassionema nitzschioides*, *Thalassionema nitzschioides* var. *parva* y el grupo *Thalassiothrix longissima* + *Thalassionema bacillaris*) y de la cantidad del componente total biosilíceo en las rocas ha permitido reconocer una evolución en el medio que se refiere a variaciones en la temperatura de las aguas superficiales y a la intensidad del afloramiento a lo largo del tiempo.

La interpretación de los gráficos del Análisis de los Componentes Principales da un significado paleoecológico a los dos primeros nuevos componentes o factores, diferenciándose situaciones de distinta «productividad» y que son consecuencia de la posición e intensidad de los antiguos centros de afloramiento de las corrientes ascensionales en la zona.

Palabras clave: Cuenca del Guadalquivir, Mioceno, diatomeas, corrientes ascensionales oceánicas, «upwelling».

ABSTRACT

During a part of the Miocene (Langhian middle-middle Tortonian) diatom bearing sediments, named «moronitas», were deposited in the Guadalquivir Basin. This sedimentation was the result of a highly productive coastal upwelling regime in the area.

At this time, the oceanic circulation in the «north-betic strait» was under estuarine conditions and the nutrients came from deep Atlantic currents. The intensity of the circulation of deep water in oceans is usually related to global climatic changes.

Coastal upwelling is not an effective process to bring up nutrient-rich deep waters to the surface. A complex hydrological process must occur to bring up deep water firstly to intermediate levels and then the nutrients may be upwelled from subsurface waters.

It is necessary to take into account local factors related to the basin morphology and the changes that it has gone through in order to place the ancient upwelling centers in the basin.

* Departamento de Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC). J. Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid.

The percentages of the most common species (*Crucidentricula nicobarica* + *Crucidentricula punctata*, *Denticulopsis hustedtii*, *Thalassionema nitzschioides*, *Thalassionema nitzschioides* var. *parva*, *Thalassiothrix longissima* + *Thalassionema bacillaris*) and the biosilicic global content of the rocks has made possible the recognition of a change in the temperature of superficial waters and upwelling intensity in time.

The interpretation of the A.P.C. graphics gives a paleoecological significance to the A.P.C. first two factors. In this way different productivity situations in response to different locations and intensity of the ancient upwelling centers in time have been identified.

Key words: Spain, Guadalquivir Basin, Miocene, diatoms, coastal upwelling.

Introducción

Hace más de un siglo se definieron con el nombre de «moronitas» los sedimentos miocenos de la Cuenca del Guadalquivir que incluyen gran cantidad de diatomeas además de otros microfósiles silíceos (espículas de esponjas, silicoflagelados y algunos radiolarios). También contienen microfósiles calcáreos, básicamente microforaminíferos y nanoplancton. Tales rocas tomaron el nombre de la localidad de Morón de la Frontera.

En relación con su contenido en diatomeas los estudios realizados anteriormente en estas rocas son escasos (Azpeitia, 1911; Berggren *et al.*, 1976; Monjanel, 1987) y están enfocados fundamentalmente a la taxonomía y a la datación bioestratigráfica.

Recientemente, López García (1993) y López García y Bustillo (1994) han realizado un estudio bioestratigráfico de las diatomeas en toda la Cuenca del Guadalquivir y han determinado en ella tres Episodios en los sedimentos con diatomeas, cuya edad se basa en la biozonación de Barron (1985 a y b), teniendo en cuenta las modificaciones de Monjanel (1987).

El Episodio inferior representa el comienzo de la sedimentación diatomítica y comprende desde el Langhiense medio al Serravaliense inferior (biozonas *Coscinodiscus peplum* y *Coscinodiscus lewisianus*).

Después de un período de tiempo en el que no se ha registrado sedimentación de diatomeas y que corresponde a parte del Serravaliense (ausencia de la biozona *Coscinodiscus gigas* var. *diorama*), se inició el Episodio medio que comprende desde la parte superior del Serravaliense al Tortoniense inferior (biozonas *Craspedodiscus coscinodiscus* y *Actinocyclus moronensis*).

El Episodio superior (biozona *Thalassiosira yabei*) corresponde al Tortoniense medio, tiene una extensión más local y se caracteriza por cambios en la mineralogía y contenido en diatomeas de las rocas (López García, 1993; López García y Bustillo, 1994). Sin embargo, no representa una interrupción en la formación de sedimentos diatomíticos, como sucedía entre los dos primeros.

Las asociaciones de diatomeas en estas rocas están constituidas fundamentalmente por especies planctónicas de aguas templado-cálidas, con predominio de *Thalassionema nitzschioides* Grunow en Van Heurck, *Thalassionema bacillaris* (Heiden) Kolbe y *Thalassiothrix longissima* Cleve y Grunow en Cleve y Möller, que aparecen preferentemente en áreas marinas con corrientes ascensionales. Son abundantes también las diatomeas pertenecientes a los géneros *Denticulopsis* (Simonsen) Akiba y Yanagisawa, *Crucidentricula* Akiba y Yanagisawa, *Coscinodiscus* Ehrenberg y *Thalassiosira* Cleve. El componente bentónico es escaso y diversificado, sin embargo en los afloramientos del Episodio superior, adquiere una mayor representatividad el género *Delphineis* Andrews (López García, 1993).

En este trabajo se aborda un nuevo aspecto del estudio del contenido en diatomeas de las «moronitas». En concreto se realiza un estudio cuantitativo de aquellas especies de diatomeas o grupos de especies con suficiente representatividad para un estudio estadístico.

Su finalidad es perfilar las características y variaciones de la proliferación de diatomeas en los sedimentos miocenos de la Cuenca del Guadalquivir.

Materiales y métodos

A partir de un muestreo inicial en 93 afloramientos (López García, 1993), se han seleccionado 20 puntos para realizar el estudio cuantitativo del contenido en diatomeas de estas rocas (fig. 1). Se ha tenido en cuenta para ello la mejor representatividad de estas facies, la calidad de los afloramientos y que los tres Episodios de sedimentos diatomíticos estuvieran representados.

La cantidad global de diatomeas se ha calculado por dos métodos diferentes. Uno de ellos ha consistido en la determinación de la sílice biogénica total, considerando las diatomeas como los microfósiles silíceos dominantes (Brewster, 1983; López García y Bustillo, 1994).

El segundo método para calcular la cantidad global de diatomeas ha sido el contaje. Las rocas con diatomeas se trataron con ClH y H₂O₂, y posteriormente las diatomeas se montaron con Naphrax en lámina delgada (Gasse, 1975).

Debido a la gran fragmentación de las valvas se han tenido en cuenta las indicaciones de Gersonde (1980) y se han considerado de una forma especial los fragmentos de diatomeas del género *Coscinodiscus*, ya que al ser generalmente valvas gran-

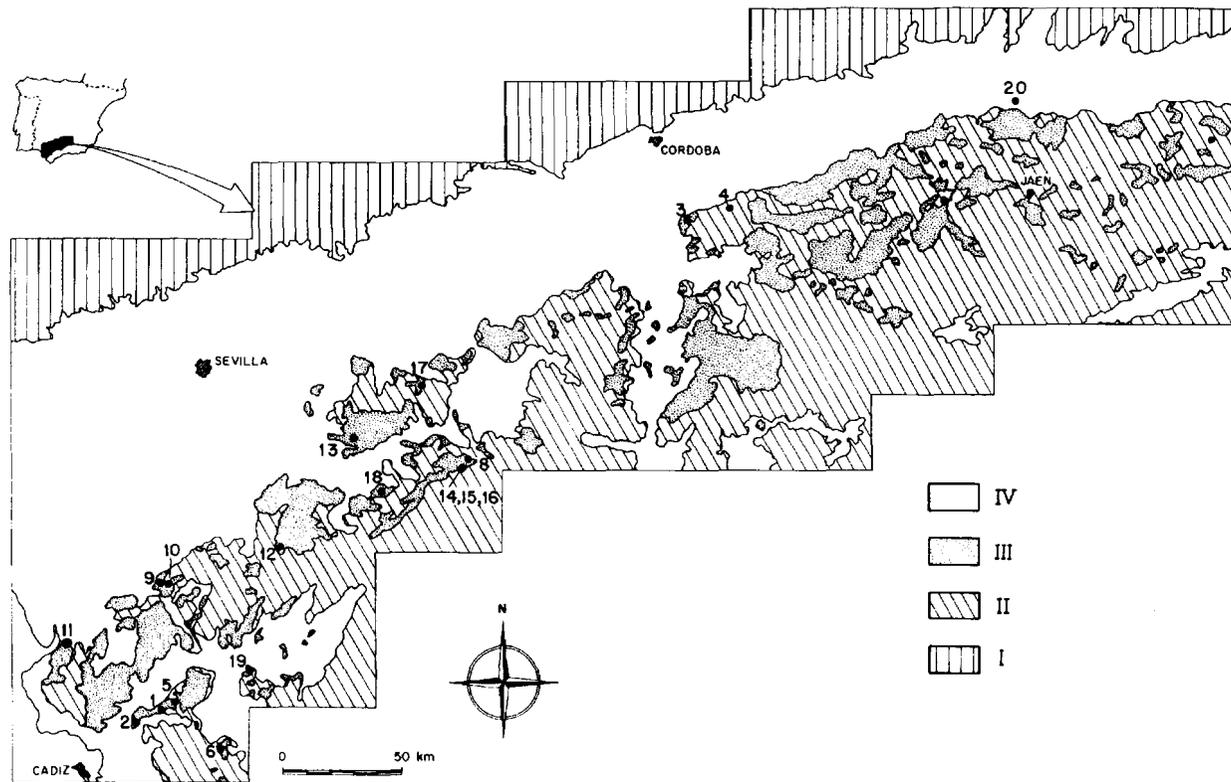


Fig. 1.—Mapa geológico de la región estudiada basado en la cartografía geológica MAGNA (López García, 1993; López García y Bustillo, 1994) y situación de los afloramientos.

