

## *Capítulo 7*

### *Aproximación paleolimnológica I: granulometría, mineralogía, geoquímica, contenido en diatomeas y contenido polínico del sedimento del Lago de Sanabria*

*Contenido:*

- 17. Granulometría del sedimento del Lago de Sanabria*
- 18. Mineralogía del sedimento del Lago de Sanabria*
- 19. Geoquímica del sedimento del Lago de Sanabria*
- 20. Contenido en diatomeas del sedimento del Lago de Sanabria*
- 21. Análisis polínico del sedimento del Lago de Sanabria*



## Subcapítulo 17. GRANULOMETRÍA DEL SEDIMENTO DEL LAGO DE SANABRIA.

El análisis de la composición granulométrica del sedimento del Lago de Sanabria ha permitido determinar la textura sedimentaria y la distribución de tamaños de las partículas detríticas.

La determinación del tamaño de grano de las partículas detríticas se ha realizado utilizando un equipo MasterSizer/E. El detector del equipo determina el tamaño del sedimento mediante rayos *laser*. Los testigos sedimentarios SAN135E y SAN38E, situados en la cubeta oriental, han sido utilizados para el análisis granulométrico. La granulometría ha sido determinada cada 1 cm de profundidad (SAN135E) y cada 6 mm de profundidad (SAN38E).

Las secuencias sedimentarias estudiadas han evidenciado una distribución granulométrica relativamente constante para el limo orgánico (*gyttja*), sin evidenciarse cambios granulométricos importantes. El tamaño de grano medio del limo orgánico es de 27.5  $\mu\text{m}$  (limo medio), oscilando entre 22-30  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, el Episodio Sedimentario Detrítico (ESD), correspondiente al sedimento aportado por la rotura de la presa Vega de Tera (1959 AD), se caracteriza por presentar una granulometría más gruesa. Así, el tamaño de grano medio del ESD es de 54.5  $\mu\text{m}$  (limo grueso), oscilando entre 40-60  $\mu\text{m}$ , y con máximos granulométricos de 100-130  $\mu\text{m}$  (arena muy fina). Asimismo, el limo orgánico (*gyttja*) presenta una buena homogeneidad en la distribución de tamaños de grano, mientras que el ESD evidencia una mayor heterogeneidad y, por lo tanto, una menor clasificación granulométrica.

### 17.1. Perfiles granulométricos de las secuencias sedimentarias.

El análisis granulométrico de los testigos sedimentarios se muestra en la **Fig. 17.1 a,b** y **Fig 17.2 a,b**. La **Tabla 17.1** resume los valores medios del tamaño de grano para cada una de las dos secuencias analizadas. El limo orgánico (*gyttja*) evidencia una granulometría relativamente constante a lo largo del perfil de las secuencias. El ESD se encuentra claramente evidenciado por un aumento brusco de la granulometría; de 27.5  $\mu\text{m}$  (valor medio del limo orgánico) se obtienen tamaños de 54.5  $\mu\text{m}$  (valor medio del ESD). De esta forma, las secuencias sedimentarias se dividen en 3 tramos principales: a) tramo pre-ESD, b) tramo ESD, y c) tramo post-ESD.

Según la clasificación granulométrica de Udden-Wentworth (Pettijohn et al., 1972), los resultados obtenidos en SAN135E y SAN38E sitúan el limo orgánico (*gyttja*) en un limo medio (*medium silt*), mientras que el ESD está constituido por un limo grueso (*coarse silt*) con algunos horizontes de arena muy fina (**Tabla 17.1**).

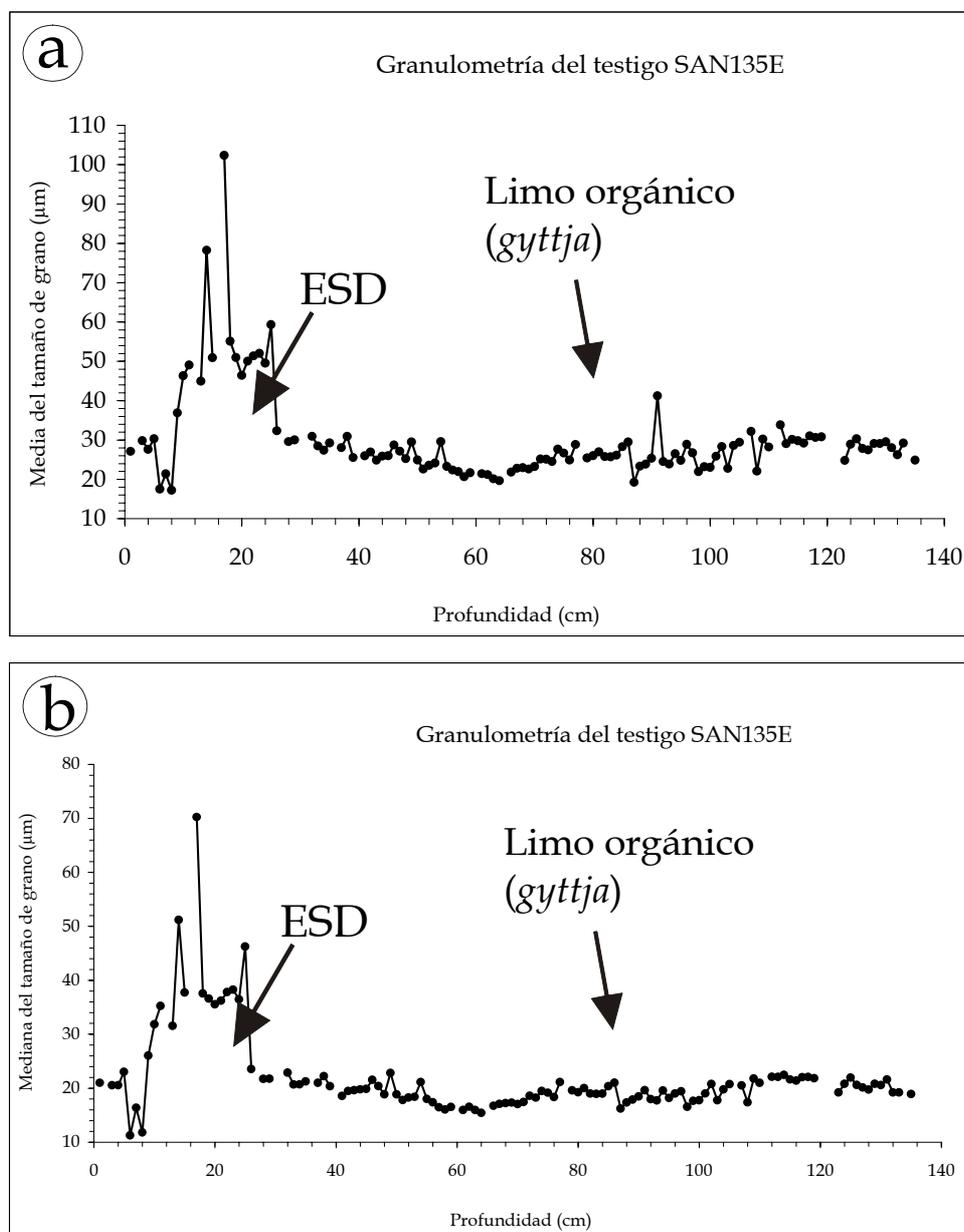


Fig. 17.1 a,b. Granulometría del testigo SAN135E (Cubeta E). El limo orgánico (gyttja) evidencia un tamaño de grano relativamente constante en todo el perfil. El Episodio Sedimentario Detrítico (ESD) se caracteriza por presentar una granulometría más gruesa.

a. Granulometría (media). Media ( $\mu\text{m}$ ): es definida como la suma de medidas, divididas por el número de medidas.

b. Granulometría (mediana). Mediana ( $\mu\text{m}$ ): divide la curva de frecuencia normal en dos partes iguales, y corresponde al 50% de la curva de frecuencia acumulativa.

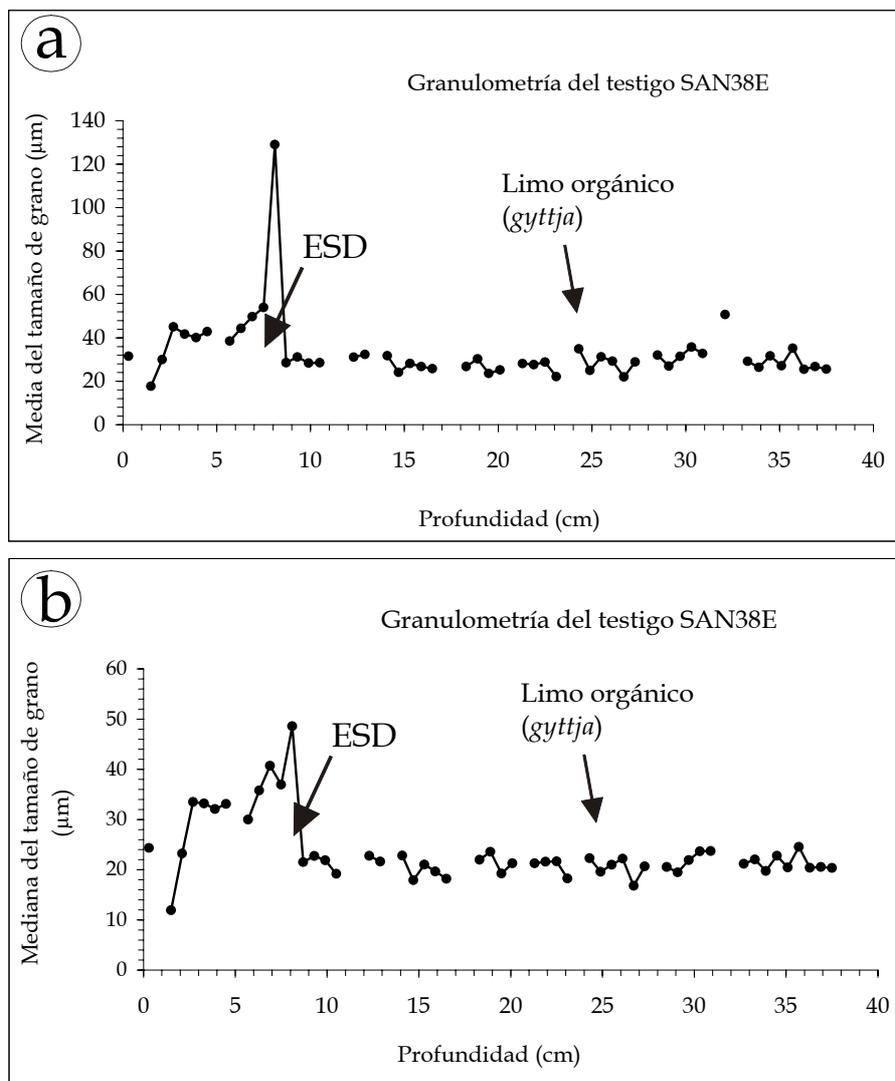


Fig. 17.2 a,b. Granulometría del testigo SAN38E (Cubeta E). El limo orgánico (*gyttja*) evidencia un tamaño de grano relativamente constante en todo el perfil. El Episodio Sedimentario Detrítico (ESD) se caracteriza por presentar una granulometría más gruesa.

a. Granulometría (media). Media ( $\mu\text{m}$ ): es definida como la suma de medidas, divididas por el número de medidas.

b. Granulometría (mediana). Mediana ( $\mu\text{m}$ ): divide la curva de frecuencia normal en dos partes iguales, y corresponde al 50% de la curva de frecuencia acumulativa.

	Granulometría ( $\mu\text{m}$ )			
	SAN135E		SAN38E	
	limo orgánico (gyttja)	ESD	limo orgánico (gyttja)	ESD
Media	26.5	54.9	28.5	54.0
Mediana	19.3	39.2	21.0	36.0
Clasificación granulométrica de Udden-Wentworth	limo medio	limo grueso	limo medio	limo grueso

Tabla 17.1. Resultado del análisis granulométrico realizado mediante el analizador de partículas MasterSizer/E, para cada una de las secuencias sedimentarias SAN135E y SAN38E.

### 17.2. Curvas acumulativas y distribución del tamaño de grano.

El análisis granulométrico ha evidenciado el carácter homogéneo del limo orgánico (*gyttja*), así como su alto grado de selección. El limo orgánico ha sido caracterizado con  $n = 102$  muestras (SAN135E) y  $n = 41$  muestras (SAN38E), obteniéndose unas curvas acumulativas y unas distribuciones de tamaños de grano relativamente constantes (Fig. 17.3). El análisis granulométrico evidencia, para el ESD, un menor grado de selección, debido a la mayor heterogeneidad en el tamaño de las partículas.

En definitiva, los tramos pre-ESD y post-ESD (limo orgánico (*gyttja*)) muestran unas propiedades granulométricas caracterizadas por un tamaño de grano fino (valor medio =  $27.5 \mu\text{m}$ ), y por una buena selección granulométrica. En cambio, el tramo ESD se caracteriza por presentar un mayor tamaño de grano (valor medio =  $54.5 \mu\text{m}$ ), y una menor selección granulométrica (Fig. 17.3).

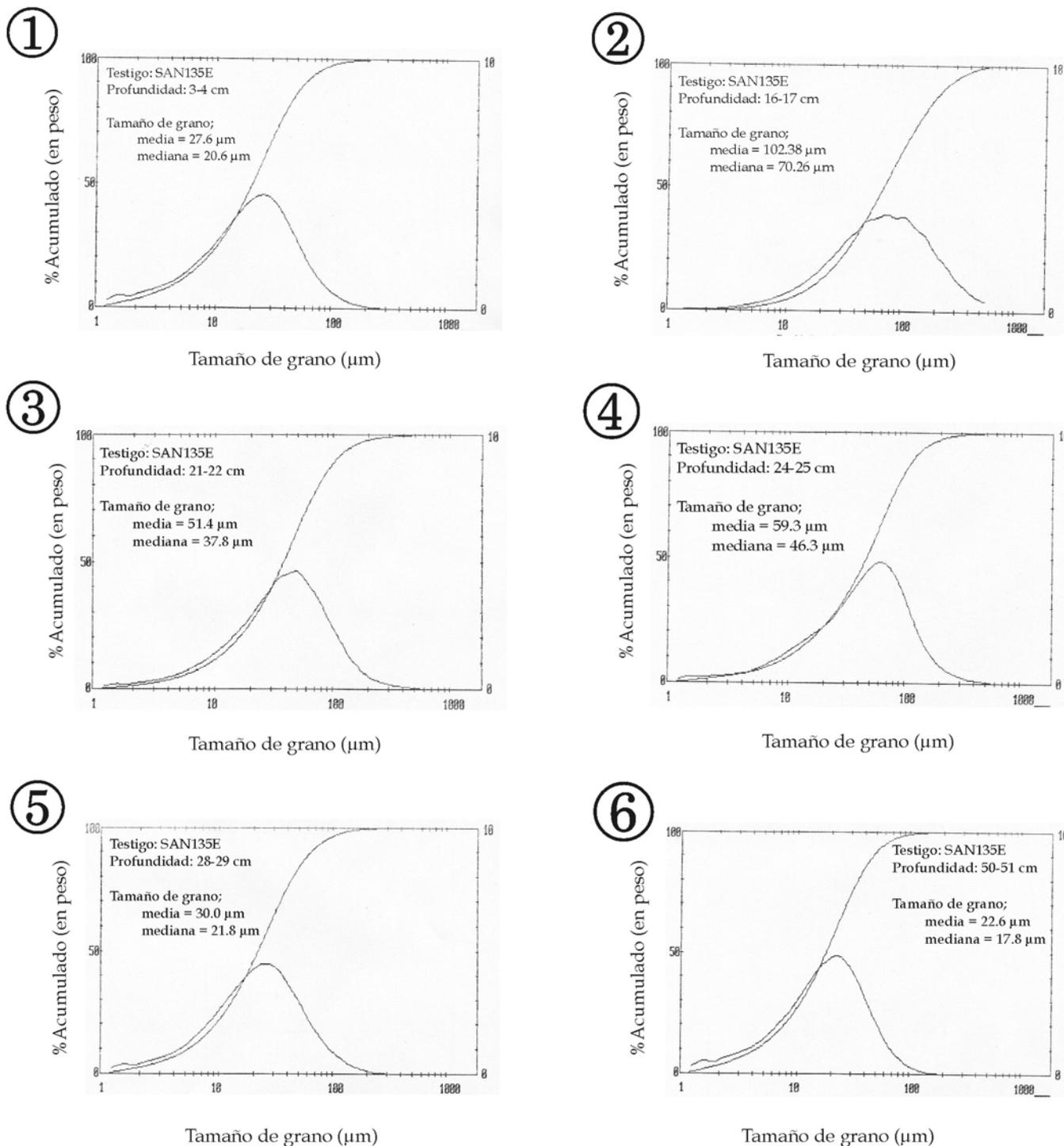


Fig. 17.3. Curvas acumulativas y distribución del tamaño de grano del sedimento del Lago de Sanabria. Ejemplos obtenidos del testigo SAN135E (Cubeta E).