I) Macizo Hespérico, II) Cordilleras Béticas incluidos los olitostromas del valle del Guadalquivir, III) Materiales del Langhiense-Tortonense medio y que pueden estar implicados en los olitostromas como matriz, IV) Materiales del Tortonense superior, Mesiniense, Plioceno y Cuaternario.

Puntos estudiados: 1: Lomopardo; 2: Cerro de la Liebre; 3: Santa Cruz; 4: Mudapelos; 5: Jerez; 6: Paterna; 7: Martos; 8: Cañada Real; 9: Lebrija-1; 10: Lebrija-2; 11: Sanlúcar; 12: Palmar; 13: Fuente de la Grana; 14: Canteras de Santa Ana-1; 15: Canteras de Santa Ana-2; 16: Canteras de Santa Ana-3; 17: Marchena; 18: Morón; 19: Arcos; 20: Cerro de las Albarizas.

des están muy troceadas y era difícil su valoración dentro del conjunto de las diatomeas. Por ello, se fueron anotando los fragmentos como partes, hasta reconstruir una superficie aproximada a la de la valva completa y entonces se contaba una valva.

De los contajes de 200 a 400 valvas de diatomeas por muestra, en los que se han incluido también las espículas de esponja y los silicoflagelados, se ha obtenido la proporción relativa de cada especie. Unos cálculos sencillos (Gersonde *op. cit.*) han permitido también establecer el número total de frústulas de diatomeas por cada gramo de sedimento.

Para el tratamiento de la información se ha aplicado el Análisis de los Componentes Principales (A.C.P.) (Mora *et al.*, 1989), en el que se representan gráficamente muestras y variables. A partir de los dos primeros nuevos componentes principales o factores, se ha reinterpretado la variabilidad de la población en términos de fenómenos o procesos naturales para explicar en cierta forma la complejidad del conjunto estudiado.

Descripción de los afloramientos

Las margas con diatomeas son rocas muy blandas y deleznales que se presentan masivas o intercaladas con otras litologías, principalmente biocalcareniticas. Evidencian una lamina-

ción interna tanto más importante cuanto mayor es su contenido en diatomeas, al ser éstas fundamentalmente filamentosas. En ocasiones se distinguen capas de distinta naturaleza y coloración, generalmente milimétricas que se repiten en ritmos complejos (estructura bandeada, López García, 1993).

De la biozona *Cestodiscus peplum* se han estudiado los afloramientos de Lomopardo (n.º 1) y Cerro de la Liebre (n.º 2). Lomopardo (n.º 1) es un perfil de unos 5,5 m de margas con diatomeas con estructura masiva y bandeada. Cerro de la Liebre (n.º 2) corresponde a una zona brechificada.

Pertencientes a la biozona *Coscinodiscus lewisianus* se han estudiado los afloramientos de Santa Cruz (n.º 3), Mudapelos (n.º 4), Jerez (n.º 5) y Paterna (n.º 6). En Santa Cruz (n.º 3) se han recogido las muestras de aspecto laminado y también masivo a lo largo del afloramiento, sin poder constituir columna; Mudapelos (n.º 4) es un pequeño afloramiento de rocas masivas y compactas; Jerez (n.º 5) es un afloramiento de 1 m de potencia de margas con aspecto laminado y Paterna (n.º 6) es un perfil de 12 m de potencia con margas de aspecto laminado y a veces bandeado y también constituyendo pequeños bancos.

De la biozona *Craspedodiscus coscinodiscus* no se ha estudiado ningún afloramiento debido a la mala calidad de los mismos.

En la biozona *Actinocyclus moronensis* se han distinguido dos partes: una inferior con *Actinocyclus ingens* y otra superior sin dicha diatomea (López García, 1993). Esta diferenciación

se ha establecido para separar el período de tiempo que representa la biozona, ya que es la más frecuente actualmente en la superficie de la Cuenca del Guadalquivir.

Atribuidos a la parte *inferior* de la biozona *Actinocyclus moronensis* se han estudiado los afloramientos de Martos (n.º 7), Cañada Real (n.º 8), Lebrija-2 (n.º 9), Lebrija-1 (n.º 10), Sanlúcar (n.º 11) y Palmar (n.º 12). Martos (n.º 7) corresponde a dos perfiles de 18,5 y 30 m, respectivamente, de margas con diatomeas de estructura laminada y bandeada con intercalaciones biocalcareónicas finas de hasta 15 cm de espesor; Cañada Real (n.º 8) corresponde a una cantera de unos 5 m de margas con diatomeas de estructura laminada y bandeada con intercalaciones biocalcareónicas finas de hasta 15 cm de espesor; Lebrija-1 (n.º 9) tampoco se puede levantar perfil y las muestras tienen aspecto masivo; Lebrija-2 (n.º 10) es un perfil de margas con diatomeas de aspecto laminado y masivo, que presentan tectonización a techo; Sanlúcar (n.º 11) constituye un corte de 4,5 m de potencia de margas con diatomeas laminadas que en un pequeño tramo del techo están además bandeadas; en Palmar (n.º 12) no se puede levantar perfil y las muestras tienen aspecto masivo y con una cierta edafización.

De la parte *superior* de la biozona *Actinocyclus moronensis* se han estudiado los puntos Fuente de la Grana (n.º 13), Canteras de Santa Ana-1 (n.º 14), Canteras de Santa Ana-2 (n.º 15), Canteras de Santa Ana-3 (n.º 16), Marchena (n.º 17), Morón (n.º 18) y Arcos (n.º 19). Fuente de la Grana (n.º 13) es un perfil de unos 17 m de margas con diatomeas en bancos de 3-4 m., la estructura es masiva en todas ellas, pero se distinguen por su distinta competencia unos bancos de otros, los más compactos presentan además evidente bioturbación; en Canteras de Santa Ana-1 (n.º 14) las margas, masivas, tenían equinodermos y briozoos y estratificación cruzada tenue. Canteras de Santa Ana-2 (n.º 15) es una excavación cercana a la anterior donde se observan bivalvos; Canteras de Santa Ana-3 (n.º 16) es una cantera cercana a las dos anteriores que representa un nivel inferior a los otros; Marchena (n.º 17) es una cantera con tramos masivos y laminados pero en la que no se puede levantar perfil, se observa una espectacular bioturbación; en Morón (n.º 18) se toman muestras de aspecto masivo de muro a techo; en Arcos (n.º 19) se recogen muestras masivas, laminadas y bandeadas sin poderse levantar un perfil.

De la *biozona Thalassiosira yabei* se ha estudiado el afloramiento de Cerro de las Albarizas (n.º 20). Cerro de las Albarizas (n.º 20) es un perfil de 3,5 m de potencia de margas de aspecto laminado con intercalaciones de arenas finas y un tramo más compacto a techo.

Contexto paleogeográfico y paleoceanográfico

La Cuenca del Guadalquivir constituyó durante el Mioceno un amplio estrecho denominado «nordbético» por Colom y Gamundi (1951). Junto al estrecho «rifeño», constituían los lugares de intercambio entre las aguas atlánticas y mediterráneas. Sanz de Galdeano y Vera (1992) consideran que el «estrecho nordbético» se formó en una región con un sustrato constituido por corteza continental que estaba siendo deformada. La región comenzó por ser en un primer momento un «fore deep basin» hasta evolucionar, con migración de los depocentros, a un «foreland basin». En este último fueron cayendo abundantes materiales olitostromicos que fueron rellenando la cuenca.

Desde una perspectiva paleoceanográfica hay que señalar que la abundante presencia de diatomeas en

la zona, así como el tipo de sus asociaciones es indicativa en la zona de estudio, durante parte del Mioceno, de un área de alta productividad.

En el océano Atlántico, Monjanel (1987) relaciona la sedimentación biosilíceas de los bordes occidentales de Europa y Africa durante el Mioceno, con períodos en los que la circulación de las aguas profundas era más intensa debido a cambios climáticos globales que originaron la formación y variaciones posteriores de las aguas profundas en el Atlántico norte. Pero desde el final del Mioceno superior, la sedimentación biosilíceas en el Atlántico norte se localiza exclusivamente en las altas latitudes o cercana a la dorsal y Monjanel (*op. cit.*) atribuye el hecho a la interrupción de los intercambios circum-ecuatoriales entre el Atlántico y el Pacífico.

Dentro ya de un contexto regional, varios autores (Vernaud-Grazzini, 1985; Benson *et al.*, 1991; Sierro y Flores, 1992) señalan que el intercambio de las aguas oceánicas entre el Atlántico y el Mediterráneo era entonces distinta a la actual. Mientras ahora las aguas superficiales atlánticas entran en el Mediterráneo para compensar el exceso de salinidad por evaporación existente en este mar, durante el Mioceno las aguas de superficie salían del Mediterráneo hacia el Atlántico.

Pero no hay acuerdo en el momento en que tuvo lugar la inversión de la circulación oceánica en esta zona. Vernaud-Grazzini (1985) lo sitúa en el límite Langhiense-Serravaliense, Benson *et al.* (1991) suponen que la inversión tuvo lugar entre el Tortoniense superior y el Messiniense inferior y Sierro y Flores (1992) piensan que el modelo de circulación oceánica antiguo era el que permitía la formación de un área de alta productividad en esta zona y que por lo tanto el cambio de circulación debió estar relacionado con la terminación de la sedimentación diatomítica, pero no mencionan una edad concreta.

Resultados del análisis cuantitativo de especies

De la observación directa de los datos (tabla 1) se deducen los siguientes resultados:

1. Los valores del ópalo biogénico y el número global de diatomeas no son siempre comparables pues entre ambos está interfiriendo siempre el tamaño y forma de las diatomeas.

El ópalo biogénico alcanza valores entre 10 y 70 % del total de la roca, sin embargo, los valores entre el 20 y el 45 % son los más frecuentes. En el número global de diatomeas se alcanzan valores de hasta 200 millones de diatomeas/gr de sedimento, pero generalmente los valores están por debajo de los 100 millones. La mayoría de los afloramientos

Tabla 1.—Cantidad de ópalo y millones de diatomeas/gr de sedimento. Abundancia relativa de las especies y grupos de diatomeas, espículas de esponja y silicoflagelados

Muestras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pat-1	41,50	51,75	41,90	0,00	11,80	10,90	9,90	24,90	0,00	0,60
Pat-2c	48,00	158,91	41,40	0,00	4,20	5,80	33,60	14,70	0,30	0,00
Pat-2o	45,00	94,50	27,30	0,00	3,30	11,40	44,10	13,50	0,40	0,00
Pat-4c	34,50	148,11	41,00	0,00	6,60	8,70	5,60	37,80	0,00	0,30
Pat-4o	33,00	182,83	52,70	0,00	9,10	9,90	2,90	24,40	0,80	0,20
Pat-5	31,50	27,60	47,20	0,00	7,40	11,50	7,80	25,80	0,00	0,30
Pat-6	26,00	21,66	28,80	0,00	8,90	9,40	5,30	46,70	0,00	0,90
Pat-7	33,50	20,19	13,50	0,00	9,00	7,50	6,40	61,30	0,40	1,90
Pat-8	30,00	14,91	16,40	0,00	14,60	14,20	5,20	48,80	0,00	0,80
Pat-9	27,00	21,86	30,30	0,00	5,30	13,50	1,80	47,60	0,60	0,90
Pt-1	28,00	8,80	0,00	0,00	12,80	11,60	4,10	69,20	1,70	0,60
Pt-2	28,50	16,80	1,90	0,00	19,10	7,60	0,80	67,20	2,30	1,10
Pt-3	17,50	7,00	0,50	0,00	11,60	3,40	0,00	81,90	2,60	0,00
SC-2	20,00	41,46	9,70	15,50	23,20	1,60	12,20	24,60	1,60	11,60
SC-3	27,00	24,58	2,90	36,40	17,20	1,30	4,60	32,10	1,30	4,20
SC-4	24,00	47,25	8,90	38,40	13,00	0,20	5,30	28,30	1,40	4,50
SC-5	30,00	47,70	2,40	41,50	15,60	0,30	13,20	25,10	0,80	1,10
SC-6	30,50	69,30	13,90	37,30	17,20	3,60	9,10	14,50	0,80	3,60
SC-7	29,50	165,86	25,90	41,90	9,10	1,60	5,90	12,90	0,50	2,20
SC-8	24,50	83,31	11,30	28,10	24,10	0,00	12,10	18,50	1,40	4,50
Mu-1	16,00	51,30	13,70	14,70	23,60	9,10	11,10	23,30	0,10	4,40
Je-3	9,00	9,71	5,30	5,30	20,50	3,30	12,60	38,50	4,60	9,90
Je-4	11,50	21,70	2,70	1,30	19,60	2,20	9,30	46,70	4,00	14,20
Pa-1	27,00	8,23	11,20	8,80	14,80	6,50	3,60	46,30	4,40	4,40
Pa-2	20,50	14,79	18,90	13,70	22,60	9,60	3,00	27,80	2,20	2,20
Pa-3	23,50	34,82	16,90	23,20	17,70	3,20	2,30	30,30	3,20	3,20
Pa-4	20,50	32,70	12,90	15,20	24,60	8,40	3,90	32,40	1,30	1,30
Pa-5	19,00	37,09	17,20	13,50	18,90	7,40	2,80	33,00	3,60	3,60
Pa-6	30,50	24,67	17,70	14,40	28,70	3,90	7,30	25,60	1,20	1,20
Pa-7	18,50	18,11	17,90	9,80	24,60	2,10	6,30	28,90	5,20	5,20
Pa-8	21,50	16,39	18,80	19,40	6,20	20,00	3,20	36,00	3,20	3,20
Pa-9	22,00	41,14	21,00	22,40	17,40	3,80	6,80	25,80	1,40	1,40
Mar-1c	55,00	86,46	0,00	31,20	14,50	4,10	20,80	27,50	0,40	1,50
Mar-1o	39,50	14,85	1,70	23,80	28,10	7,80	8,50	24,90	5,20	0,00
Mar-3c	70,50	144,54	0,40	37,40	15,00	3,00	23,60	19,50	0,40	0,70
Mar-3o	42,50	97,44	0,00	22,10	23,30	7,90	18,70	20,90	1,70	5,40
Mar-5c	28,00	50,40	0,00	24,50	18,40	10,20	22,90	21,00	2,00	1,00
Mar-5o	11,00	16,07	0,00	33,60	15,20	3,60	14,80	26,40	4,40	2,00
Mar-6	38,50	209,82	0,00	42,60	18,10	8,10	13,00	15,10	0,70	2,40
Mar-8	24,00	33,17	0,00	5,80	28,00	3,50	16,30	37,20	4,60	4,60
Mar-9	60,00	147,08	0,00	28,30	15,70	19,60	20,30	12,30	1,00	2,80
Mar-11c	65,00	67,88	0,00	23,30	14,80	9,10	30,70	20,90	0,60	0,60
Mar-11o	47,00	165,60	0,00	17,10	38,60	12,20	11,90	17,50	0,80	1,90
Mar-12	43,00	148,88	0,00	19,90	33,40	6,20	17,90	17,50	1,00	4,10
CR-1	31,50	45,32	1,70	19,10	21,30	20,80	6,40	27,00	1,20	2,50
CR-2	29,50	37,41	1,50	20,10	26,30	19,60	3,00	26,50	2,00	1,00
CR-3	64,00	43,65	0,00	5,00	26,80	9,30	37,10	19,80	1,00	1,00
CR-4c	31,00	13,11	0,00	34,30	18,60	4,90	26,00	11,80	2,40	2,00
CR-4o	10,50	18,24	0,00	38,30	17,60	6,60	26,40	8,10	0,80	2,20
CR-5	45,00	65,25	0,00	25,60	16,20	18,20	21,70	5,30	1,00	2,00
LB-1	22,50	32,14	0,00	7,00	25,00	10,50	8,50	35,00	5,00	9,00
LB-2	19,00	19,77	0,80	5,70	30,90	12,20	8,90	39,10	0,80	1,60
LB-3	24,50	23,78	0,00	6,80	33,80	5,40	6,80	40,80	0,00	6,40
LB-5	2,00	22,66	0,00	12,00	31,90	7,10	7,80	34,20	4,20	2,80
LB-6	28,50	28,60	0,00	22,50	18,50	15,70	4,50	30,00	3,20	5,60
LT-1	32,50	85,18	0,00	14,30	45,30	12,10	4,50	20,10	0,70	3,00
LT-2	26,00	42,75	0,70	6,00	39,10	7,50	1,50	38,50	0,70	6,00
LT-3	26,00	40,82	0,00	4,70	42,50	7,10	7,10	32,30	1,60	4,70

Tabla 1.—Cantidad de ópalo y millones de diatomeas/gr de sedimento. Abundancia relativa de las especies y grupos de diatomeas, espículas de esponja y silicoflagelados (Continuación)