- 1) Características granulométricas del limo orgánico (gyttja) post-ESD
- 2), 3) y 4) Características granulométricas del Episodio Sedimentario Detrítico (ESD)
- 5) y 6) Características granulométricas del limo orgánico (gyttja) pre-ESD

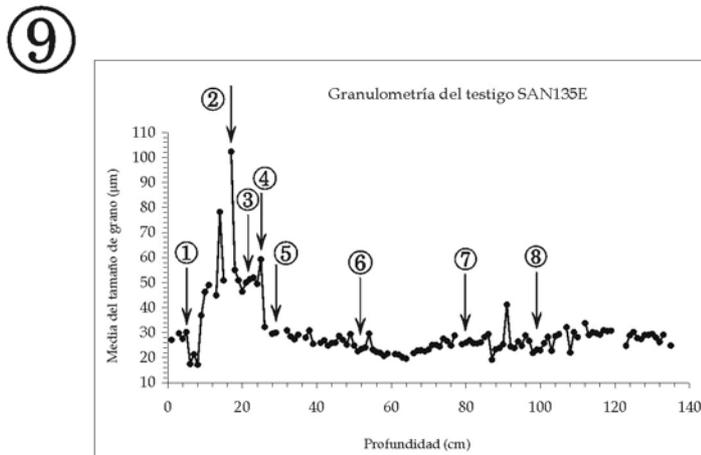
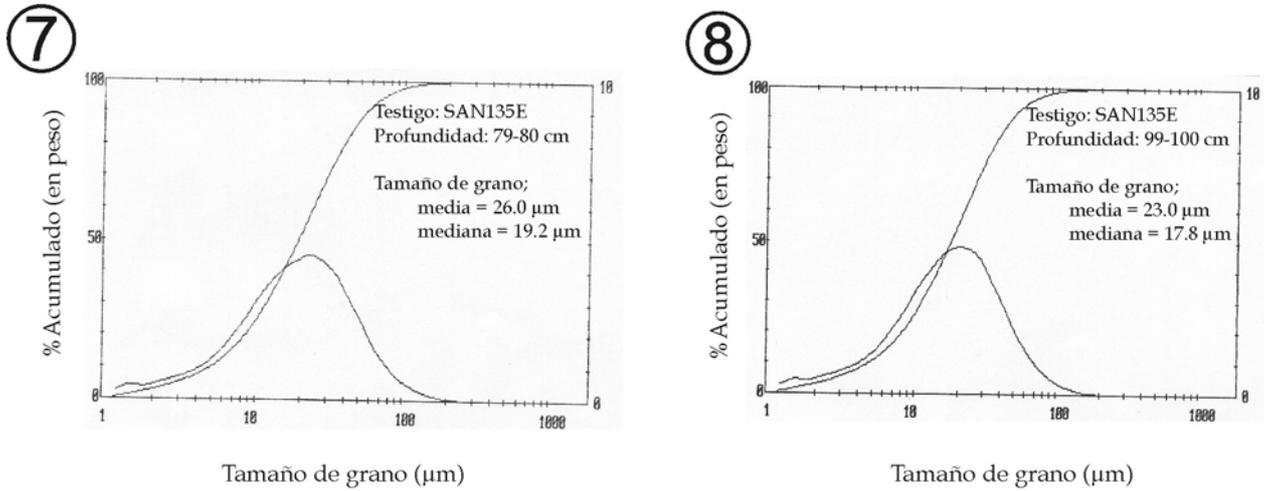


Fig. 17.3 (Continuación). Curvas acumulativas y distribución del tamaño de grano del sedimento del Lago de Sanabria. Ejemplos obtenidos del testigo SAN135E (Cubeta E).

7) y 8) Características granulométricas del limo orgánico (gyttja) pre-ESD

9) Situación de las muestras en los diferentes tramos (pre-ESD, ESD, y post ESD) en el testigo SAN135E

## Subcapítulo 18. MINERALOGÍA DEL SEDIMENTO DEL LAGO DE SANABRIA.

La composición mineralógica del sedimento del Lago de Sanabria ha sido determinada mediante la técnica de difracción de R-x. El análisis mineralógico ha permitido establecer las características cualitativas (fases minerales) y cuantitativas del sedimento en las diferentes secuencias sedimentarias estudiadas. Los resultados aportados han sido contrastados con los resultados obtenidos por otros criterios (lámina delgada, imágenes de *Scanning Electronic Microscope (SEM)*). La composición cuantitativa de las diferentes fases minerales ha sido determinada según la metodología desarrollada por Chung (1974 a,b).

El estudio mineralógico ha sido efectuado en los testigos de la cubeta oriental (SAN135E, SAN235E, SAN38E). La mineralogía ha sido determinada cada 1 cm de profundidad (SAN135E), cada 2 cm de profundidad (SAN235E), y cada 12 mm de profundidad (SAN38E).

### 18.1. Caracterización cualitativa de la mineralogía del sedimento.

El relleno sedimentario del lago está representado por partículas detríticas alóctonas procedentes de la erosión de las rocas que constituyen la cuenca hidrográfica del Lago de Sanabria (gneis, granodiorita, y granito). Así, las partículas minerales que conforman el limo sedimentado están representadas, fundamentalmente, por filosilicatos y tectosilicatos (**Tabla 18.1**). Los diagramas mineralógicos han evidenciado la presencia significativa de únicamente estas fases minerales, en todos los análisis efectuados (**Fig. 18.1**). En los testigos estudiados, por lo tanto, el sedimento es cualitativamente homogéneo.

La precipitación autigénica de minerales en el sistema lacustre (origen autóctono) es ausente o muy poco significativa.

Mineral	Composición química	Grupo	
<b>Biotita</b>	$(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{OH})_2$	Grupo de la mica	Filosilicatos
<b>Moscovita</b>	$(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})\text{KAl}_2(\text{OH})_2$	Grupo de la mica	
<b>Clorita</b>	$(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{OH})_6$	Grupo de la clorita	
<b>Cuarzo</b>	$\text{SiO}_2$	Grupo del $\text{SiO}_2$	Tectosilicatos
<b>Microclina/Ortosa</b>	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	Grupo de los feldespatos	
<b>Albita/Anortita</b>	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 / \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Grupo de los feldespatos	

Tabla 18.1. Composición mineralógica mayoritaria del sedimento del Lago de Sanabria, determinado mediante difracción de R-x. Las fases minerales presentes tienen un origen detrítico alóctono, como producto de la erosión de las rocas que constituyen la cuenca hidrográfica (gneis, granodiorita, granito). Las fases minerales pertenecen al grupo de los filosilicatos y tectosilicatos.

En el sedimento del lago es probable la existencia de un conjunto de minerales accesorios, no detectados con la misma facilidad que los anteriores, propios de la composición mineralógica de las rocas plutónicas y metamórficas de la cuenca hidrográfica (Tabla 18.2).

Mineral	Composición química	Grupo	
Apatito	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$	Grupo del apatito	Fosfato
Epidota	$\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})\text{Al}_2\text{O}(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})$	Grupo de la epidota	Sorosilicato
Circón	$\text{ZrSiO}_4$	Grupo del circón	Nesosilicato
Sillimanita	$\text{Al}_2\text{SiO}_5$	Grupo $\text{Al}_2\text{SiO}_5$	Nesosilicato

Tabla 18.2. Minerales accesorios probablemente presentes en el sedimento del Lago de Sanabria, deducidos a partir de la composición mineralógica de las rocas que constituyen la cuenca hidrográfica.

### 18.2. Caracterización cuantitativa de la mineralogía del sedimento.

El mineral más abundante que constituye el sedimento de los testigos analizados es la *biotita* (una contribución pequeña está aportada por la *moscovita*), con una representación media del 50.6%. La *clorita* y el *cuarzo* están presentes en el sedimento en una proporción relativamente similar; un 18.6% para la *clorita*, y un 21.9% para el *cuarzo*. Finalmente, el sedimento está constituido en un 8.8% por el grupo de los *feldespatos*. Por lo tanto, un 70% está representado por filosilicatos, mientras que un 30% está representado por tectosilicatos (Tabla 18.3).

Mineral	Proporción mineral (%)			Valor medio	
	SAN135E	SAN235E	SAN38E		
Biotita (+ moscovita)	48.6	53.7	49.6	50.6	Filosilicatos
Clorita	21.9	12.0	22.0	18.6	
Cuarzo	20.0	24.2	21.5	21.9	Tectosilicatos
Feldespatos	9.5	10.1	6.9	8.8	
% Filosilicatos	70.5	65.7	71.6	69.3	
% Tectosilicatos	29.5	34.3	28.4	30.7	

Tabla 18.3. Determinación cuantitativa de las diferentes fases minerales presentes en el sedimento del Lago de Sanabria. El limo orgánico (*gyttja*) está constituido fundamentalmente por filosilicatos (70%) y tectosilicatos (30%).

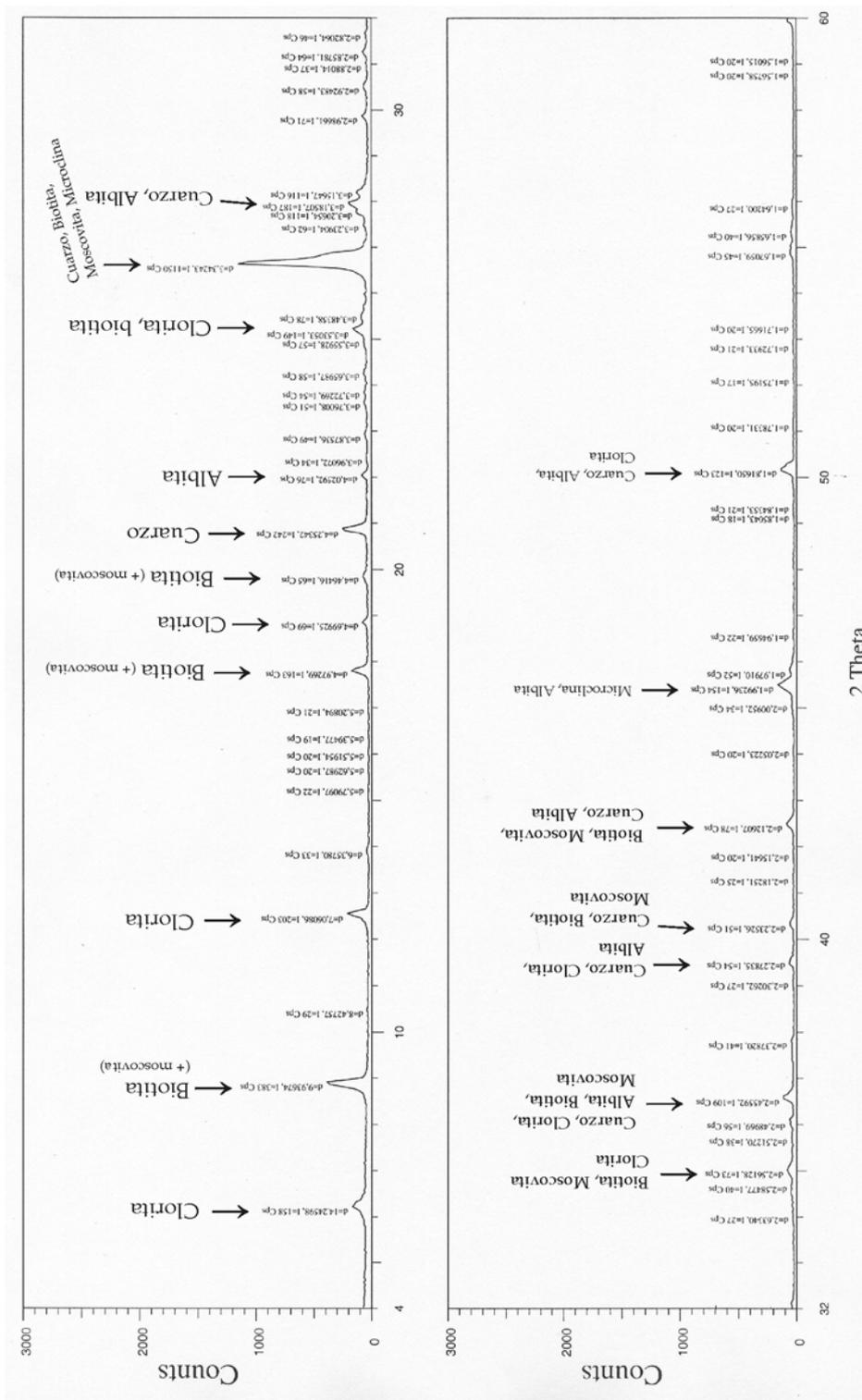


Fig. 18.1. Diagrama mineralógico característico del sedimento del Lago de Sanabria. Los análisis efectuados en los testigos sedimentarios han evidenciado la casi exclusiva presencia de minerales detríticos de origen alóctono, constituidos fundamentalmente por filosilicatos (biotita, clorita y moscovita) y tectosilicatos (cuarzo y feldespatos). Los análisis realizados ( $n = 116$  para SAN135E,  $n = 91$  para SAN235E,  $n = 31$  para SAN38E) permiten constatar la homogeneidad, en cuanto a fases minerales, del sedimento del Lago de Sanabria.

La composición mineralógica de SAN135E se ilustra en la **Fig. 18.2**. El conjunto de agrupaciones establecido por el análisis Cluster, se encuentra determinado por la existencia del Episodio Sedimentario Detrítico (ESD) y los Niveles de Ruptura Inorgánica (NRI1 y NRI2). Así, estos niveles sedimentarios determinan las características principales en la composición mineralógica de la secuencia sedimentaria. El tramo sedimentario más ilustrativo lo constituye el ESD, el cual está caracterizado por un aumento considerable en la cantidad de tectosilicatos (**Fig. 18.3**). En cambio, el NRI1 se encuentra asociado a una disminución apreciable en el contenido en tectosilicatos.