Muestras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LT-4	22,50	20,57	0,80	7,00	17,20	7,80	1,60	51,60	7,00	7,80
SL-2	38,00	65,38	0,30	19,20	25,90	9,70	10,90	30,20	0,60	3,50
SL-3	22,00	43,58	0,40	12,80	27,40	9,70	10,60	32,00	1,30	6,20
SL-4	29,50	91,41	0,40	32,10	30,40	8,40	7,20	16,40	0,00	5,10
SL-5	29,50	90,64	0,00	27,60	26,40	6,40	6,80	25,70	1,60	5,50
SL-6	29,00	49,76	0,00	7,09	32,50	8,50	7,70	40,60	0,70	3,00
SL-7	36,50	40,11	1,00	9,10	31,20	10,50	9,10	33,80	1,90	3,40
SL-8	60,00	45,13	0,80	4,30	35,90	22,20	31,60	3,60	0,80	0,80
SL-9	84,50	32,91	0,00	1,20	9,30	5,80	75,60	6,90	1,20	0,00
SL-10	53,00	70,97	0,50	5,30	34,70	24,10	21,90	10,30	0,30	2,70
SL-11	43,50	35,48	0,00	15,20	19,60	15,20	41,30	5,40	1,10	2,20
SL-12	22,00	45,26	0,60	11,40	30,70	16,20	17,60	22,90	0,60	6,00
SL-13	49,50	54,62	0,00	9,60	34,50	9,60	26,00	16,30	0,60	3,40
Pal-1	22,50	24,68	0,00	8,30	29,20	2,10	6,20	23,00	12,50	18,70
Pal-2	18,00	14,95	0,00	0,00	32,20	5,40	9,70	67,70	8,60	11,80
Pal-4	29,00	16,46	0,00	15,60	9,40	3,10	3,10	32,90	23,40	12,50
Pal-5	22,50	10,16	0,00	8,80	17,70	0,00	2,50	39,40	15,20	16,40
Pal-6	23,50	23,14	0,00	4,40	30,50	5,50	5,50	30,30	10,50	13,30
Pal-7	25,00	22,18	0,00	5,80	30,00	8,70	5,10	25,80	13,00	11,60
Pal-8	26,50	34,46	0,00	6,70	26,90	6,00	4,50	29,80	11,20	14,90
FG-3	30,00	87,13	0,00	2,40	51,00	10,70	5,20	19,60	0,40	10,70
FG-5	29,00	99,90	0,00	12,70	34,00	22,00	2,30	23,60	1,90	3,50
FG-8	24,00	38,96	0,00	8,90	31,70	6,90	2,00	33,60	4,00	12,90
N-1	26,50	51,10	0,00	20,40	20,40	18,10	3,00	26,40	6,80	4,90
N-2	26,50	104,14	0,00	19,20	30,70	15,20	2,20	20,90	3,70	8,10
N-3	23,50	42,43	0,00	20,40	26,80	12,70	1,80	26,50	10,00	1,80
N-5	29,00	62,30	0,00	31,90	32,80	9,90	1,50	16,80	3,70	3,40
N-6	26,00	52,76	0,00	30,50	27,80	13,90	2,10	25,70	0,00	0,00
N-7	25,00	44,19	0,00	26,20	24,40	13,80	2,20	22,10	9,10	2,20
NM-2	33,50	90,20	0,00	15,40	31,20	3,90	3,00	40,10	0,40	6,00
NM-4	23,00	35,70	0,00	4,90	40,50	10,80	5,40	31,90	3,80	2,70
NM-5	34,00	149,00	0,00	16,10	33,20	24,90	2,30	15,80	0,50	7,20
NM-6	27,00	44,30	0,00	8,40	39,50	18,40	3,70	23,70	0,50	5,80
NM-7	37,50	132,70	0,00	3,50	14,50	4,60	68,00	4,20	0,00	5,20
Mo-5	25,50	24,00	0,00	7,60	30,30	3,80	7,60	35,00	9,20	6,50
Mo-6	27,00	41,00	0,00	10,60	48,10	4,40	5,00	27,00	1,20	3,70
Mo-7	22,50	47,00	0,00	17,00	29,10	17,00	3,30	23,30	1,50	8,80
Mo-8	29,00	48,00	0,00	12,90	32,20	9,70	5,40	31,30	1,50	7,00
AR-1	25,50	27,64	0,00	11,20	27,40	8,80	2,80	36,40	8,80	4,60
AR-2	26,50	49,11	0,00	2,60	53,90	7,30	2,60	27,80	4,20	1,60
AR-3	25,00	20,31	0,00	3,20	26,60	0,00	1,30	56,90	8,20	3,80
AR-4	27,50	39,10	0,00	9,20	31,60	5,90	5,30	39,40	6,60	2,00
AR-5	30,00	23,65	0,00	9,20	42,40	1,10	1,10	36,40	3,30	6,50
AR-6	31,00	35,74	0,00	8,60	38,80	4,30	3,60	36,20	2,80	5,70
AR-7	26,50	40,88	0,00	5,00	35,80	4,40	4,40	44,80	3,10	2,50
Al-1	27,00	75,21	0,00	0,40	48,20	2,80	0,10	54,50	1,70	1,30
Al-2	29,50	52,55	0,00	0,30	43,70	4,60	2,70	42,60	4,30	1,80
Al-3	45,00	97,97	0,00	0,00	53,30	8,10	1,00	33,70	0,80	3,10
Al-4	42,00	107,68	0,00	0,00	59,90	9,50	3,40	26,00	0,30	0,90
Al-5	31,00	50,14	0,00	0,00	50,20	4,90	3,30	38,70	0,10	2,80
Al-6	16,00	14,14	0,00	0,00	27,30	0,00	8,20	59,10	1,80	3,60

Variables: 1: % ópalo, 2: Mill. diat./g sedi., 3: *Crucidentricula nicobarica* + *Crucidentricula punctata*, 4: *Denticulopsis hustedtii*, 5: *Thalassionema nitzschioides*, 6: *Thalassionema nitzschioides* var. *parva*, 7: *Thalassiothrix longissima* + *Thalassionema bacillaris*, 8: otras diatomeas, 9: espículas de esponja, 10: silicoflagelados. Muestras: Lomopardo (Pat), Cerro de la Liebre (Pt), Santa Cruz (SC), Mudapelos (Mu), Jerez (Je), Paterna (Pa), Martos (Mar), Cañada Real (CR), Lebrija-1 (LB), Lebrija-2 (LT), Sanlúcar (SL), Palmar (Pal), Fuente de la Grana (FG), Canteras de Santa Ana (N), Marchena (NM), Morón (Mo), Arcos (AR), Cerro de las Albarizas (Al).

suelen presentar distinta cantidad de diatomeas. Los afloramientos más ricos en ellas son Lomopardo (n.º 1), Santa Cruz (n.º 3), Martos (n.º 7), Fuente de la Grana (n.º 13), Marchena (n.º 17) y Cerro de las Albarizas (n.º 20). Aunque generalmente las muestras de cada afloramiento contienen distinta cantidad de diatomeas, ésta es bastante uniforme en Paterna (n.º 6), Cañada Real (n.º 8), Palmar (n.º 12), Morón (n.º 18) y Arcos (n.º 19).

2. *Thalassionema nitzschioides* Grunow en Van Heurck suele ser la diatomea más frecuente en las muestras y puede alcanzar hasta el 60 % del total de ellas. En el Episodio inferior alcanza valores entre el 10-20 %. En la parte inferior del Episodio medio los valores medios son del 20-30 %. En la parte superior del Episodio medio se observan cifras del 40-50 %. En el Episodio superior los porcentajes oscilan entre el 40-50 %.

3. *Thalassionema nitzschioides* var. *parva* Heiden y Kolbe está presente en proporciones generalmente inferiores al 10 %. Los afloramientos donde es más abundante son los de Canteras de Santa Ana (n.ºs 14, 15 y 16), Cañada Real (n.º 8) y Marchena (n.º 17).

4. *Denticulopsis hustedtii* (Simonsen y Kanaya) Simonsen presenta unos valores siempre inferiores al 43 % y queda excluida de la biozona *Cestodiscus peplum* y de la biozona *Thalassiosira yabei*. Es muy frecuente en los afloramientos de Santa Cruz (n.º 3), Martos (n.º 7) y Cañada Real (n.º 8) con valores superiores al 38 % pero en el resto de los afloramientos su presencia varía entre un 5 % y un máximo de 12-25 %.

5. El grupo *Thalassiothrix longissima* Cleve y Grunow en Cleve y Möller + *Thalassionema bacillaris* (Heiden) Kolbe presenta valores generalmente inferiores al 10 %, sin embargo suele ser más abundante en las capas claras de las rocas con estructura bandeada.

6. El grupo *Crucidentricula nicobarica* (Grunow) Akiba y Yanagisawa + *Crucidentricula punctata* (Schrader) Akiba y Yanagisawa sólo está presente en las muestras del Episodio inferior. En los afloramientos pertenecientes a la biozona *Cestodiscus peplum* alcanza valores de hasta el 47 % mientras que en los de la biozona *Coscinodiscus lewisianus* no supera el 25 %, siendo los valores más frecuentes del 15-20 %.

7. El resto de las diatomeas están en proporciones inferiores al 5 % y muy frecuentemente incluso son del 2-3 %, por lo tanto no son útiles para el estudio cuantitativo. Además, el género *Coscinodiscus*, que incluye varias especies distintas, debido a los problemas que presentaba su cuantificación, tampoco pudo ser incluido en el estudio estadístico, a pesar de ser frecuente.

8. Las esporas de diatomeas presentan en estas muestras una gran diversidad aunque se han valorado en los contajes globalmente. A pesar de ello, sólo ocasionalmente superan el 5 %.

9. Otros microfósiles silíceos, como las espículas de esponja y los silicoflagelados se han valorado también. Su presencia en estas rocas es siempre inferior al 10 %. Además, se sospecha que son más abundantes en aquellas muestras con indicios de edafización, ya que tienen unas estructuras silíceas más robustas que las diatomeas, lo que se pone particularmente en evidencia en el afloramiento de Palmar (n.º 12).