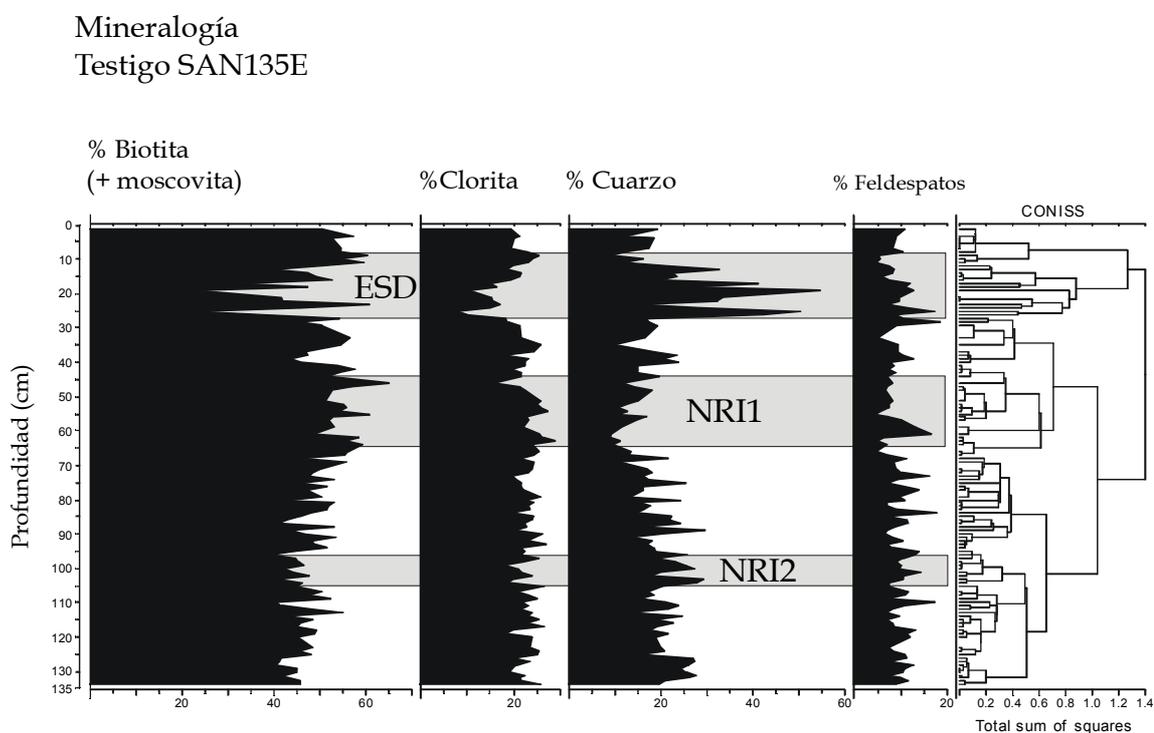


Fig. 18. 2. Composición mineralógica del testigo SAN135E (Cubeta E). En la secuencia sedimentaria se indica la situación del Episodio Sedimentario Detrítico (ESD), así como los niveles NRI1 y NRI2.

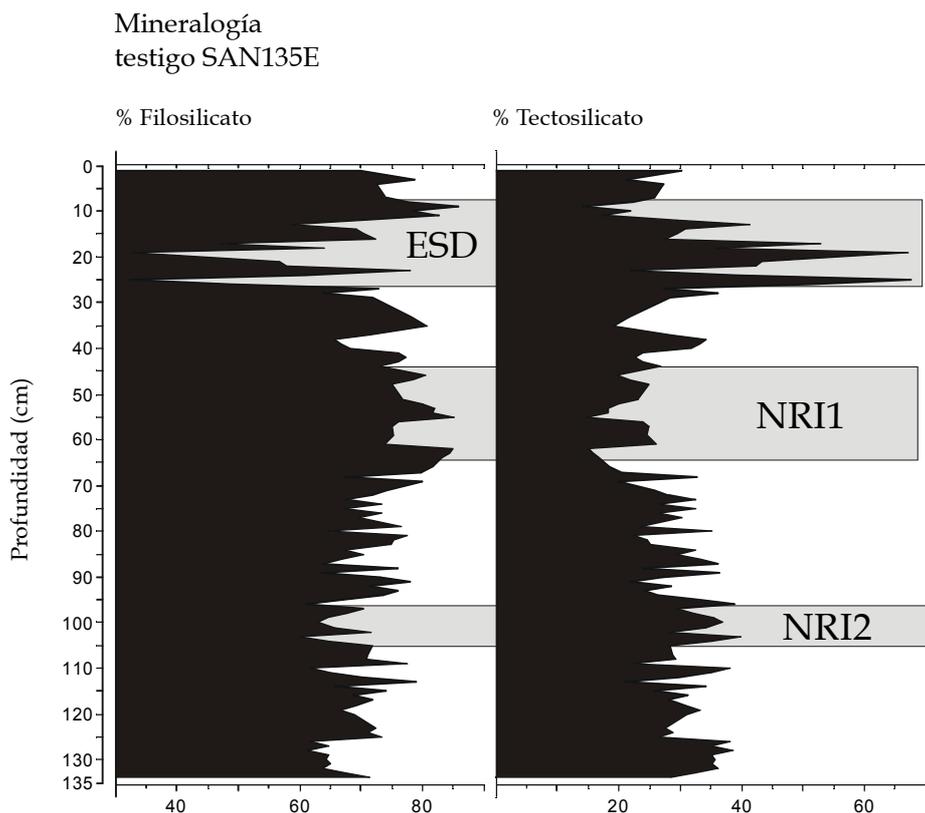


Fig. 18. 3. Evolución de los filosilicatos y tectosilicatos en el testigo SAN135E (Cubeta E). El Episodio Sedimentario Detrítico (ESD) está caracterizado por un aumento brusco en la cantidad de tectosilicatos (cuarzo+feldespatos).

La composición mineralógica de SAN235E se muestra en la Fig. 18.4. Como en el testigo anterior, los niveles ESD, NRI1 y NRI2 determinan, en mayor o menor grado, las características en la composición mineralógica de la secuencia sedimentaria. El testigo SAN235E evidencia un cambio mineralógico importante situado, aproximadamente, en 160 cm de profundidad, asociado a la isócrona de cal. 1450 BP. En esta profundidad, la cantidad de tectosilicatos aumenta considerablemente con respecto a los valores existentes en la base de la secuencia (Fig. 18.5). Este nivel corresponde al comienzo de la cuarta y última oscilación de 1.500 años detectada en el testigo SAN434 (plataforma distal).

Los filosilicatos y tectosilicatos presentan una correlación negativa alta. Así, la correlación entre la *biotita* (filosilicato) y el *cuarzo* (tectosilicato) es de  $r^2 = 0.78$  (SAN135E) y  $r^2 = 0.93$  (SAN235E) (Fig. 18.6).

El análisis mineralógico del testigo corto de gravedad (SAN38E) evidencia las mismas observaciones obtenidas para los testigos SAN135E y SAN235E (Luque & Julià, 2002).

Mineralogía  
testigo SAN235E

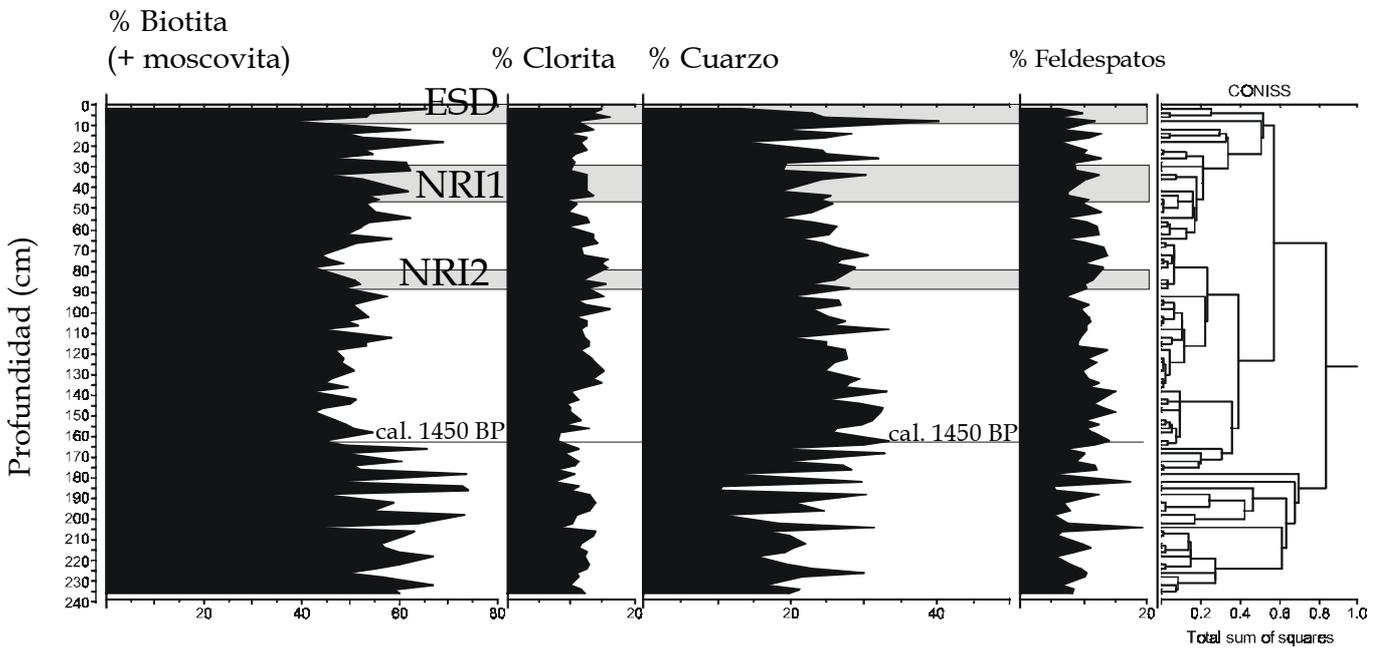


Fig. 18. 4. Composición mineralógica del testigo SAN235E (Cubeta E). En la secuencia sedimentaria se indica la situación del Episodio Sedimentario Detritico (ESD), así como los niveles NRI1 y NRI2. En la isócrona cal. 1450 BP se detecta un aumento apreciable en la cantidad de tectosilicatos.

Mineralogía  
testigo SAN235E

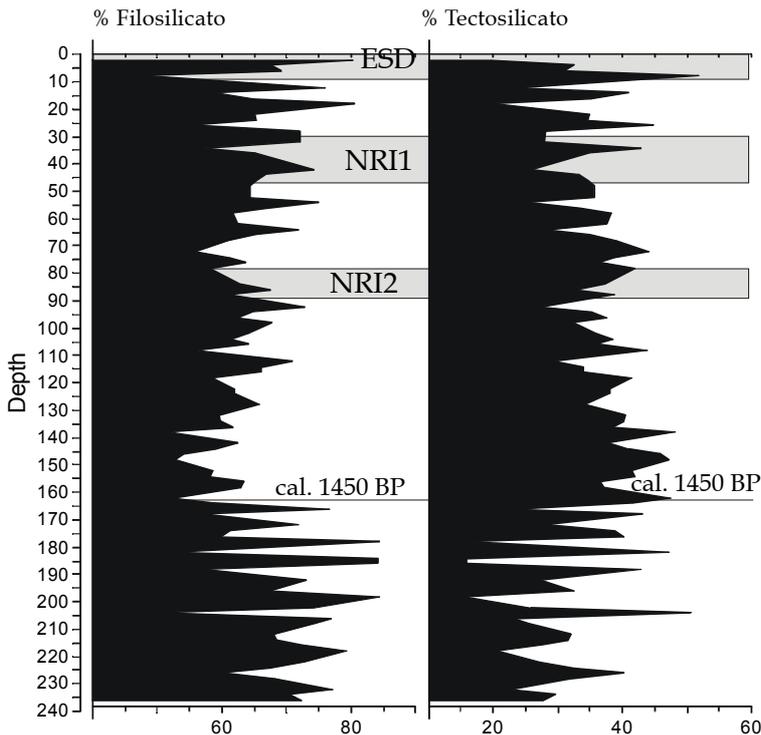


Fig. 18. 5. Evolución de los filosilicatos y tectosilicatos en el testigo SAN235E (Cubeta E). Las cantidades máximas de tectosilicatos se detectan en el Episodio Sedimentario Detritico (ESD). La isócrona cal. 1450 BP está caracterizada por un aumento considerable en la cantidad de tectosilicatos.

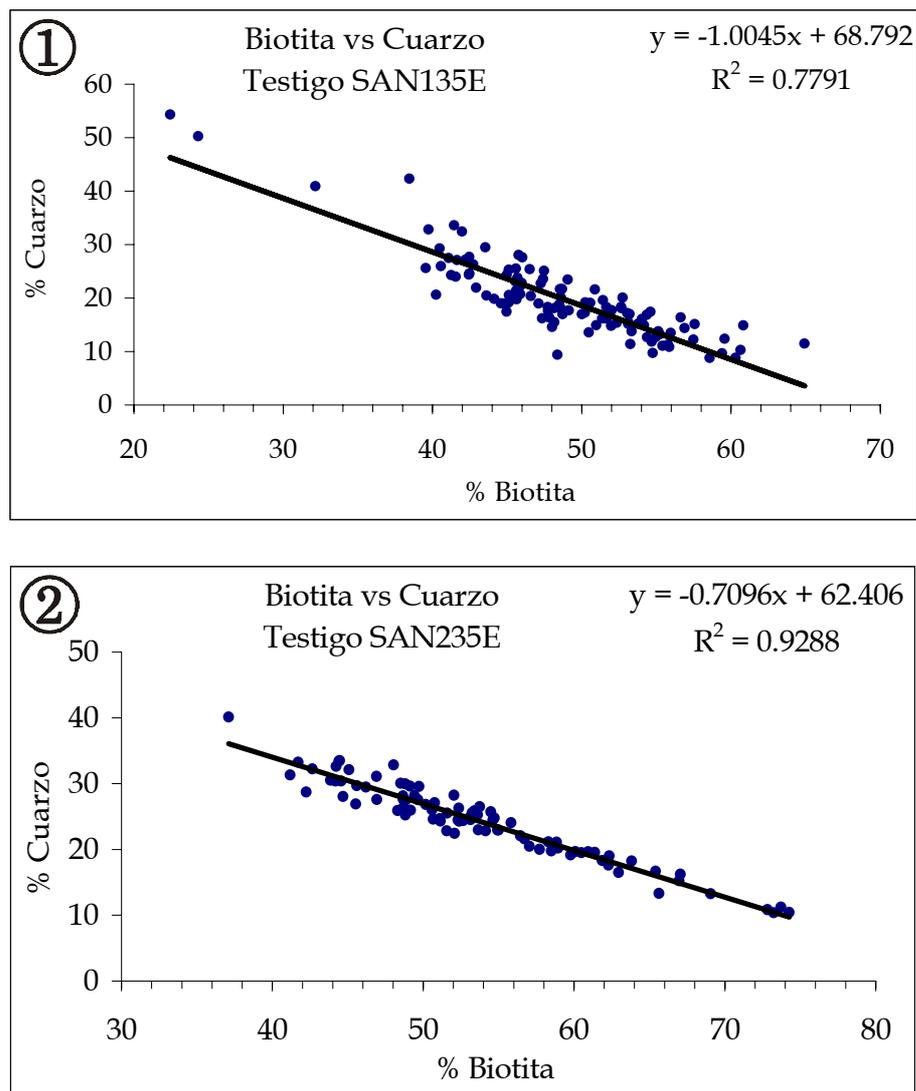


Fig. 18.6. Correlación entre la biotita (filosilicato) y el cuarzo (tectosilicato) en los testigos sedimentarios:

- 1) SAN135E:  $r^2 = 0.78$  ( $n = 116$ )
- 2) SAN235E:  $r^2 = 0.93$  ( $n = 91$ )

## Subcapítulo 19. GEOQUÍMICA DEL SEDIMENTO DEL LAGO DE SANABRIA.

El análisis químico del sedimento lacustre constituye un parámetro paleolimnológico de interés en las reconstrucciones paleoambientales (Engstrom & Wright, 1984; Norton et al., 1992; Virkanen et al., 1997). La geoquímica del sedimento puede aportar aspectos relacionados con los principales procesos determinantes de la historia limnológica del sistema lacustre, así como aspectos relacionados con la historia de la cuenca de drenaje (Engstrom & Wright, 1984).

La interpretación de la estratigrafía geoquímica en un sistema lacustre puede no ser sencilla, debido a: a) todo un conjunto de dificultades asociadas a la incerteza del origen de determinados elementos geoquímicos, y b) a dificultades debidas a posibles cambios químicos de origen diagenético. En el Lago de Sanabria, la incerteza relacionada al punto a) está minimizada, ya que, en lagos oligotróficos, tanto la materia orgánica como inorgánica tienen un origen fundamentalmente alóctono, así que las variaciones en la composición total del sedimento están asociados a cambios en los procesos externos a la propia dinámica del sistema lacustre. Por lo tanto, en el Lago de Sanabria, la señal geoquímica se encuentra relacionada fundamentalmente con los procesos erosivos en la cuenca de drenaje.

Las rocas que constituyen la cuenca hidrográfica del Lago de Sanabria (Martínez García, 1973; Martínez & Quiroga, 1993), así como las características hídricas y limnológicas del sistema lacustre (de Hoyos, 1996) permiten establecer unas relaciones relativamente sencillas entre la señal geoquímica del sedimento y los procesos sedimentarios y limnológicos que las han originado, atendiendo a los procesos geoquímicos generales descritos por Engstrom & Wright (1984). Asimismo, en las secuencias sedimentarias estudiadas, los procesos diagenéticos deben de ser ausentes o poco significativos, debido a: a) los minerales que constituyen el sedimento del lago son difícilmente solubles, b) el agua del Lago de Sanabria presenta una mineralización muy baja (conductividad: 14.5-14.9  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), c) las condiciones de presión/temperatura, en las secuencias estudiadas, no son suficientemente elevadas para provocar procesos diagenéticos importantes en la materia orgánica, y d) las características del sedimento, analizadas mediante lámina delgada e imágenes SEM, no evidencian la presencia de procesos diagenéticos.

### 19.1. Elementos analizados.

El análisis geoquímico ha sido determinado en la secuencia sedimentaria SAN135E (cubeta oriental), efectuándose un análisis cada 5 cm de profundidad. Los principales elementos mayoritarios analizados han sido: K, Na, Mg, Ca, Ti, Al, Fe, Mn, P, y S.

Los elementos mayoritarios procedentes de la erosión de las rocas plutónicas y metamórficas de la cuenca de drenaje (origen inorgánico) son: K, Na, Mg, Ca, Ti, Al, Fe. Los principales minerales que constituyen el sedimento (*biotita*, *moscovita*, *clorita*, y *feldespatos*) determinan la existencia de estos elementos mayoritarios de origen

inorgánico. Por otra parte, los elementos mayoritarios asociados fundamentalmente al contenido en materia orgánica son: P, S y Mn.

Otros elementos mayoritarios analizados, así como elementos minoritarios, han sido:

- a) grupo de los alcalinos-alcalinotérreos-térreos (Li, Rb, Cs, Sr, Ga, Ba).
- b) Zn, Pb, Co, Cu, Ni y V.
- c) grupo de las Tierras Raras (lantánidos).

### 19.2. Tratamiento analítico.

El análisis geoquímico se ha realizado mediante la técnica del ICP (*Inductive Coupled Plasma*). Los elementos mayoritarios han sido determinados mediante ICP-Óptico (en el *Servei Científic-Tècnic de la Universitat de Barcelona*), mientras que los elementos minoritarios han sido determinados mediante ICP-MS (ICP de masas) (en el *Instituto Ciencias de la Tierra "Jaume Almera" CSIC*). El protocolo de tratamiento utilizado ha sido el especificado por el *Servei Científic-Tècnic de la Universitat de Barcelona*.

La preparación de las muestras de sedimento ha consistido en un ataque total de la muestra mediante sucesivos tratamientos con diferentes ácidos. Los diferentes pasos seguidos han sido:

- Inicialmente, la muestra seca de sedimento, aproximadamente de 0.2 g de peso, ha sido atacada con 5 ml de HNO<sub>3</sub> concentrado y 2 ml de agua oxigenada. Durante 1 h, la muestra se deja a reflujo en un baño de arena.
- Posteriormente, y una vez enfriado, se adiciona 2 ml de HClO<sub>4</sub> y 15 ml de HF. Durante 12 horas, se deja reposar la muestra a temperatura ambiente, para que se produzca la disolución del silicio. Una vez completado este paso, la disolución se deja evaporar casi a sequedad.
- La segunda etapa consiste, de nuevo, en la adición de 2 ml de HClO<sub>4</sub>, 15 ml de HF y 2 ml de agua oxigenada, y se deja reposar la disolución a temperatura ambiente durante 1 hora. Posteriormente, se realiza la evaporación a casi sequedad. Este proceso se repite tantas veces como sea necesario para eliminar todo el SiO<sub>2</sub> de la muestra (normalmente 3 veces).
- Cuando se considera que todo el SiO<sub>2</sub> ya ha sido eliminado con humos de F<sub>4</sub>Si en la última evaporación a sequedad, se añade 5 ml de HClO<sub>4</sub>, evaporando de nuevo a casi sequedad.
- Enfriar y añadir 2.5 ml de agua desionizada y 2.5 ml de HNO<sub>3</sub>. Calentar la solución tapada, a reflujo, a temperatura casi de ebullición hasta disolución total de las sales.
- Enfriar. La solución queda totalmente transparente, preparada para analizar.

### 19.3. Resultados de los análisis geoquímicos.

#### 19.3.1. Elementos mayoritarios.

##### 19.3.1.1. Elementos de origen inorgánico.

La estratigrafía geoquímica de los principales elementos mayoritarios de origen detrítico inorgánico se muestra en la **Fig. 19.1**. Los resultados evidencian unas concentraciones muy elevadas para el Al, Fe y K, ya que; a) el Al se encuentra en casi todos los minerales del sedimento (minerales aluminosilicatados), b) el Fe se encuentra

en abundancia en la estructura cristalina de los filosilicatos (*biotita* y *clorita*), y c) el K constituye parte importante de la estructura cristalina de los minerales del grupo de las micas (*biotita* y *moscovita*) y del grupo de los feldespatos (*microclina* y *ortosa*). El resto de elementos (Na, Mg, Ca y Ti) se encuentran en menores concentraciones, ya sea porque se presentan en minerales poco abundantes (caso del Na y Ca en los feldespatos) o por otras causas geoquímicas (la propia abundancia del elemento en la estructura cristalina del mineral).

### Geoquímica: elementos mayoritarios de origen detrítico inorgánico Testigo SAN135E

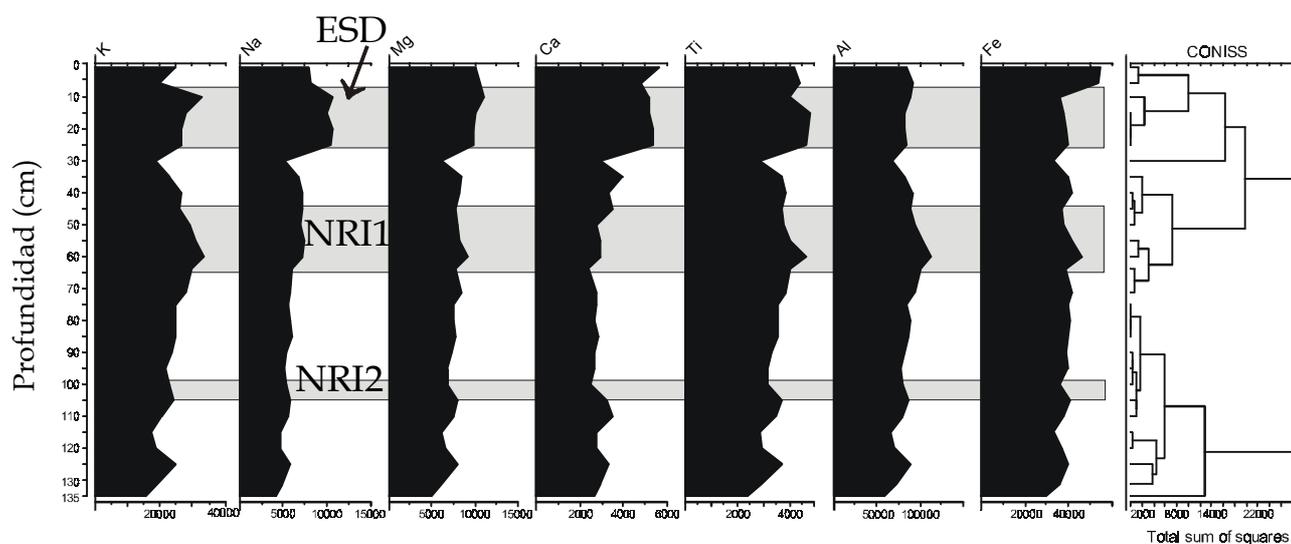


Fig. 19.1. Estratigrafía geoquímica del testigo sedimentario SAN135E (Cubeta E). Contenido en elementos mayoritarios de origen detrítico inorgánico. Situación de los horizontes sedimentarios ESD y NRI (NRI1 y NRI2). Unidades en ppm.

La **Fig. 19.1** evidencia la existencia de variaciones significativas, en función de la profundidad, en las concentraciones de los elementos. Las agrupaciones por proximidades del análisis Cluster coinciden considerablemente, en menor o mayor medida, con los horizontes sedimentarios ESD y NRI. Así, el Episodio Sedimentario Detrítico (ESD) presenta unas concentraciones elevadas (si no máximas) de los elementos mayoritarios detríticos inorgánicos. Los elementos que evidencian mejor un aumento de sus concentraciones durante el ESD son el Na, Mg, Ca y Ti. El horizonte sedimentario NRI1 experimenta, asimismo, un aumento considerable en las concentraciones de casi todos los elementos representados en la **Fig. 19.1**, con valores que alcanzan, incluso, máximos absolutos de toda la secuencia sedimentaria (caso del K y Al). El horizonte NRI2 no ha provocado, aparentemente, ningún cambio tan considerable como los que evidencian los horizontes ESD y NRI1, aunque se encuentra muy cercano a un límite entre dos grupos de proximidades Cluster.

Por lo tanto, gran parte de las variaciones en la estratigrafía geoquímica de los elementos mayoritarios de origen detrítico inorgánico se encuentra controlada, sino determinada, por la existencia de los horizontes sedimentarios ESD y NRI (NRI1 y NRI2). Los horizontes ESD y NRI1 se caracterizan por presentar unas concentraciones relativamente elevadas de estos elementos.

### 19.3.1.2. Elementos de origen orgánico.

La estratigrafía geoquímica de los elementos mayoritarios Mn, P y S, se muestra en la **Fig. 19.2**. Las tendencias en profundidad de estos tres elementos manifiestan un paralelismo muy importante con el contenido en materia orgánica del sedimento (ver los perfiles estratigráficos del LOI (*Loss on ignition*), del TOC (*Total Organic Carbon*) y del TN (*Total Nitrogen*)). La alta correlación existente entre el Mn, P y S con el contenido en materia orgánica (ver **Fig. 19.5** y **19.6**), permite deducir un origen fundamentalmente orgánico a estos tres elementos. Las agrupaciones por proximidades del análisis Cluster coinciden con la existencia de los horizontes sedimentarios ESD y NRI (NRI1 y NRI2). Así, los horizontes ESD, NRI1 y NRI2 están caracterizados por concentraciones bajas en Mn, P y S, evidenciándose de forma más acusada en ESD y NRI1.

## Geoquímica: elementos asociados a la materia orgánica Testigo SAN135E

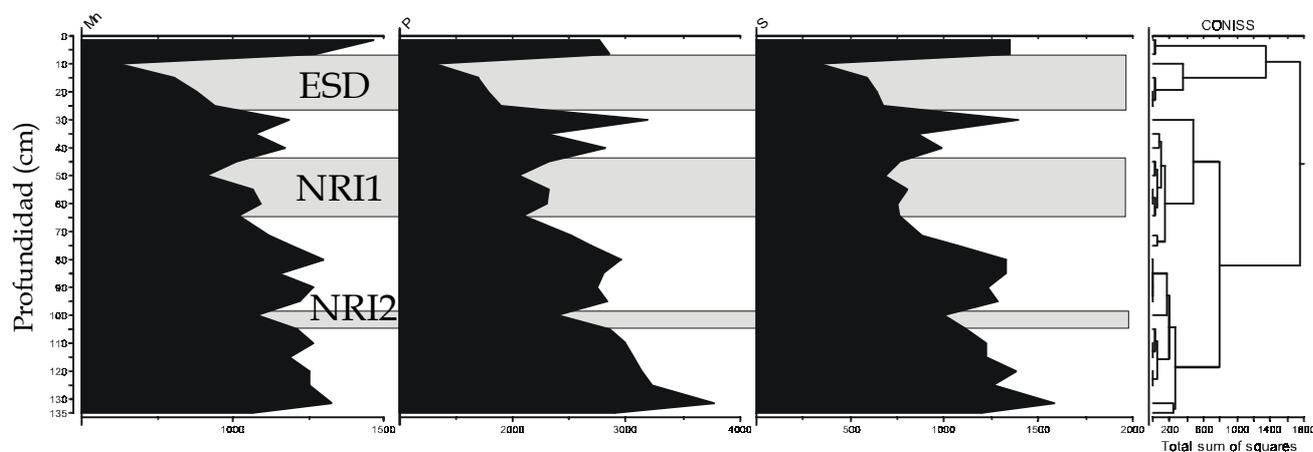


Fig. 19.2. Estratigrafía geoquímica del testigo sedimentario SAN135E (Cubeta E). Contenido en elementos mayoritarios relacionados con la materia orgánica: Mn, P y S. Situación de los horizontes sedimentarios ESD y NRI (NRI1 y NRI2). Unidades expresadas en ppm.

### 19.3.2. Elementos minoritarios.

La estratigrafía geoquímica de los elementos minoritarios pertenecientes a los grupos químicos Ia, IIa y IIIa (alcalinos, alcalinotérreos y térreos, respectivamente), se muestra en la **Fig. 19.3**. Las variaciones en las concentraciones de estos elementos evidencian un comportamiento muy similar con respecto a los principales elementos mayoritarios de

origen detrítico inorgánico (elementos de la **Fig. 19.1**). Así, los horizontes sedimentarios ESD y NRI1 se caracterizan por presentar concentraciones elevadas de estos elementos.

### Geoquímica: elementos minoritarios de los grupos Ia, IIa y IIIa Testigo SAN135E

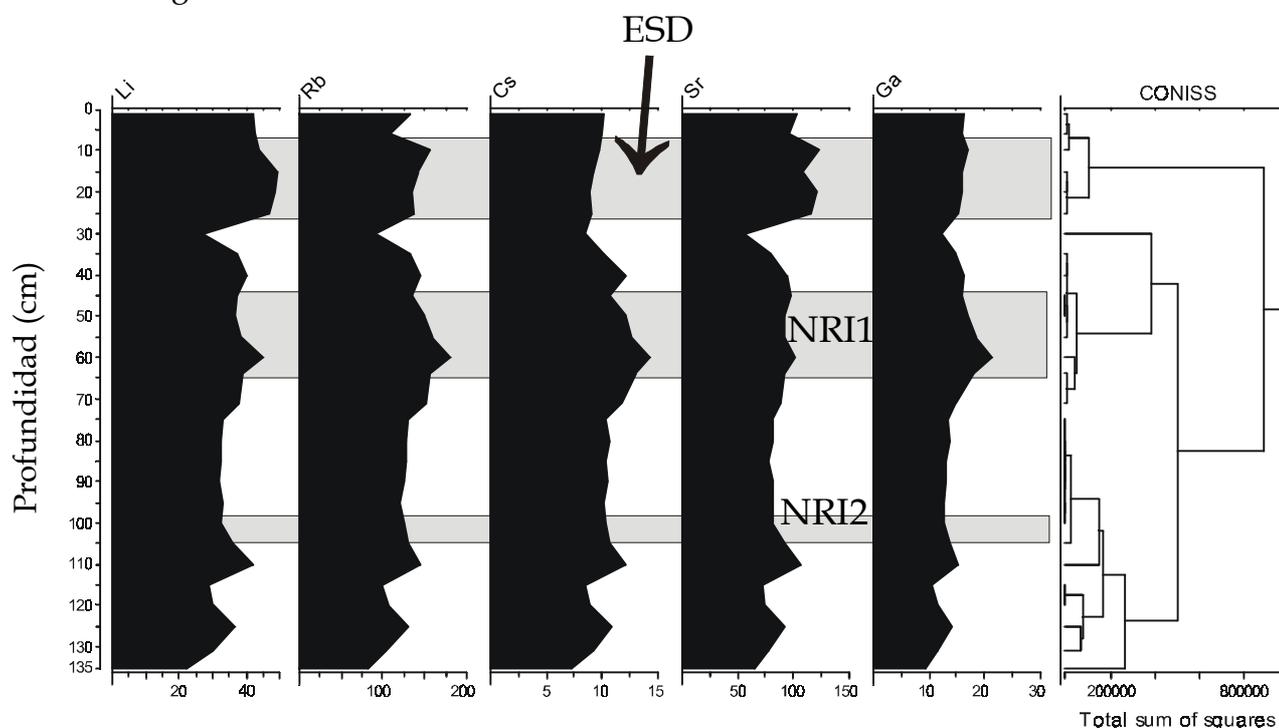


Fig. 19.3. Estratigrafía geoquímica del testigo sedimentario SAN135E (Cubeta E). Contenido en elementos minoritarios de los grupos: Ia (alcalinos; Li, Rb, Cs), IIa (alcalinotérreos; Sr), y IIIa (térreos; Ga). Situación de los horizontes sedimentarios ESD y NRI (NRI1 y NRI2). Unidades expresadas en ppm.