Resultados del análisis de los componentes principales

Para este estudio se han tenido en cuenta las siguientes variables: 1) cantidad de ópalo A, 2) cantidad global de diatomeas, 3) proporción de *Thalassionema nitzschioides*, 4) proporción de *Thalassionema nitzschioides* var. *parva*, 5) proporción del grupo *Thalassiothrix longissima* + *Thalassionema bacillaris*, 6) proporción de *Denticulopsis hustedtii* y 7) proporción del grupo *Crucidentricula nicobarica* + *Crucidentricula punctata*.

La cantidad global de diatomeas y de ópalo son los dos valores mediante los que se ha expresado la paleoproductividad s.l., término que es reflejo de la intensidad y eficacia del afloramiento. Hay que advertir que estrictamente la cantidad de diatomeas por gramo de sedimento debe ir referida a un intervalo de tiempo factible de expresarse mediante alguna característica litológica y/o estructural de la roca para representar fielmente la productividad y en este caso, no ha sido generalmente posible al tratarse de rocas muy homogéneas.

El significado paleoecológico de los factores que se obtienen en el Análisis de los Componentes Principales (A.C.P.) se deduce de la posición de las variables (especies) respecto a los mismos. Para ello, es necesario establecer previamente las características paleoecológicas de las especies que intervienen en el A.C.P.

Thalassionema nitzschioides Grunow en Van Heurck 1881 es una especie que puede ser propia de aguas tropicales y subtropicales (Kanaya y Koizumi, 1966; Burckle, 1978; Sancetta, 1979; Gardette, 1979), pero también se la considera cosmopolita (Gardette, 1979; Schrader y Schuette, 1981; Barron y Keller, 1983) y se ha encontrado asociada a aguas ricas en nutrientes y a corrientes ascensionales (Burckle, 1978; Barron y Keller, 1983). Aunque inicialmente fue descubierta en los bordes continentales, posteriormente se ha observado también en

medios totalmente oceánicos (Smayda, 1958). Schuette y Schrader (1981) citan floraciones de esta especie en primavera y verano.

Thalassionema nitzschioides var. *parva* Heiden y Kolbe 1938 se considera propia de aguas más cálidas, ecuatoriales, que la especie tipo (Kolbe, 1955; Gersonde, 1980; Schrader y Schuette, 1981) y se la encuentra también asociada a corrientes ascensionales (Schrader y Schuette, 1979; Schuette y Schrader, 1981).

Thalassionema bacillaris (Heiden) Kolbe 1955 es una especie no muy frecuente que tiende a ser considerada como cosmopolita (Gersonde, 1980; Simonsen, 1974). Es citada en latitudes moderadamente altas (Hustedt, 1958) pero también en latitudes bajas (Simonsen, 1974; Gersonde, 1980). Hasle y Mendiola (1976) la encuentran en regiones propias de corrientes ascensionales costeras (NO de África y Perú). En estas muestras está asociada con *Thalassiothrix longissima*.

Thalassiothrix longissima Cleve y Grunow en Cleve y Möller 1878 es una especie propia de aguas frías o templado-frías (Hustedt, 1959; Schrader, 1982; Gardette, 1979) y se dice que puede presentarse en grandes masas (Hustedt, 1959) y en floraciones (blooms) (Crawford y Schrader, 1982).

Denticulopsis hustedtii (Simonsen y Kanaya) Simonsen 1979 es una especie propia de latitudes medias y altas (Barron, 1985; Akiba y Yanagisawa, 1985), no está especialmente relacionada con corrientes marinas ascensionales y su desaparición está condicionada por la temperatura del agua, desaparece antes si ésta es más cálida (Barron, 1985 a y b).

El grupo *Crucidenticula nicobarica* (Grunow) Akiba y Yanagisawa (1985) + *Crucidenticula punctata* (Schrader) Akiba y Yanagisawa (1985) comprende dos especies difíciles de distinguir (López García, 1993) sobre las que no hay datos paleoecológicos concretos. Ambas especies deben ser planctónicas de aguas cálidas o templado-cálidas como Akiba y Yanagisawa (1985) atribuyen a todo el género.

El Análisis de los Componentes Principales se ha resuelto mediante varios gráficos. Generalmente se han reunido las muestras de los puntos de muestreo pertenecientes a una misma zona bioestratigráfica de diatomeas, pero en los muy representativos y con elevado número de muestras, como es el caso de Martos (n.º 1), se ha realizado un gráfico exclusivamente de ese punto. Además, *Thalassionema nitzschioides* y *Thalassionema nitzschioides* var. *parva* se han considerado unas veces como una única variable y otras como dos, para determinar la influencia de cada una sobre la posición del resto de las variables y del conjunto de muestras.

En la mayor parte de los gráficos (figs. 2, 3, 4 y 5) el Factor 1 viene a representar la distinta riqueza en diatomeas/ópalo de las muestras. Es decir, es un

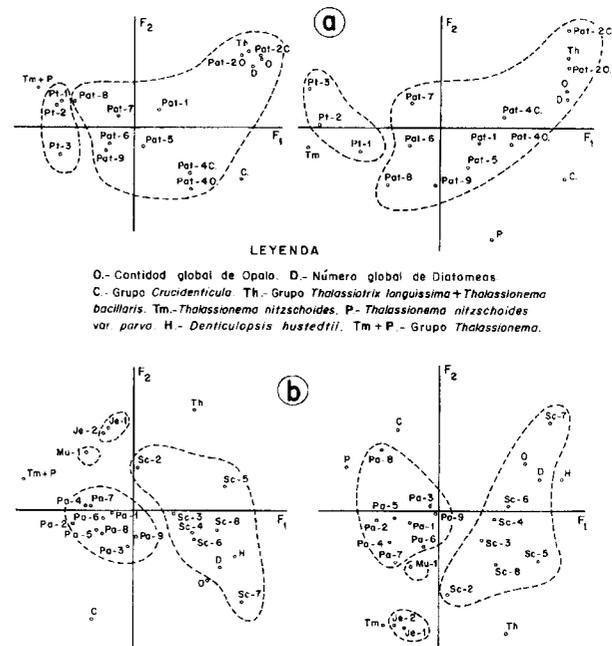


Fig. 2.—A.C.P. de los afloramientos atribuidos a la biozona *Cestodiscus peplum*, a: Lomopardo (Pat) y Cerro de la Liebre (Pt) y b: biozona *Coscinodiscus lewisianus*, Santa Cruz (SC), Mudapelos (Mu), Jerez (Je) y Paterna (Pa).

factor respecto al que dada la situación de cada muestra y su datación bioestratigráfica, se puede deducir una paleoproduktividad s.l.

Las especies proporcionalmente más abundantes cuando la cantidad de diatomeas es grande son *Denticulopsis hustedtii* y el grupo *Thalassiothrix longissima Thalassionema bacillaris* y presentan variaciones en cuanto a su posición en los gráficos del A.C.P. Sin embargo, *Thalassionema nitzschioides* es proporcionalmente más abundante siempre en las rocas con menor número de diatomeas.

El Factor 2 viene a poner de manifiesto las variaciones que sufría la temperatura del agua en que se desarrollaban las diatomeas. Las especies de aguas más cálidas están representadas por el grupo *Crucidenticula* y *Thalassionema nitzschioides* var. *parva* y las de aguas más frías por el grupo *Thalassiothrix longissima Thalassionema bacillaris* y *Denticulopsis hustedtii*. Ni el género *Crucidenticula* ni *Denticulopsis hustedtii* se relacionan con corrientes marinas ascensionales. Sin embargo si lo están *Thalassiothrix longissima Thalassionema nitzschioides* y *Thalassionema nitzschioides* var. *parva*. La posición en los distintos gráficos de estas variables no siempre es la misma.

En las muestras de los puntos de estudio atribuidos a la biozona *Cestodiscus peplum* (fig. 2-c) no

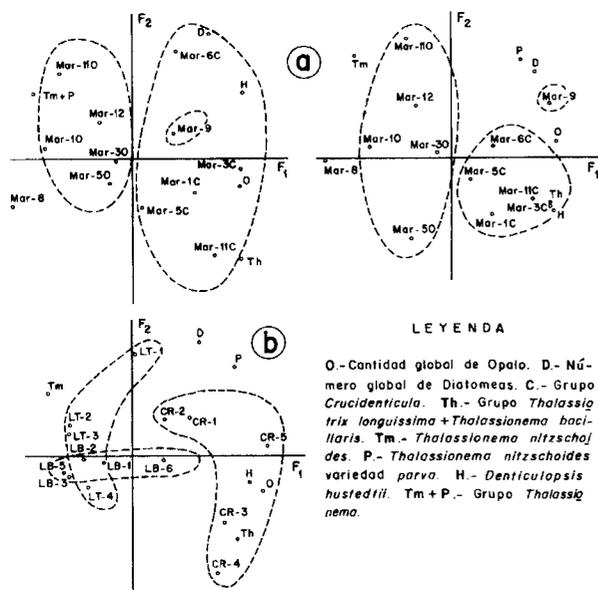


Fig. 3.—A. C. P. de los afloramientos atribuidos a la parte inferior de la biozona *Actinocyclus moronensis*, a: Martos (Mar) y b: Cañada Real (CR), Lebrija-1 (LB) y Lebrija-2 (LT).