La **Fig. 19.4** ilustra la estratigrafía geoquímica de ciertos elementos minoritarios que han evidenciado unas variaciones muy significativas en sus concentraciones. Estos elementos son: a) elementos pertenecientes a los lantánidos (Eu, Gd, Tb, Ho, y Lu), b) el Sc (grupo IIIb) y, c) el Bi (grupo Va). Las agrupaciones por proximidades del análisis Cluster coinciden notablemente con los horizontes sedimentarios ESD y NRI (NRI1 y NRI2) (**Fig. 19.4**). La principal variación en las concentraciones de estos elementos minoritarios comienza justo en la base del horizonte NRI1 (aproximadamente cal. 450 BP), donde se observa una disminución brusca y significativa de sus concentraciones (a excepción del elemento Gd, que tiene un comportamiento totalmente opuesto). A partir del horizonte NRI1, las concentraciones mantienen valores bajos hasta el techo de la secuencia sedimentaria (a excepción del Gd, con comportamiento opuesto). Como evidencia el análisis de proximidades Cluster, los horizontes ESD y NRI (NRI1 y NRI2) también han determinado el comportamiento de las tendencias de estos elementos.

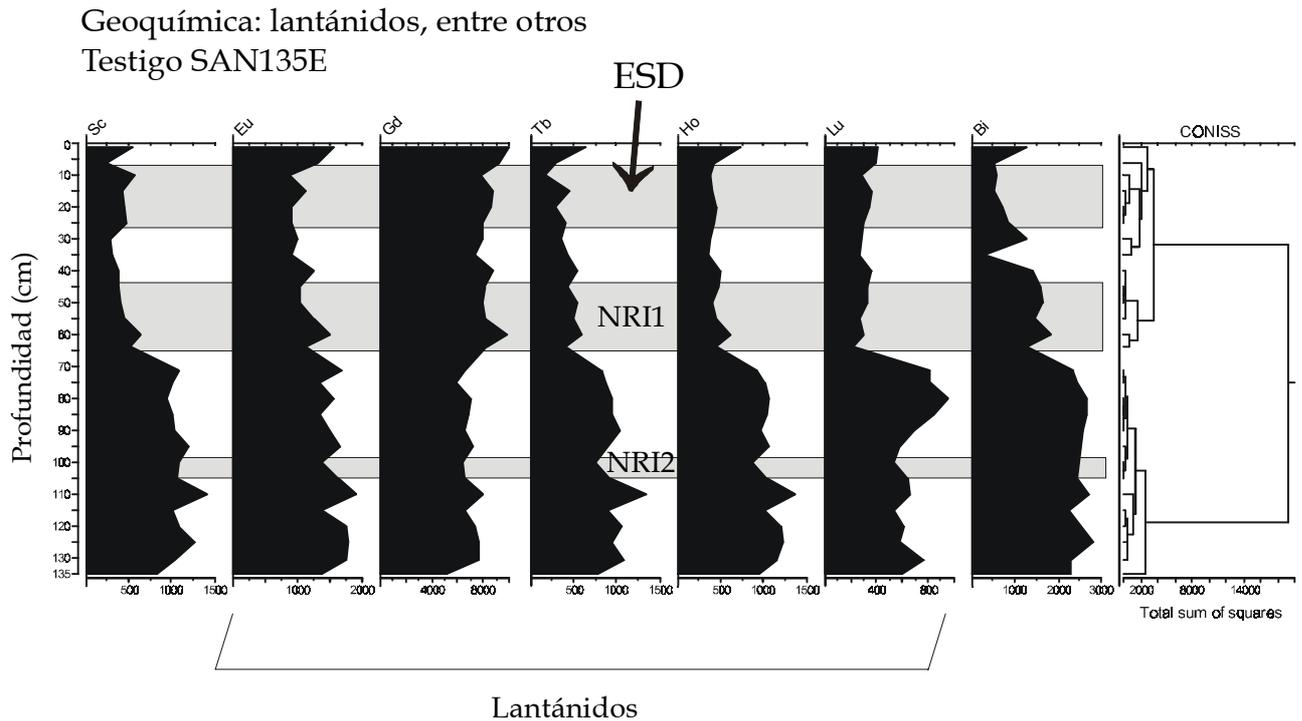


Fig. 19.4. Estratigrafía geoquímica del testigo sedimentario SAN135E (Cubeta E). Contenido en elementos minoritarios: lantánidos (Eu, Gd, Tb, Ho, Lu), así como Sc (grupo IIIb) y Bi (grupo Va). Situación de los horizontes sedimentarios ESD y NRI (NRI1 y NRI2). Unidades expresadas en ppm.

Como conclusión de todas estas observaciones, el análisis geoquímico ha evidenciado variaciones en las concentraciones de los elementos mayoritarios y minoritarios del sedimento del lago. Los horizontes sedimentarios ESD y NRI (NRI1 y NRI2) han determinado notablemente estas variaciones en la geoquímica del sedimento. Los horizontes ESD, NRI1 y NRI2 se caracterizan por presentar concentraciones relativamente elevadas de elementos de origen detrítico inorgánico (K, Na, Mg, Ca, Ti, Al, Fe), mientras que presentan concentraciones mínimas de elementos relacionados con la materia orgánica (Mn, P y S).

#### 19.4. Análisis factorial de los resultados geoquímicos.

La Fig. 19.5 muestra la matriz de correlación de los siguientes 19 elementos analizados: K, Na, Mg, Ca, Ti, Ba, Mn, Zn, Pb, Co, Cu, Sr, Li, Ni, V, Al, Fe, P y S. La matriz de correlación evidencia correlaciones significativas (superiores o cercanas a 0.70) entre los elementos mayoritarios, ya sean de origen inorgánico como orgánico. Así, los elementos K, Na, Mg, Ti, Al, Sr y Ca (origen detrítico inorgánico) presentan una correlación negativa significativamente elevada con los elementos de origen orgánico (Mn, P y S). La Fig. 19.6 muestra la matriz de correlación de varios elementos mayoritarios de origen inorgánico (Na, Mg, y Ti) con elementos de origen orgánico

(TOC y P), así como con otros parámetros paleolimnológicos también analizados en el testigo SAN135E (contenido en agua y granulometría).

	K	Na	Mg	Ca	Ti	Ba	Mn	Zn	Pb	Co	Cu	Sr	Li	Ni	V	Al	Fe	P	S
K	1.00																		
Na	0.61	1.00																	
Mg	0.65	<b>0.89</b>	1.00																
Ca	0.21	<b>0.85</b>	<b>0.81</b>	1.00															
Ti	<b>0.72</b>	<b>0.85</b>	<b>0.91</b>	<b>0.68</b>	1.00														
Ba	<b>0.92</b>	0.46	0.61	0.08	0.66	1.00													
Mn	-0.55	-0.65	-0.42	-0.33	-0.40	-0.35	1.00												
Zn	-0.26	-0.27	-0.09	-0.08	-0.14	-0.09	0.53	1.00											
Pb	0.43	0.31	0.56	0.36	0.54	0.49	0.22	0.03	1.00										
Co	-0.32	-0.48	-0.34	-0.38	-0.33	-0.20	0.52	0.39	-0.13	1.00									
Cu	-0.02	0.02	0.12	0.12	0.01	0.03	0.10	0.63	-0.02	0.10	1.00								
Sr	<b>0.80</b>	<b>0.91</b>	<b>0.91</b>	<b>0.69</b>	<b>0.95</b>	<b>0.70</b>	-0.52	-0.20	0.53	-0.43	0.04	1.00							
Li	<b>0.71</b>	0.30	0.48	0.02	0.62	<b>0.76</b>	-0.10	0.08	0.49	-0.03	0.13	0.59	1.00						
Ni	0.16	0.46	0.31	0.40	0.37	0.05	-0.29	-0.09	-0.02	-0.16	0.08	0.40	-0.02	1.00					
V	0.55	-0.03	0.23	-0.26	0.28	<b>0.74</b>	0.03	0.14	0.46	0.17	0.20	0.28	0.56	-0.17	1.00				
Al	<b>0.87</b>	0.39	0.58	0.04	<b>0.70</b>	<b>0.94</b>	-0.20	-0.06	0.59	-0.12	0.05	<b>0.69</b>	<b>0.89</b>	0.04	<b>0.75</b>	1.00			
Fe	0.28	0.30	0.62	0.39	0.59	0.42	0.39	0.28	<b>0.80</b>	0.12	0.11	0.49	0.53	0.05	0.38	0.54	1.00		
P	<b>-0.72</b>	<b>-0.79</b>	<b>-0.68</b>	-0.50	<b>-0.67</b>	-0.52	<b>0.87</b>	0.48	-0.11	0.44	0.07	<b>-0.76</b>	-0.36	-0.36	-0.11	-0.44	-0.06	1.00	
S	<b>-0.77</b>	<b>-0.72</b>	-0.59	-0.38	-0.62	-0.57	<b>0.90</b>	0.43	-0.03	0.49	0.05	<b>-0.73</b>	-0.43	-0.32	-0.19	-0.49	0.11	<b>0.94</b>	1.00

Fig. 19.5. Matriz de correlación de los principales 19 elementos mayoritarios analizados en el testigo SAN135E (Cubeta E). Los elementos asociados a aportes sedimentarios de origen inorgánico (p. ej., K, Na, Mg, Ti, Al, Sr, Ca) presentan una correlación significativamente positiva entre ellos. Asimismo, los elementos de origen inorgánico (los mencionados anteriormente) presentan una correlación significativamente negativa con los elementos asociados a la materia orgánica (P, S y Mn). Los elementos asociados a la materia orgánica (P, S, y Mn) presentan una correlación significativamente positiva entre ellos. Los números en negrita muestran correlaciones significativamente elevadas (superior o muy próximo a 0.70).

	Na	Mg	Ti	TOC	P	Contenido en agua	Granulometría
Na	1	<b>0.89</b>	<b>0.85</b>	<b>-0.87</b>	<b>-0.79</b>	-0.63	<b>0.70</b>
Mg		1	<b>0.91</b>	<b>-0.76</b>	-0.67	-0.54	0.43
Ti			1	<b>-0.72</b>	-0.67	-0.52	0.41
TOC				1	<b>0.90</b>	<b>0.68</b>	-0.58
P					1	<b>0.68</b>	-0.51
Contenido en agua						1	-0.57
Granulometría							1

Fig. 19.6. Matriz de correlación de: a) elementos mayoritarios de origen inorgánico (Na, Mg, Ti), b) parámetros relacionados con la materia orgánica (TOC y P), y c) contenido en agua y granulometría.

El análisis factorial, aplicado a la matriz formada por los 19 elementos especificados (variables) y por las 28 muestras estudiadas, permite establecer la agrupación de las distintas variables en el plano definido por los dos vectores que explican la mayor variabilidad (**Fig. 19.7**). Asimismo este análisis permite ver cómo se distribuyen las muestras según este nuevo espacio vectorial, lo cual facilita establecer la evolución geoquímica de la cuenca. El primer factor explica el 46.3% de la variabilidad, mientras que el segundo explica el 19.4% de la variabilidad, representando la suma de ambos el 65.7% de la variabilidad total del sistema analizado.

El primer factor (*Factor 1*) está definido principalmente en su extremo positivo por las variables Sr, Mg, Ti, K, Na, mientras que en su extremo negativo por las variables S y P. Este resultado es previsible a partir de los valores de la matriz de correlación (valores de correlación significativamente positivos entre las variables que forman cada uno de ambos grupos, y significativamente negativos entre ambos grupos de variables) (**Fig. 17.5 y 17.6**). El primer factor separa los aportes orgánicos ricos en P y S de los aportes terrígenos donde dominan el Ti, Mg, Sr, K, Al y Na (**Fig. 17.8**). El segundo factor (*Factor 2*) agrupa el V, Fe, Pb (y otros elementos metálicos) frente al Na, Ca y Ni (**Fig. 19.9**). Este segundo factor se encuentra relacionado probablemente con la actividad antrópica.

La distribución de las muestras, según ambos factores, separa netamente 3 poblaciones (**Fig. 19.10**): a) la primera, formada por las muestras 1 y 2 (muestras más superficiales, profundidad en SAN135E: 0-6 cm), muy influenciadas por el contenido en Fe, V y Pb; b) una segunda población formada por las muestras 3, 4, 5 y 6 (profundidad en SAN135E: 10-25 cm) muy influenciadas por Ca, Na y Ni; y finalmente c) una tercera agrupación de muestras que se distribuyen diagonalmente entre las anteriores (muestras anteriores al Episodio Sedimentario Detrítico (pre-ESD)).

La distribución de las muestras, en el plano definido por el *Factor 1* y *Factor 2*, permite determinar la evolución geoquímica del sedimento del Lago de Sanabria (**Fig. 19.10**). Las trayectorias geoquímicas muestran la existencia de un cierto patrón caracterizado por el desplazamiento progresivo de muestras que disminuyen su contenido en P y S (materia orgánica) a favor del enriquecimiento en Al, K, Ti, Mg, Sr (sedimento terrígeno inorgánico). Así, por ejemplo, a partir de las muestras 19, 18, 17 y 16 (profundidad en SAN135E: 76-90 cm), muy próximas entre sí, se produce un desplazamiento progresivo en diagonal (muestras 15, 14, 13) hacia el primer cuadrante (**Fig. 19.10 y 19.11**). Esta evolución indica el progresivo aumento en terrígenos en detrimento del P y S. A partir de la muestra 13 (base del horizonte estratigráfico NRI1, a 60 cm de profundidad) se inicia una recuperación hacia posiciones iniciales (muestras 12, 11, 10, 9 y 8). Estas excursiones en diagonal desde posiciones P-S hacia posiciones más alumínicas son frecuentes, como la excursión 24, 23, 22 y 21 (asociado al horizonte estratigráfico NRI2) (**Fig. 19.12**) y la excursión 28, 27, 26, 25 y 24 (**Fig. 19.13**).

Las evoluciones geoquímicas señaladas evidencian la importancia de los horizontes estratigráficos NRI (NRI1 y NRI2) en el desencadenamiento del giro de una excursión geoquímica. Así, para la excursión 24, 23, 22 y 21 (**Fig. 19.12**), el retorno a las condiciones iniciales comienza exactamente en la base estratigráfica del horizonte sedimentario NRI2 (muestra 22, profundidad 105 cm). Asimismo, para la excursión 16, 15, 14, 13, 12, 11, 10, 9, 8 y 7 (**Fig. 19.11**), el retorno a las condiciones iniciales comienza exactamente en la base estratigráfica del horizonte sedimentario NRI1 (muestra 13, profundidad 60 cm).