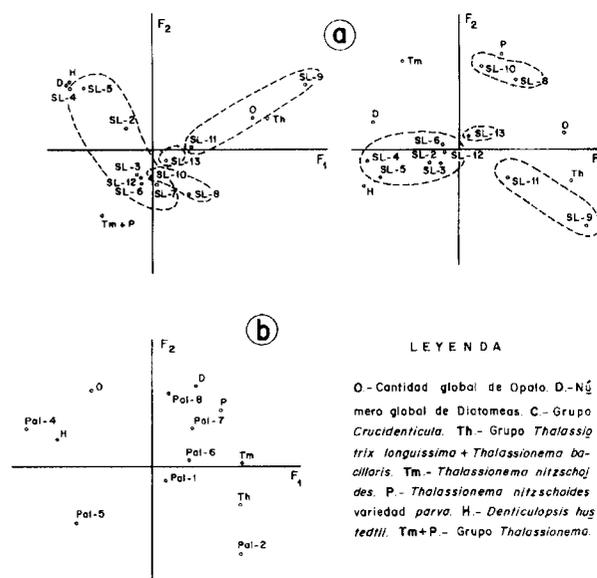


Fig. 4.—A. C. P. de los puntos pertenecientes a la parte inferior de la biozona *Actinocyclus moronensis*, a: Sanlúcar (SL) y b: Palmar (Pal).

hay *Denticulopsis hustedtii* y el grupo *Thalassiothrix longissima* + *Thalassionema bacillaris* es abundante en las muestras más ricas en diatomeas que además tienen una estructura en capas. La distribución de las diatomeas en las distintas capas es compleja y puede ser dominante el grupo *Crucidentricula nicobarica* + *Crucidentricula punctata* o bien el grupo *Thalassiothrix longissima* + *Thalassionema bacillaris* según las muestras, que presentan entre sí mayores diferencias de las que hay entre los distintos tipos de capas de una misma muestra.

A partir de los afloramientos atribuidos a la biozona *Coscinodiscus lewisianus* (fig. 2-b) ya está presente *Denticulopsis hustedtii*. En los gráficos del A.C.P. esta especie es la que más contribuye al aumento de la cantidad de diatomeas en las muestras.

En Martos (n.º 7) (fig. 3-a), perteneciente a la parte inferior de la biozona *Actinocyclus moronensis*, el grupo *Crucidentricula* desaparece. Las especies de aguas frías, grupo *Thalassiothrix longissima* + *Thalassionema bacillaris* y *Denticulopsis hustedtii*, son alternativamente más abundantes en las muestras con mayor cantidad de ópalo, pero la cantidad de diatomeas es lógicamente mayor cuando la especie más abundante es *Denticulopsis hustedtii*, debido a su pequeño tamaño. Sin embargo, cuando *Thalassionema nitzschoides* var. *parva* es representada como variable independiente (fig. 3-a), es la especie más relacionada al número global de diato-

meas. Todo esto refleja que la cantidad de ópalo de una muestra es consecuencia de la abundancia del grupo *Thalassiothrix longissima* + *Thalassionema bacillaris* y/o *Denticulopsis hustedtii* pero que la cantidad relativa de *Thalassionema nitzschoides* var. *parva* aumenta también con la cantidad global de diatomeas.

Una situación similar a la anterior, se refleja en el gráfico con las muestras de los puntos de estudio Cañada Real (n.º 8), Lebrija-1 (n.º 9) y Lebrija-2 (n.º 10) (fig. 3-b), pertenecientes también a la parte inferior de la biozona *Actinocyclus moronensis*.

Sin embargo, en Sanlúcar (n.º 11), perteneciente a la misma biozona (fig. 4-a), la significación de los factores en el gráfico del A.C.P. es distinta. A lo largo del Factor 1 se distinguen dos grupos de muestras, unas donde la cantidad de diatomeas está relacionada con *Denticulopsis hustedtii* y otras donde la abundancia y tipo de diatomeas es diferente dando lugar a una estructura en capas. En alguna de estas capas se acumula el grupo *Thalassiothrix longissima* + *Thalassionema bacillaris*, mientras en las otras capas *Thalassionema nitzschoides* var. *parva* es relativamente más importante.

La disposición de muestras y variables de Palmar (fig. 4-b), no es representativa. Su situación está distorsionada por la edafización que presenta el afloramiento.

Las muestras de los puntos de estudio pertenecientes a la parte superior de la biozona *Actinocy-*

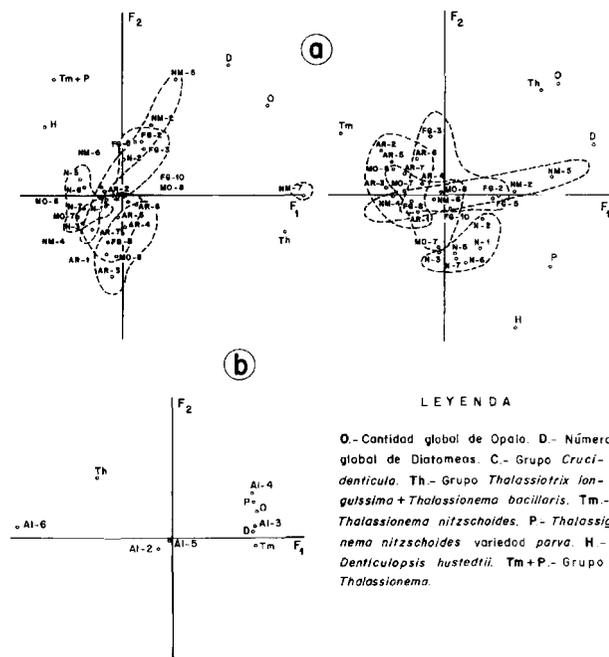


Fig. 5.—A. C. P. de los afloramientos atribuidos, a: la parte superior de la biozona *Actinocyclus moronensis*: Fuente de la Grana (FG), Canteras de Santa Ana (N), Marchena (NM), Morón (Mo) y Arcos (AR) y b: la biozona *Thalassiosira yabei*: Cerro de las Albarizas (AI).

clus moronensis (fig. 5-a) presentan pocas variaciones entre sí respecto al contenido en diatomeas, están muy agrupadas en el gráfico. Destacan solamente algunas muestras de Marchena (n.º 17), por su mayor contenido en ópalo que es reflejo de una mayor participación del grupo *Thalassiothrix longissima* + *Thalassionema bacillaris* y las muestras de las Canteras de Santa Ana (n.ºs 14, 15 y 16), con una mayor incidencia de *Denticulopsis hustedtii* y *Thalassionema nitzschoides* var. *parva*.

Por último, las muestras de Cerro de las Albarizas (n.º 20) pertenecientes a la biozona *Thalassiosira yabei* (fig. 5-b) no contienen *Denticulopsis hustedtii*. En consecuencia, la mayor abundancia de diatomeas y ópalo está relacionada con la cantidad de *Thalassionema nitzschoides* y *Thalassionema nitzschoides* var. *parva*. En este afloramiento, el grupo *Thalassiothrix longissima* + *Thalassionema bacillaris* es muy escaso.

Discusión

La producción primaria de plancton depende de la existencia en la superficie de los océanos de los elementos nutritivos adecuados para su desarrollo y

son esenciales unas condiciones hidrográficas específicas para su presencia en abundantes cantidades (Zeitzschel, 1978). Los movimientos verticales ascendentes del agua oceánica («upwelling») son los que controlan la producción del fitoplancton. Hay y Brock (1992) describen hasta 10 mecanismos hidrográficos distintos que pueden ocasionar el ascenso vertical de las aguas subsuperficiales.

Por la latitud y situación paleogeográfica del área de estudio parece lo más lógico suponer que el causante de la formación de sedimentos con diatomeas en el «estrecho nordbético» durante parte del Mioceno fueron las corrientes ascensionales marinas costeras (coastal upwelling). Pero éstas sólo desplazan la capa superficial del agua (10-100 m) (Ekman, 1905).

Monjanel (1987) de acuerdo con Keller y Barron (1981) y Barron y Keller (1983) supone que hay una relación entre los hiatos de origen erosivo en las series estratigráficas de los fondos oceánicos y la intensificación de los afloramientos costeros en los bordes de los continentes. La causa de ambos hechos es, para los autores anteriores, la intensificación de la circulación oceánica profunda, consecuencia de deterioros climáticos.

Es evidente que existe una aparente contradicción cuando se establece una relación entre el afloramiento costero y la circulación oceánica profunda.

Hay y Brock (1992) proponen mecanismos que pueden explicar estas contradicciones; en ellos, ciertas aguas profundas pueden mezclarse con aguas subsuperficiales e incorporar sus elementos nutritivos a éstas en función de los gradientes de densidad y las diferencias entre las masas de agua, es decir, según la posición e intensidad de la pycnoclina. Además, en casi todos los regímenes de afloramiento costero existe un giro ciclónico subsuperficial que puede introducir aguas más profundas y ricas en nutrientes en niveles más superficiales.

En la zona de estudio, todo lo anteriormente expuesto conduce a un modelo hidrológico complejo en dos etapas: incorporación de las aguas oceánicas profundas a niveles intermedios y ascensión de estas aguas ricas en nutrientes a la superficie.

Por otro lado, las corrientes ascensionales pudieron ser más efectivas en el «estrecho nordbético» y durante parte del Mioceno, debido a la influencia de factores locales: morfología de la costa, topografía del fondo de la cuenca, progresivo estrechamiento de ésta (Lafond y Lafond, 1971; Hay y Brock, 1992).

En el complejo contexto paleohidrológico descrito, situar el lugar preciso de los centros de afloramiento de las corrientes ascensionales y su evolución en el tiempo, es muy difícil debido a la tectónica y a las actuales condiciones de los afloramientos rocosos. Sin embargo, el estudio cuantitativo de las

especies de diatomeas más abundantes ha proporcionado algunos resultados.

Al comenzar el Episodio inferior (Langhiense medio-Serravaliense inferior) las aguas superficiales oceánicas debían ser cálidas, si se considera el importante contenido en las rocas del género *Crucidentricula* (hasta un 47 %). Además, la importancia de las corrientes ascensionales debía ser todavía moderada, si se tiene en cuenta que *Thalassionema nitzschioides* no es muy abundante (10-20 %).

En la segunda parte de este Episodio se registra ya un cierto enfriamiento del agua que se refleja en una disminución del género *Crucidentricula* (15-20 %) y una presencia, aunque todavía moderada, de *Denticulopsis hustedtii*. La importancia de las corrientes ascensionales debía ser más general y se refleja en un cierto aumento de *Thalassionema nitzschioides*.

Durante una parte del Serravaliense no se registra sedimentación diatomítica en la zona, ausencia de la biozona *Coccolithus gigas* var. *diorama* (Monjanel, 1987; López García, 1993). Este hecho puede ser debido a varias razones tanto de tipo paleoceanográfico como geológico. Así, Monjanel (*op. cit.*) observa una inconformidad durante esta época en la sección de Aguilar que relaciona con los hiatos erosivos observados en el Atlántico norte.

El Episodio medio (Serravaliense superior-Tortonense inferior) se caracteriza por una temperatura del agua templado-cálida, justificada por una presencia más importante de *Denticulopsis hustedtii* (12-25 %). El afloramiento debía ser cada vez más general y efectivo ya que *Thalassionema nitzschioides* es cada vez más abundante (desde un 20-30 % a un 30-40 % a lo largo del Episodio). En el estrecho «nordbético», la aplicación de la interpretación de Koizumi (1990) para el NO del Pacífico, significaría la existencia de un deterioro climático a lo largo de este Episodio.

Durante el Episodio superior (Tortonense medio) la sedimentación diatomítica ya no era tan habitual en esta zona (López García, 1993; López García y Bustillo, 1994) y se localizaba en medios más someros y con una temperatura del agua otra vez más cálida, si se considera que la desaparición entonces de *Denticulopsis hustedtii* es una consecuencia de ello. Además, *Thalassionema nitzschioides* es más abundante (40-50 %) que en los episodios anteriores, lo que puede significar un empobrecimiento de las condiciones del medio por un aumento del aporte arcilloso a la cuenca (López García, 1993; López García y Bustillo, 1994).

Por último, el significado paleoecológico de los factores del Análisis de los Componentes Principales (A.C.P.) ha permitido situar las muestras, y en general los afloramientos, en relación con la situa-

ción de los centros de afloramiento del agua movilizadas por las corrientes ascensionales.

Así, el ascenso de aguas subsuperficiales produce un enfriamiento relativo de la superficie de agua y su enriquecimiento en nutrientes, situación que se refleja en el Factor 2. Esto trae consigo el aumento de la población de diatomeas y la presencia más marcada entre ellas de algunas especies propias de tales situaciones, hecho reflejado en el Factor 1.

Pero esta interpretación no es siempre tan sencilla. Por ejemplo, una decantación selectiva de las diatomeas produciría una tanatocenosis distorsionada respecto a la biocenosis o bien, puede haber tenido lugar una cierta dispersión de las asociaciones originales por corrientes no ascensionales.

Si se distribuyen las muestras en dos grupos, las más ricas en sílice biogénica se sitúan en la parte derecha del Factor 1 y generalmente cercanas a la variable cantidad de diatomeas (ver figs. 2 a 5). Dichas muestras reflejan los momentos y lugares en que la productividad s.l. era mayor y la intensidad de las corrientes ascensionales también.

Las muestras con un contenido en diatomeas más escaso, se sitúan generalmente en la parte izquierda del Factor 1. Representan lugares más distantes a los centros de afloramiento de las corrientes ascensionales o bien períodos en los que éstas eran menos intensas.

En las muestras más ricas en diatomeas, la especie más abundante es *Denticulopsis hustedtii*. Aunque en algunos puntos de estudio no aparece esta diatomea debido a razones de tipo paleoecológico y/o bioestratigráfico.

En estas situaciones de alta productividad s.l., hay lugares en los que se reproduce espectacularmente *Thalassiothrix longissima* dando lugar a floraciones (blooms) que se reflejan en ritmos complejos en las rocas. Dichas situaciones deben ser consecuencia de condiciones excepcionales de ascenso de las corrientes verticales (Curtó y Matías, 1986-1987 y 1990).

En las muestras en que la cantidad global de diatomeas es más moderada, la especie más abundante es *Thalassionema nitzschioides*. Esta diatomea se puede desarrollar mejor que otras en condiciones ambientales menos favorables, debido a su carácter eurythermal y euryhalino (Schuette y Schrader, 1981).

Thalassionema nitzschioides es la especie más abundante sólo en el punto Cerro de las Albarizas (biozona *Thalassiosira yabei*). Las condiciones paleoecológicas y paleohidrográficas durante el Episodio superior, explican esta circunstancia.

El grupo *Crucidentricula nicobarica* + *Crucidentricula punctata* y *Thalassionema nitzschioides* var. *parva* son las especies representativas de aguas más cálidas en este estudio. Salvo en el Episodio infe-

rior, en el que la cantidad del grupo *Crucidentricula* se atribuye a una temperatura del agua más cálida, tanto estas dos especies como *Thalassionema nitzschioides* var. *parva* son más abundantes en capas distintas a aquéllas en las que se acumula *Thalassiothrix longissima* + *Thalassionema bacillaris*. Ello debe significar que el incremento de estos taxones en algunas capas del sedimento, se producía en situaciones en las que la temperatura del agua era variable. Sin embargo, es necesario un estudio más detallado de los ritmos y del contenido biogénico e inorgánico de las capas de las rocas con este tipo de estructura para encontrar un significado preciso a la misma.

Conclusiones

1. La importante sedimentación biosilíceá que tuvo lugar en el «estrecho nordbético» fue el resultado genérico de corrientes ascensionales marinas costeras mediante un mecanismo paleohidrológico complejo. La procedencia de los nutrientes que hicieron posible esa productividad fue esencialmente atlántica.

Otros factores locales favorecieron también la turbulencia del agua e incrementaron la eficacia de las corrientes ascensionales.

2. La observación de los resultados cuantitativos sobre las especies más abundantes ha permitido reconocer una evolución en las características de las aguas oceánicas en esta zona, durante la etapa de sedimentación diatomítica.

Estas aguas fueron más cálidas durante el Episodio inferior y la productividad más moderada. Durante el Episodio medio hubo un enfriamiento progresivo de la superficie del agua y una mayor y más generalizada productividad. En el Episodio superior el afloramiento ya no era general y la temperatura del agua nuevamente se hizo más cálida y además el medio de sedimentación era más somero y cercano al borde de cuenca.

3. Se han reconocido una serie de situaciones paleoceanográficas en los puntos de estudio que no están relacionadas directamente con un período de tiempo. Son consecuencia de la relación entre los distintos puntos de la cuenca y la posición e intensidad de los antiguos centros de afloramiento de las corrientes ascensionales.

Donde y cuando la productividad s.l. es mayor, *Denticulopsis hustedtii* es la especie más abundante. Además, puntualmente se producen floraciones (blooms) del grupo *Thalassiothrix longissima* + *Thalassionema bacillaris* que se manifiestan en ritmos complejos en la estructura de las rocas. Cuando la cantidad de diatomeas es más moderada, *Thalassio-*

nema nitzschioides es la especie más abundante, lo que se relaciona con lugares o épocas menos productivas. Las especies propias de aguas más cálidas (*Crucidentricula nicobarica*, *Crucidentricula punctata* y *Thalassionema nitzschioides* var. *parva*) son lógicamente más abundantes cuando la temperatura de la superficie del agua lo era. Y cuando se desarrolla en floraciones (blooms) el grupo *Thalassiothrix longissima* + *Thalassionema bacillaris*, esas especies de aguas más cálidas se acumulan generalmente en capas distintas en las que se acumula este grupo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la DGICYT a través del proyecto PB-920069.

Se agradece especialmente a la Dra. M.ª Angeles Bustillo el constante intercambio de opiniones a lo largo del trabajo, al Dr. Eduardo Rodríguez Badiola por su introducción en el manejo de los métodos estadísticos multivariantes y al Dr. Juan Antonio Vera por la revisión del manuscrito.