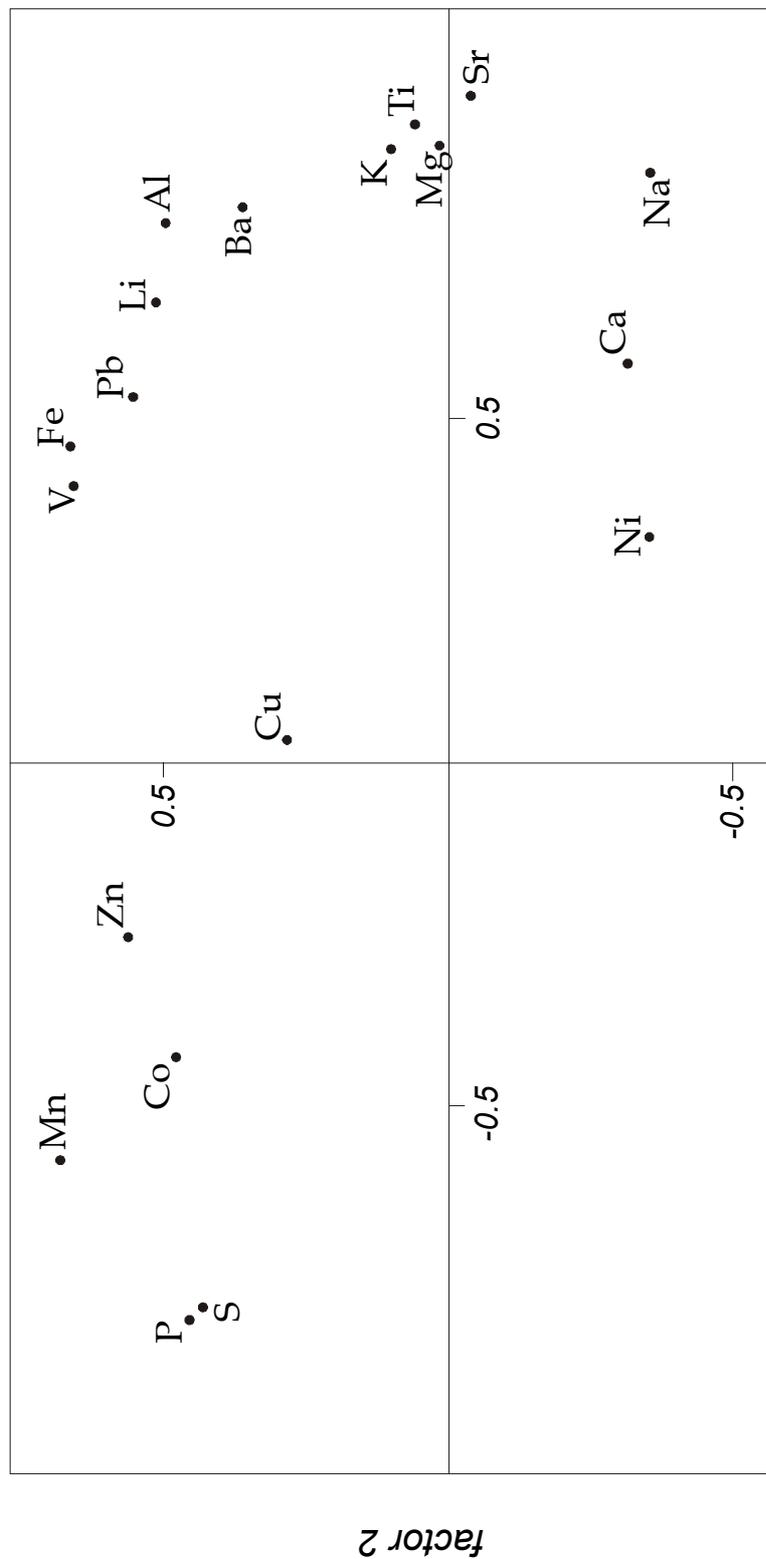


Fig. 19.7. Análisis factorial de los principales elementos geoquímicos mayoritarios analizados en el Lago de Sanabria (testigo SAN135E, Cubeta E).

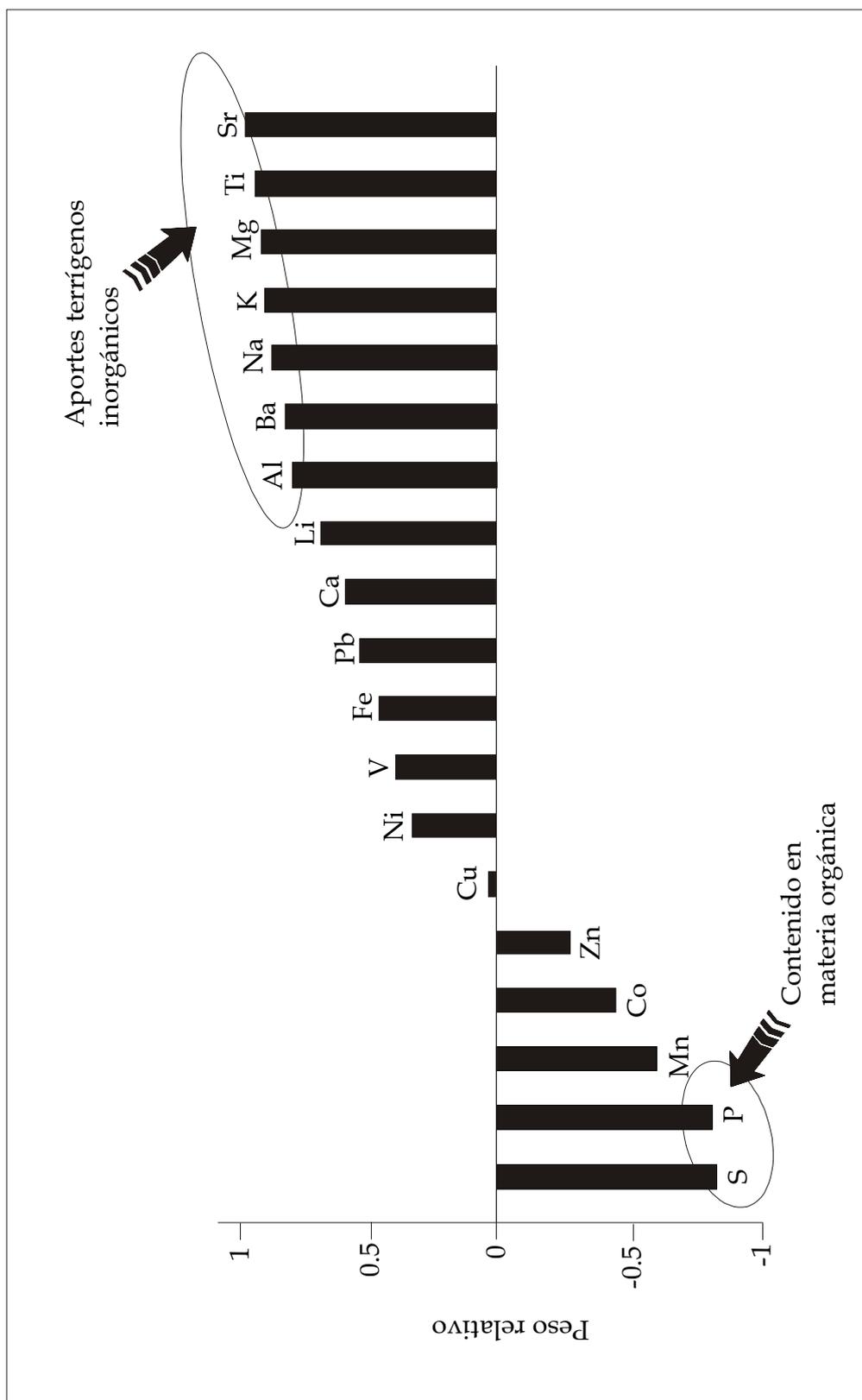
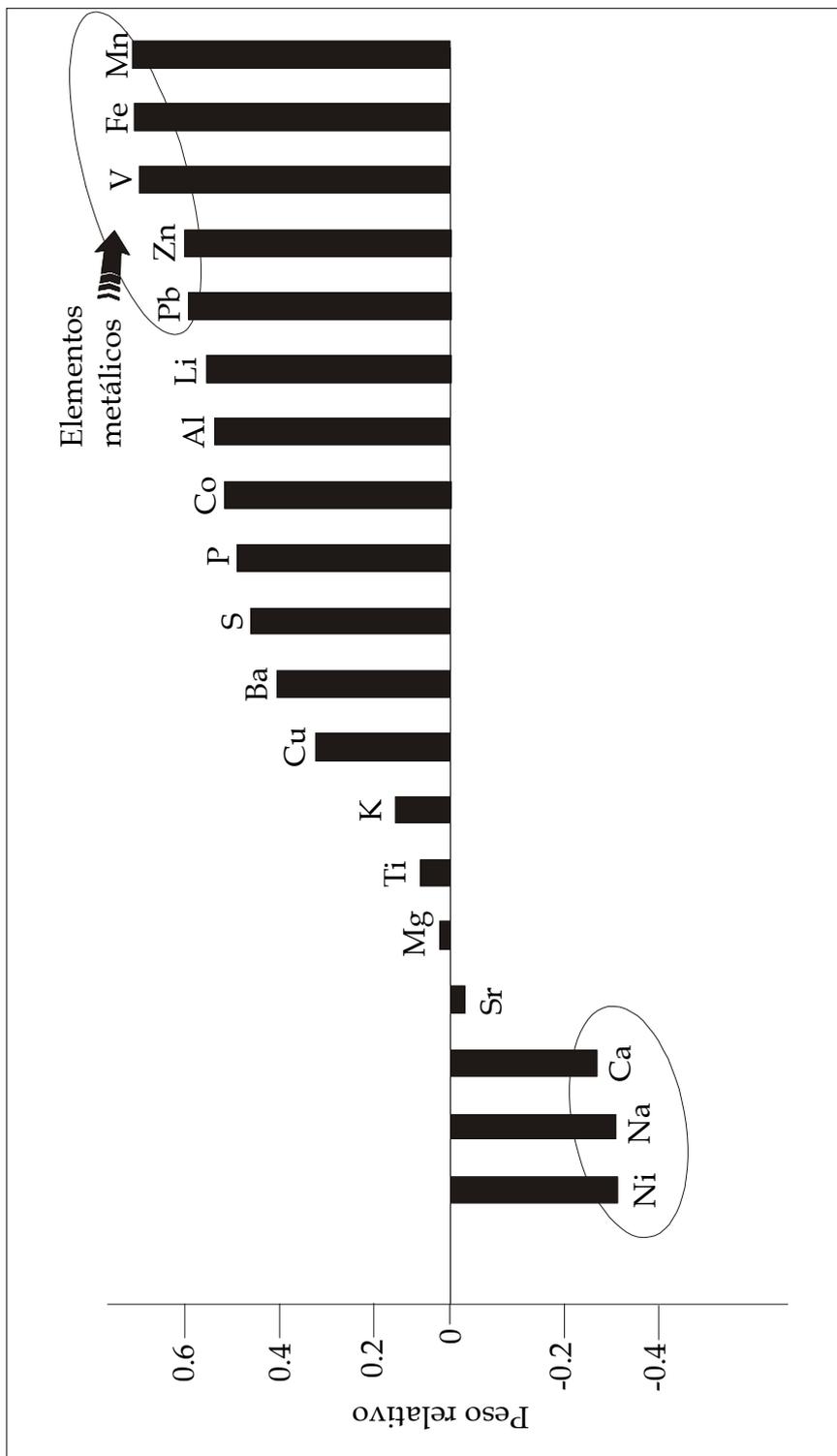


Fig. 19.8. Contribución de las 19 variables geoquímicas en el Factor 1 del Análisis Factorial realizado. El Factor 1 separa los aportes terrígenos inorgánicos (Sr, Ti, Mg, K, Na, Ba, Al) de los aportes de materia orgánica (S y P).



El grupo de elementos metálicos (V, Fe, Mn, Pb, Zn, Li, Al, Co, P, S, Ba, Cu, K, Ti, Mg, Sr) y el grupo de elementos no metálicos (Ni, Na, Ca) se muestran en el gráfico. Los elementos metálicos están representados por barras positivas y los no metálicos por barras negativas.