R. García realizó las determinaciones mineralógicas por DRX y J. Arroyo la delineación.

Referencias

- Akiba, F. y Yanagisawa, Y. (1985). Taxonomy, morphology and phylogeny of the Neogene diatom zonal marker species in the middle to high latitudes of the North Pacific. *Inic. Repts. DSDP*, 87, 483-554.
- Azpeitia, F. (1911). La Diatomología Española en los comienzos del siglo XX. *Asoc. Esp. Progr. Cien. Congr. de Zaragoza*. Madrid.
- Barron, J. (1985 a). Late Eocene to Holocene diatom biostratigraphy of the equatorial Pacific Ocean, DSDP Leg 85. *Inic. Repts. DSDP*, 85, 413-456.
- Barron, J. (1985 b). Miocene to holocene planktic diatoms. In *Plankton stratigraphy*. H. M. Bolli & B. Saunders and K. Perch Nielsen (eds.). Cambridge Univ. Press, 763-810.
- Barron, J. y Keller, G. (1983). Paleotemperature oscillations in the Middle and Late Miocene of the northeastern Pacific. *Micropaleontology*, 29, 150-181.
- Benson, R. H.; Rakic-ElBied, K. y Bonaduce, G. (1991). An important current reversal (influx) in the Rifian Corridor (Morocco) at the Tortonian-Messinian boundary: the end of the Tethys Ocean. *Paleoceanography*, 6, 164-192.
- Berggren, W.; Benson, R. H.; Haq, B. U.; Riedel, W. R.; Sanfilippo, A.; Schrader, H. J. y Tjasma, R. C. (1976). The El Cuervo section (Andalucía, Spain) micropaleontologic anatomy of an Early Late Miocene lower bathyal deposit. *Marine Micropal.*, 1, 195-247.
- Brewster, N. A. (1983). The determination of biogenic opal in high latitude Deep Sea sediments. *Developments in Sedimentology*, 36, 317-333.
- Burckle, L. H. (1978). Early Miocene to Pliocene diatoms levels for the equatorial Pacific. Proceedings, second working group Meeting Biostratigraphic

- Datum Planes of the Pacific Neogene. *IGCP Project 114*, Republic of Indonesia.
- Calderón, S. y Paul, M. (1886). La Moronita y los yacimientos diatomáceos de Morón. *Anales de la Soc. Esp. de Hist. Nat.*, 15, 477-493.
- Colom, G. y Gamundi, J. (1951). Sobre la extensión e importancia de las moronitas a lo largo de las formaciones aquitano-burdigalienses del Estrecho Nord-Bético. *Estudios Geol.*, 7, 331-335.
- Crawford, S. y Schrader, H. (1982). Microfossil distribution in coarse-fraction (> 150 µm) analysis of Deep Sea Drilling Project site 480, Central Gulf of California: Preliminary results. *Init. Rep. of the DSDP*, 64, 1245-1249.
- Curtó, J. A. y Matías, I. (1986-1987). Nanofacies de los sedimentos terciarios de las béticas. *Acta Geol. Hispánica*, 21-22, 529-534.
- Curtó, J. A. y Matías, I. (1990). Genese des laminites diatomitiques du Miocene Superieur de Sanlucar de Barrameda (Cadiz, Espagne): Données sur le nanoplankton siliceux et calcaire. *Paleobiologie continentale*, Montpellier, 17, 355-368.
- Ekman, V. W. (1905). On the influence of the earth's rotation in ocean currents. *Arch. Math. Astron. Phys.*, 2, 11.
- Gardette, D. (1979). *Apport de l'étude des diatomées et des silicoflagelles a la biostratigraphie et a la reconstitution du Messénien de Méditerranée: analyse de quelques Tripolis du passage Mio-Pliocène à chypre au Crete et au Maroc*. Tesis tercer ciclo. Univ. Paris-Sud, 274 págs.
- Gasse, F. (1975). *L'évolution des lacs de l'Afar central (Ethiopie et T.F.A.I.) de Plio-Pléistocène à l'Actuel*. Tesis Doctoral, 2 vols., París, 578 págs.
- Gersonde, R. (1980). *Paläökologische und biostratigraphische Auswertung von Diatomeen assoziationen aus dem Messinium des Catavissetabekens (Sizilien) und eimiger vergleichsprofile inso-spanien, NW-Algerien und auf Kreta*. Tesis Doctoral. Kiel, 393 págs.
- Hasle, G. y Mendiola, B. de (1967). The fine structure of some *Thalassionema* and *Thalassiothrix* species. *Phycologia*, 6, 107-125.
- Hay, W. W. y Brock, J. C. (1992). Temporal variation in intensity of upwelling off southwest Africa. In *Upwelling systems: Evolution since the Early Miocene*, Ed. Summerhayes, C. P., Prell, W. L. y Emeis, K. C., Geological Society, London.
- Hustedt, F. (1957). Die Diatomeen flora des Flußsystems der Weser in Gebiet der Hansestadt Bremen. *Abh. Nat. Ver. Bremen*, 181-440.
- Kanaya, T. y Kojumi, I. (1966). Interpretation of diatom thanatocoenoses from the North Pacific applied to a study of core, V, 20-130. *Sci. Rep. Thoho Univ. 2nd ser. (geol)*, 37, 89-130.
- Keller, G. y Barron, J. (1981). Integrated planktic foraminiferal and diatom biochronology for the northeast Pacific and the Monterey Formation. In *The Monterey Formation and related siliceous rocks of California. Los Angeles, California: Pacific section, society of Economic Paleontologist and Mineralogist*, Ed. Garrison, R. E. et al.
- Koizumi, I. (1990). Successional changes of middle Miocene diatom assemblages in the northwestern Pacific. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 77, 181-193.
- Kolbe, R. W. (1955). Diatoms from equatorial Atlantic cores. *Reports of the swedish Deep-Sea Exped, 1947-1948*, 7, 151-184.
- Lafond, E. C. y Lafond, K. G. (1971). Oceanography and its relation to marine organic production. In *Fertility of the Sea. New York: Gordon and Breach*, Ed. Costlow J. D., 1, 241-265.
- López García, M. J. (1993). *La sedimentación diatomítica miocena en la Cuenca del Guadalquivir* (2 tomos). Tesis Doctoral, Univ. Comp. Madrid, 389 págs.
- López García, M. J. y Bustillo, M. A. (1994). Los sedimentos miocenos con diatomeas en la Cuenca del Guadalquivir: edad y composición litológica. *Estudios Geológicos*, 50, 71-90.
- Monjanel, A. L. (1987). *Les diatomées Oligocenes a Holocenes de l'Atlantique nord et de la Méditerranée occidentale: Biostratigraphie et Paleoceanographie*. Tesis Doctoral, Brest, 310 págs.
- Mora, R.; Roca, G. y Martínez, J. (1989). Programa de Análisis Factorial de Componentes Principales. CRPES de Girona (inédito).
- Sancetta, C. (1979). Oceanography of the North Pacific during the last 18.000 years: evidence from fossil diatoms. *Marine Micropal.*, 4, 103-123.
- Sanz de Galdeano, C. y Vera, J. A. (1992). Stratigraphic record and palaeogeographical context of the Neogene basins in the Betic Cordillera, Spain. *Basin Research*, 4, 21-36.
- Schrader, H. J. (1982). Diatom biostratigraphy and laminated diatomaceous sediments from the Gulf of California. *Init. Reports DSDP*, 64, 973-981.
- Schrader, H. J. y Schuette, G. (1981). Marine diatoms. In *The sea vol. 7. The Oceanic Lithosphere*, C. Emiliani ed., John Wiley and Sons, 1179-1232.
- Schuette, G. y Schracher, H. J. (1979). Thaphocoenoses in the coastal upwelling area off Western South America. *Nova Hedwigia*, Beiheft, 64, 359-382.
- Schuette, G. y Schracher, H. J. (1981). Diatom thaphocoenoses in the coastal upwelling area off South West Africa. *Marine Micropal.*, 6, 131-155.
- Sierro, F. J. y Flores, J. A. (1992). Evolución de las fosas Bética y Rifeña y la comunicación Atlántico-Mediterráneo durante el Mioceno. *III Congr. Geol. de Esp. y VIII Congr. Latino Ame.*, resúmenes, Salamanca, 2, 563-567.
- Simonsen, R. (1974). The diatom plankton of the Indian Ocean expedition of R/V Meteor, 1964-1965. *Meteor. Forsch. Ergebnisse, ser. D.*, 19, 1-107.
- Smayda, T. J. (1958). Biogeographical studies of marine phytoplankton. *Oikos*, 9:11, 158-191.
- Vernaud-Grazzini, C. (1985). Mediterranean Late Cenozoic Stable Isotope record: Stratigraphic and Paleoclimatic Implications part IV: *Paleoclimatology and Paleoeceanography*. Geological Evolution of the Mediterranean Basin, Ed. D. J. Stanleg y F. C. Wegel (Springer-Verlag).
- Viguier, C. (1974). *Le Néogène de l'Andalousie nord-occidentale (Espagne). Histoire géologique du bassin du bas Guadalquivir*. Tesis Doctoral, Bourdeaux, 449 págs.
- Zeitzschel, B. (1978). Oceanographic factors influencing the distribution of plankton in space and time. *Micro-paleontology*, 24, 139-159.