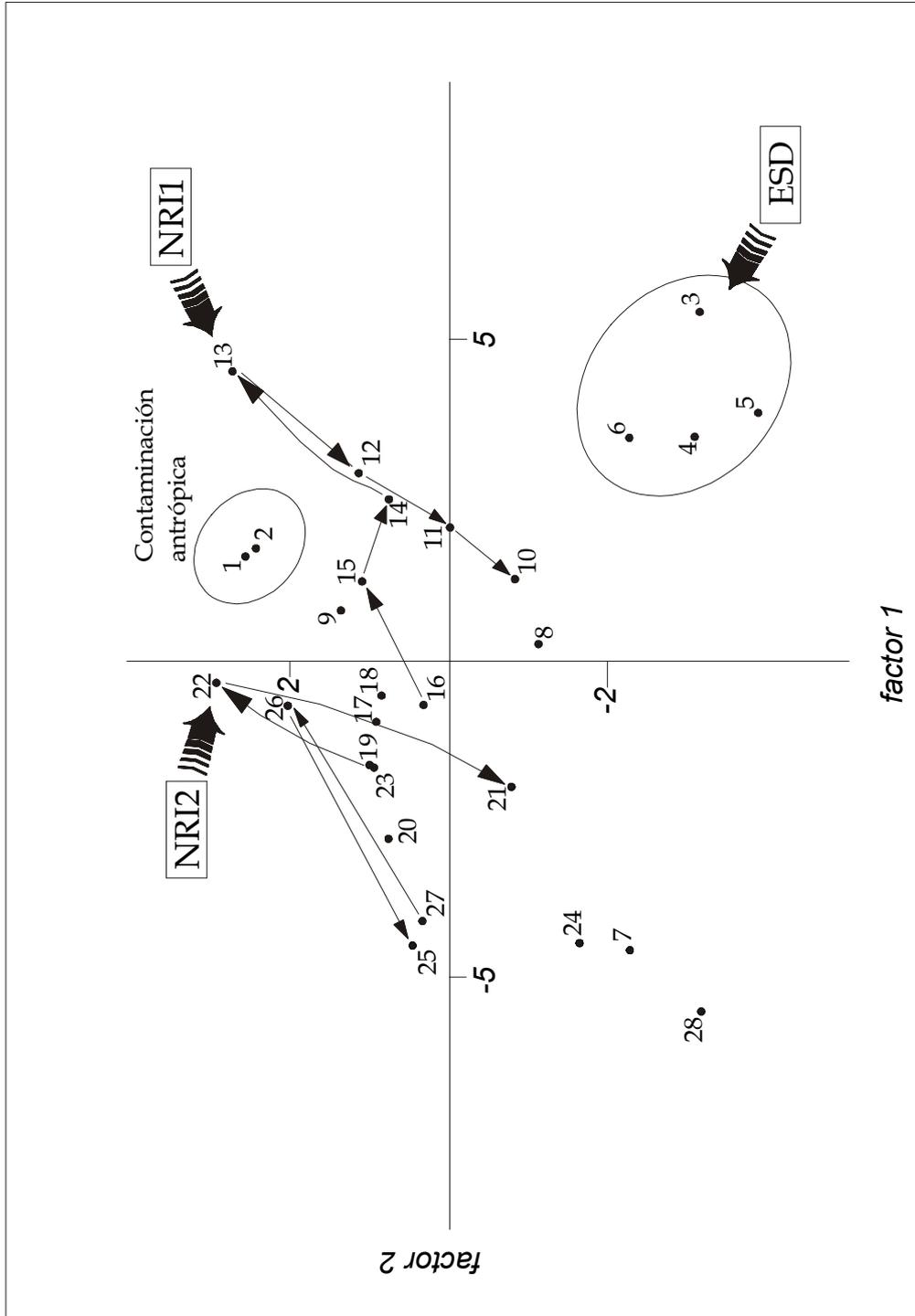
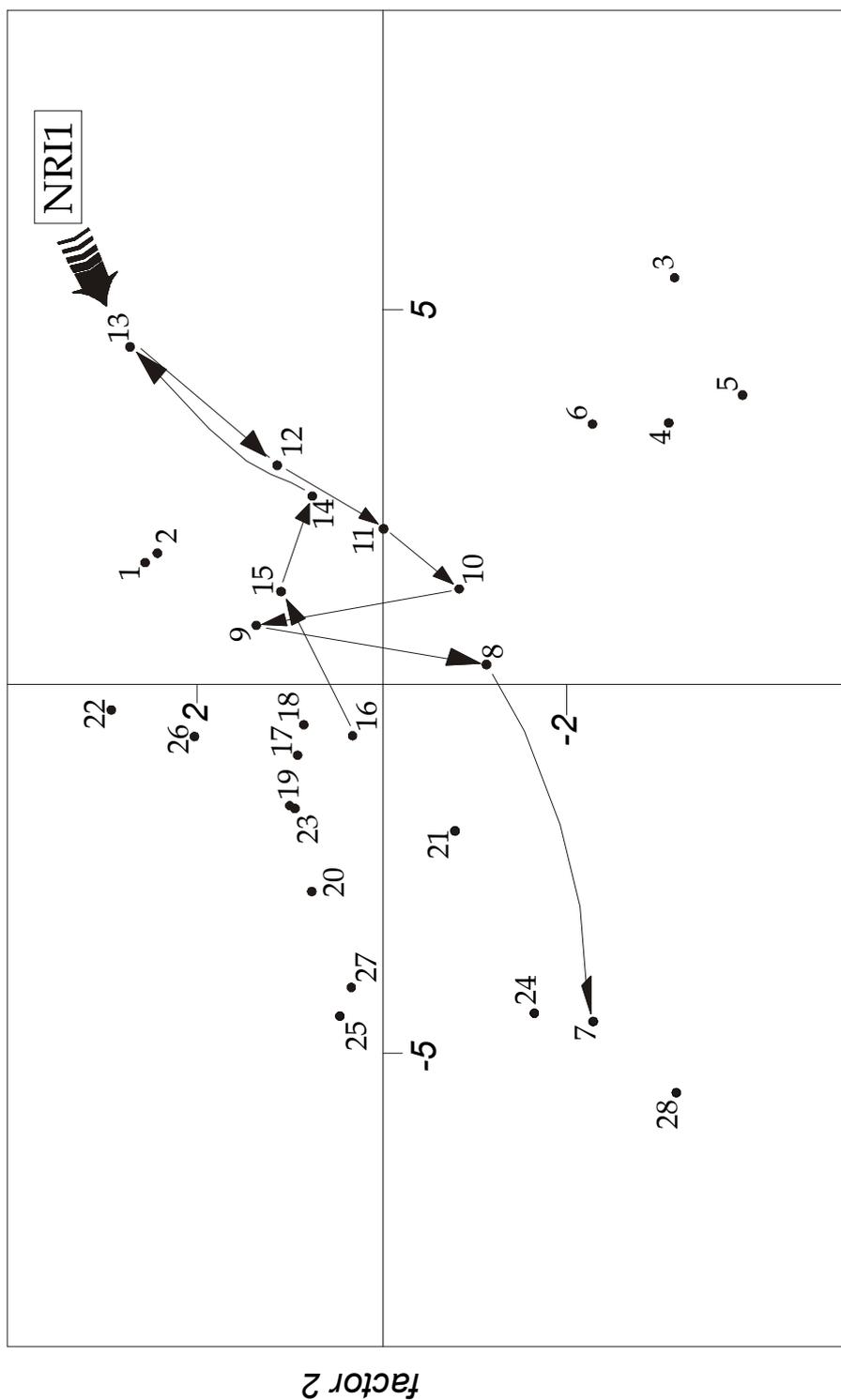
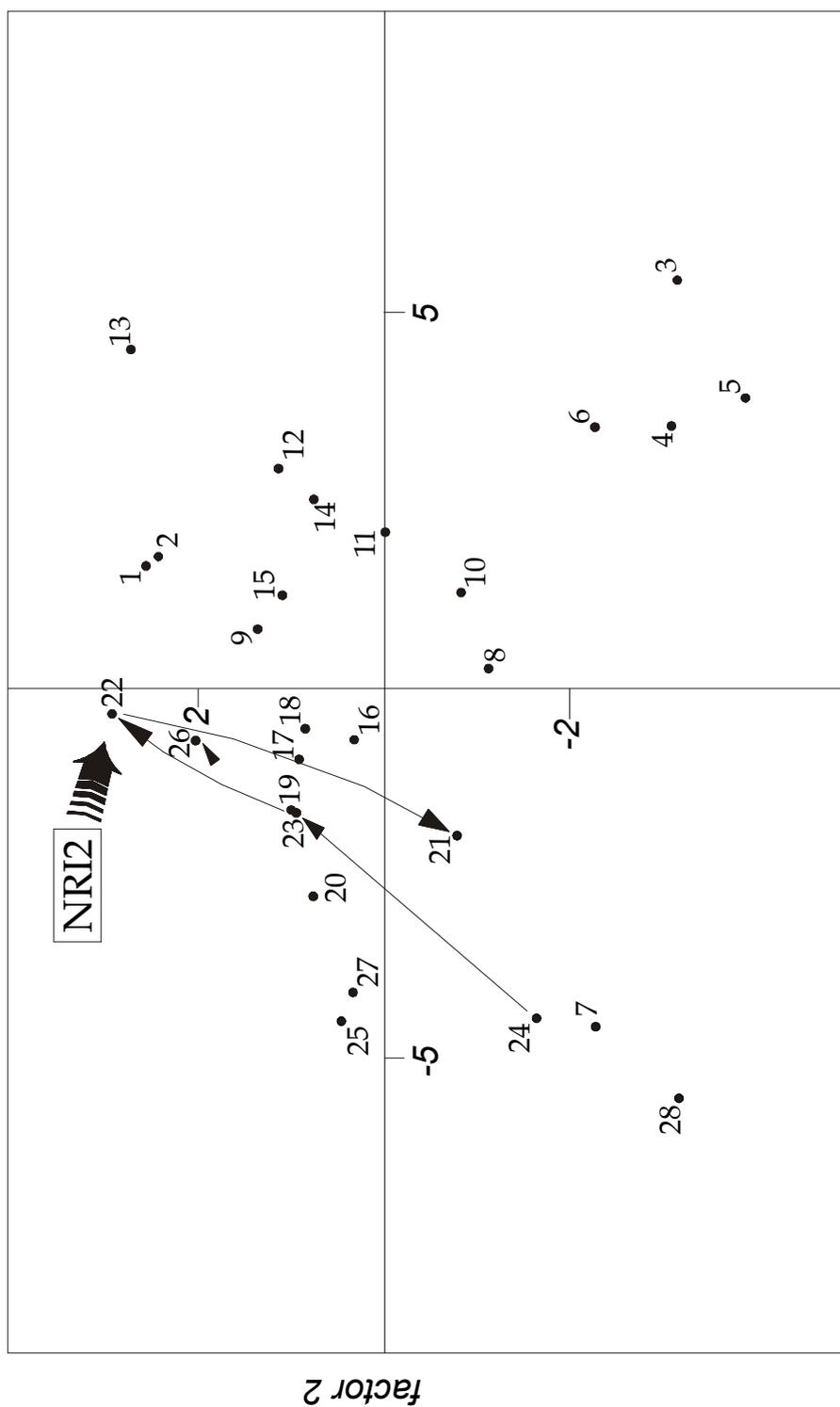


Fig. 19.10. Distribución de las muestras del análisis geoquímico en función del plano definido por el Factor 1 y el Factor 2. Se pueden identificar 3 poblaciones de muestras: a) muestras superficiales (post-ESD) influenciadas por contaminación antrópica, b) muestras pertenecientes al sedimento de la rotura de la presa Vega de Tera (ESD), y c) muestras pre-ESD evidencian 3 trayectorias geoquímicas caracterizadas por presentar excursiones en diagonal, desde posiciones más orgánicas (con elevados contenidos en P y S) hasta posiciones más terrígenas. Los horizontes estratigráficos NRI (NRI1 y NRI2) determinan el desencadenamiento del giro de una excursión geoquímica. La flechas indican la dirección y sentido de las excursiones geoquímicas.



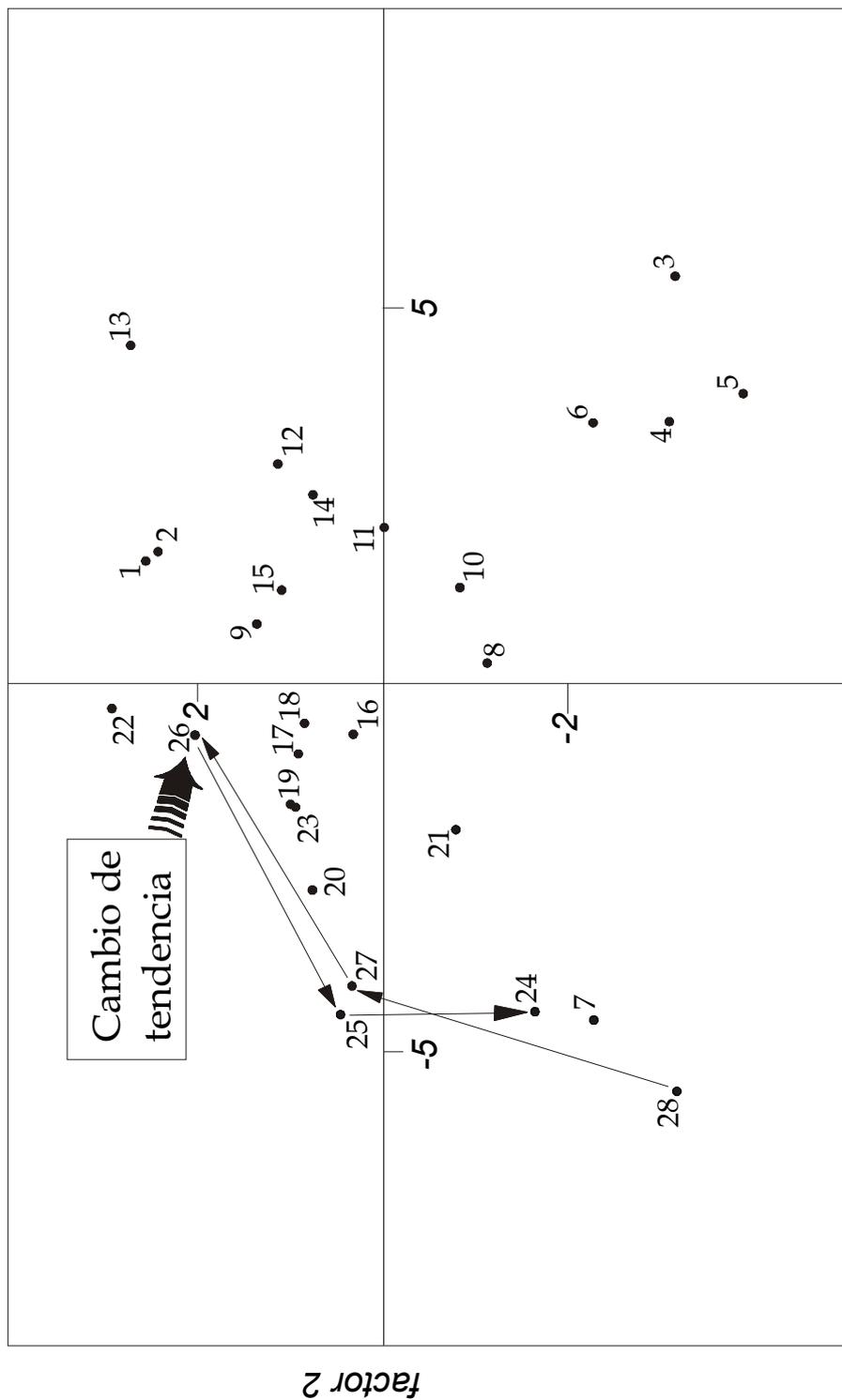
factor 1

Fig. 19.11. Excursión en diagonal desde posiciones P-S hacia posiciones más terrígenas, en el testigo SAN135E (desde la muestra 16 hasta la muestra 13). En la muestra 13 (60 cm de profundidad) se produce un giro brusco en la excursión geoquímica. El desencadenante de este giro brusco es el nivel estratigráfico NRI1.



factor 1

Fig. 19.12. Excursión en diagonal, desde posiciones P-S hacia posiciones más terrígenas, en el testigo SAN135E (desde la muestra 24 hasta la muestra 22). En la muestra 22 (105 cm de profundidad) se produce un giro brusco de la excursión geoquímica. El desencadenante de este giro brusco es el nivel estratigráfico NRI2.



factor 1

Fig. 19.13. Excursión en diagonal, desde posiciones P-S hacia posiciones más terrígenas, en el testigo SAN135E (desde la base de la secuencia sedimentaria hasta la muestra 26). En la muestra 26 (125 cm de profundidad) se produce un giro brusco de la excursión geoquímica.

Estos desplazamientos, indicados por la evolución geoquímica de los sedimentos, deben corresponder a cambios del comportamiento de la cuenca y parecen reflejar etapas de menor aporte orgánico, muy probablemente relacionadas con fases más áridas en la historia paleoambiental de la cuenca hidrográfica del Lago de Sanabria.

En conclusión, el análisis factorial permite diferenciar 3 grandes periodos: el más antiguo, que comprende desde las muestras 28 hasta la 7 (pre-ESD), está caracterizado por varias oscilaciones geoquímicas que siguen un mismo patrón de más P y S a más Al, y que se interpreta como cambios en el contenido de materia orgánica. El segundo periodo, que abarca desde la muestra 6 hasta la 3 (ESD), corresponde a la rotura de la presa Vega de Tera (1959 AD). El periodo más reciente corresponde a las muestras 1 y 2 (post-ESD), y se caracteriza por un incremento de metales (**Fig. 19.14** y **19.15**), debido a la influencia de la actividad antrópica. Esta influencia antrópica puede ser debida a las labores mineras, a la regulación hídrica de la cuenca del río Tera, o a la influencia de las tuberías existentes en la cuenca (están constituidas por Fe, V, etc.).

#### 19.5. Caracterización geoquímica del Episodio Sedimentario Detrítico (ESD).

El sedimento originado por la rotura de la presa Vega de Tera (horizonte estratigráfico ESD) ha sido caracterizado por unas condiciones geoquímicas bien diferenciadas del resto del limo orgánico (*gyttja*) (**Fig. 19.10**). Así, el horizonte ESD presenta una influencia terrígena inorgánica muy importante, como lo atestigua el Análisis Factorial (importante influencia del K, Al, Ti, Mg, Sr, Na, Ca).

El importante carácter detrítico inorgánico del horizonte ESD ha sido determinado, asimismo, por el Análisis de Componentes Principales (ACP) efectuado a los siguientes elementos y variables paleolimnológicas: a) Al, Ti, Na, Mg, K y P (**Fig. 19.16**) y b) Na, Mg, Ti, TOC, P, contenido en agua y granulometría (**Fig. 19.17**).

El análisis ACP evidencia, asimismo, las excursiones geoquímicas descritas en las **Fig. 19.11**, **19.12** y **19.13**, y subraya la importancia de los horizontes estratigráficos NRI (NRI1 y NRI2) en el desencadenamiento del giro de una excursión geoquímica (**Fig. 19.16** y **19.17**).

#### 19.6. Análisis Canónico del contenido en C, N y P.

El Análisis Canónico de Poblaciones, efectuado en el testigo SAN135E sobre los valores de TOC (*Total Organic Carbon*), TN (*Total Nitrogen*) y P (fósforo total), ha evidenciado la existencia de una tendencia global decreciente hacia techo del contenido en materia orgánica, con valores relativamente elevados en la base y valores relativamente bajos a techo (**Fig. 19.18**).

El Análisis Canónico de Poblaciones ha dividido las diferentes muestras que constituyen la secuencia sedimentaria en 3 poblaciones diferenciadas: población 3, población 2 y población 1.

- a) La población 3 está representada por las muestras más profundas del testigo SAN135E, entre la muestra 28 (base de la secuencia) hasta la muestra 22 (base del horizonte estratigráfico NRI2; profundidad 105 cm), conteniendo los valores más elevados en materia orgánica (C, N, y P).

CP	VAP	%Var.	% Acum.
1	2.851	71.26	71.26
2	1.048	26.20	97.46
3	0.060	1.49	98.95
4	0.042	1.05	100

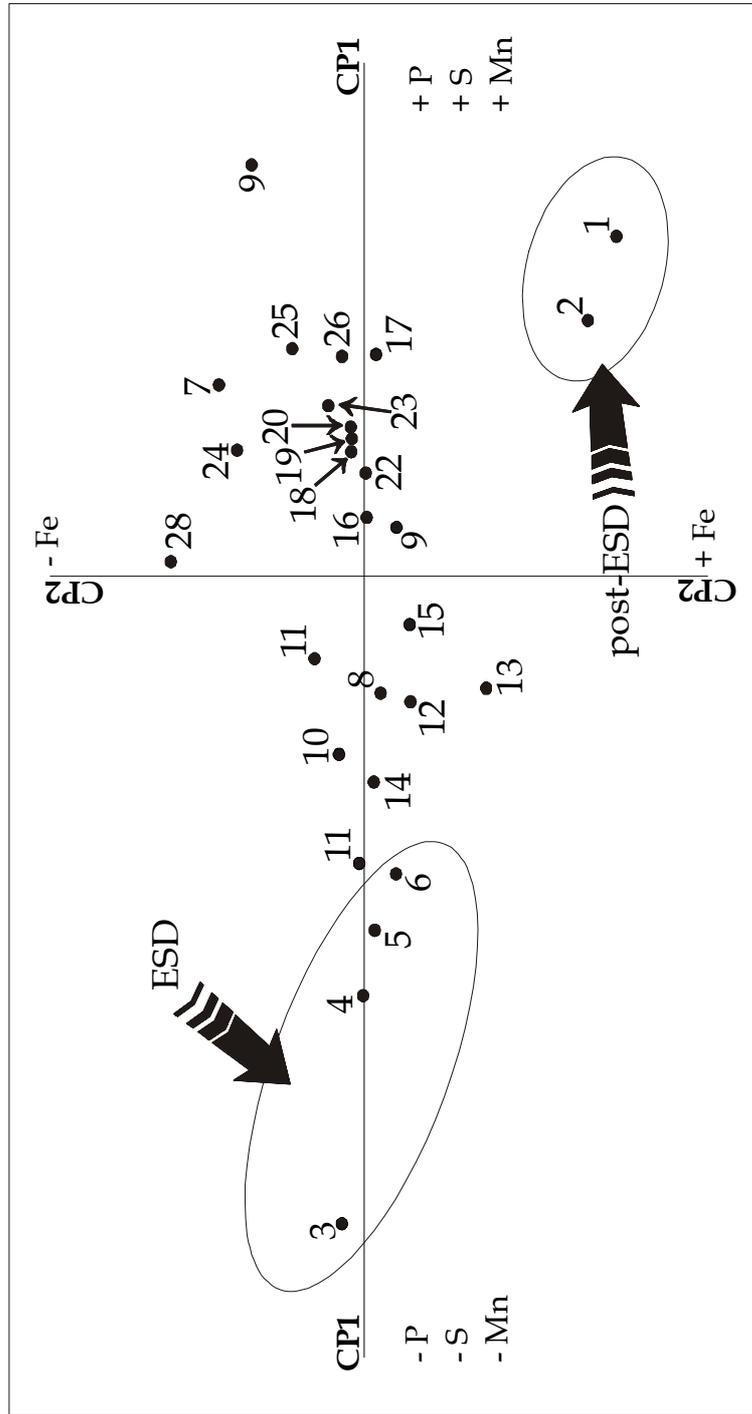


Fig. 19.14. Análisis de Componentes Principales (ACP) de las muestras geoquímicas del testigo SAN135E. Los elementos considerados han sido: P, S, Mn y Fe. Las muestras más superficiales (post-ESD) se caracterizan por presentar una mayor influencia de elementos metálicos (como ejemplo, el Fe) debido, probablemente, a la influencia antrópica.

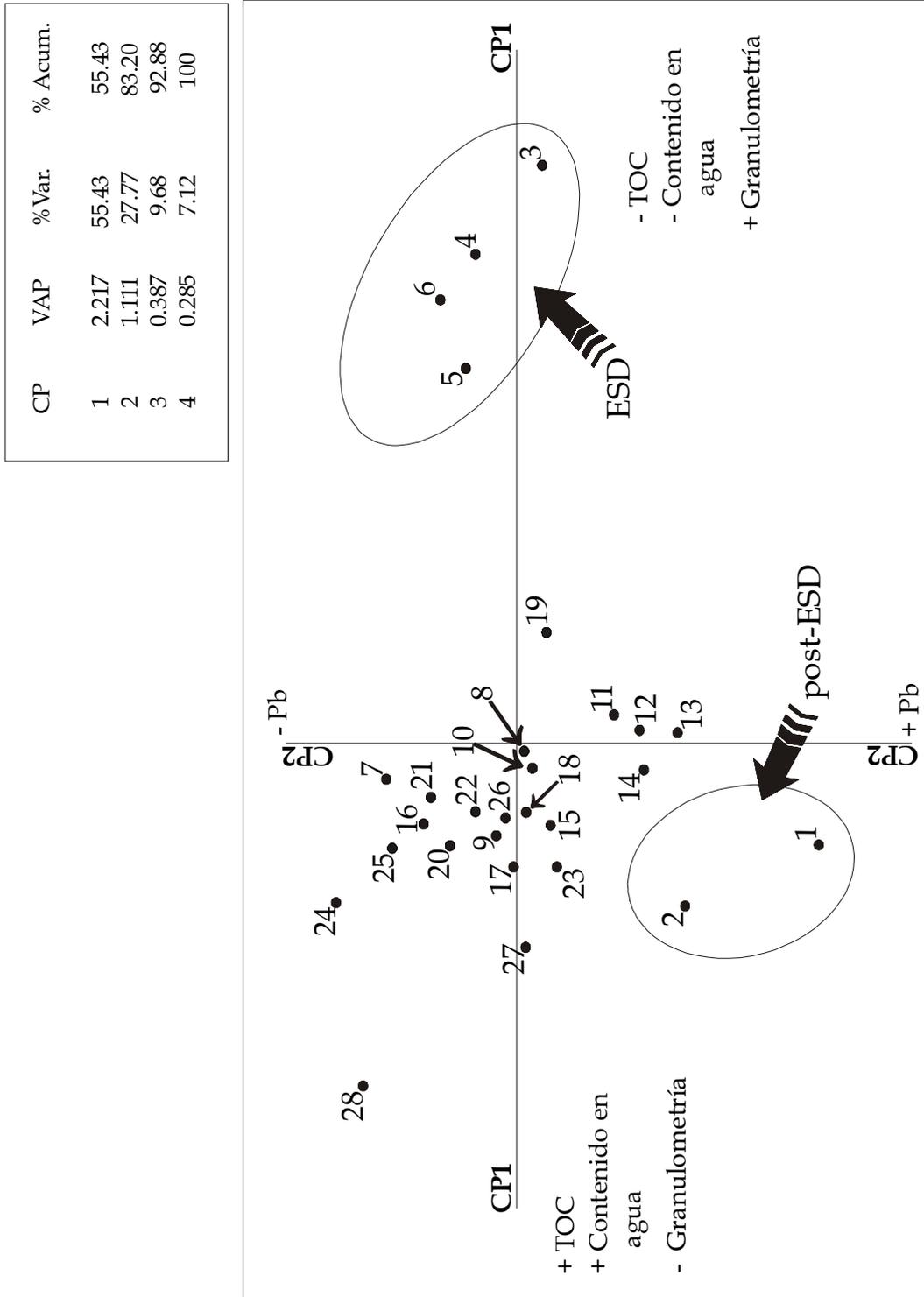


Fig. 19.15. Análisis de Componentes Principales (ACP) de las muestras geoquímicas del testigo SAN135E. Las variables paleolimnológicas consideradas han sido: TOC, contenido en agua, granulometría y Pb. Las muestras más superficiales (post-ESD) se caracterizan por presentar una mayor influencia de elementos metálicos (como ejemplo, el Pb) debido, probablemente, a la influencia antrópica.

CP	VAP	% Var.	% Acum.
1	4.510	75.14	75.14
2	0.857	14.29	89.43
3	0.452	7.53	96.96
4	0.086	1.44	98.40
5	0.073	1.22	99.62
6	0.023	0.38	100

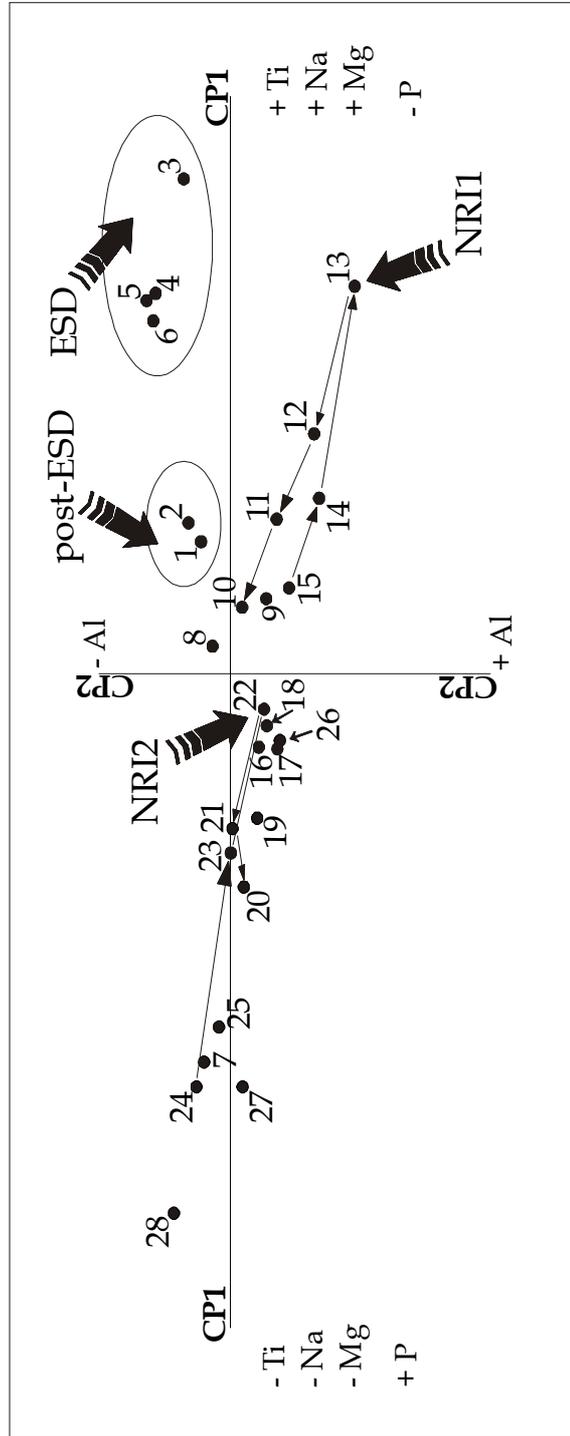


Fig. 19.16. Análisis de Componentes Principales (ACP) de las muestras geoquímicas del testigo SAN135E. Los elementos considerados han sido: Al, Ti, Na, Mg, K y P.

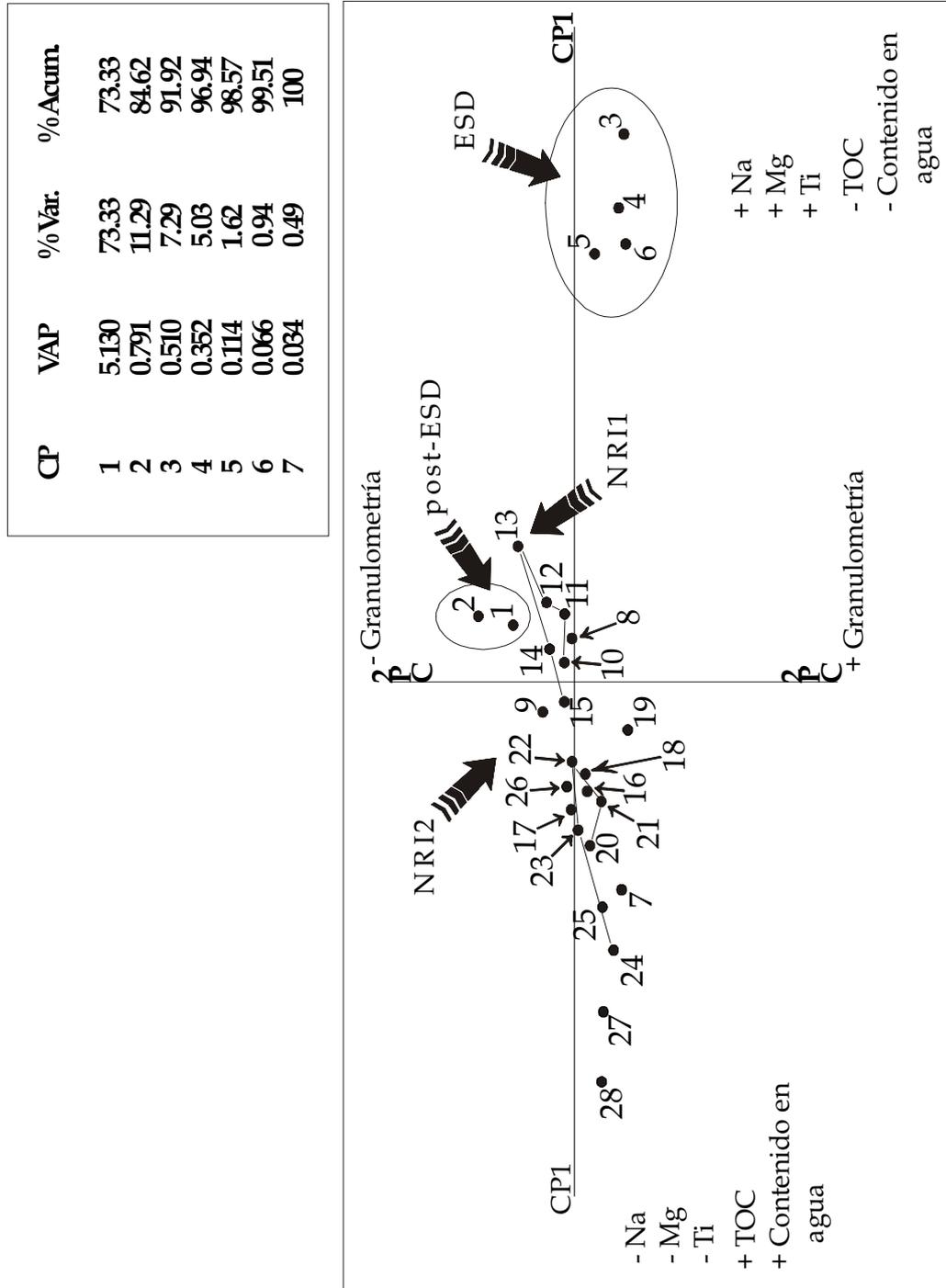


Fig. 19.17. Análisis de Componentes Principales (ACP) de las muestras del testigo SANI35E. Las variables paleolimnológicas consideradas han sido: Na, Mg, Ti, TOC, P, contenido en agua y granulometría.

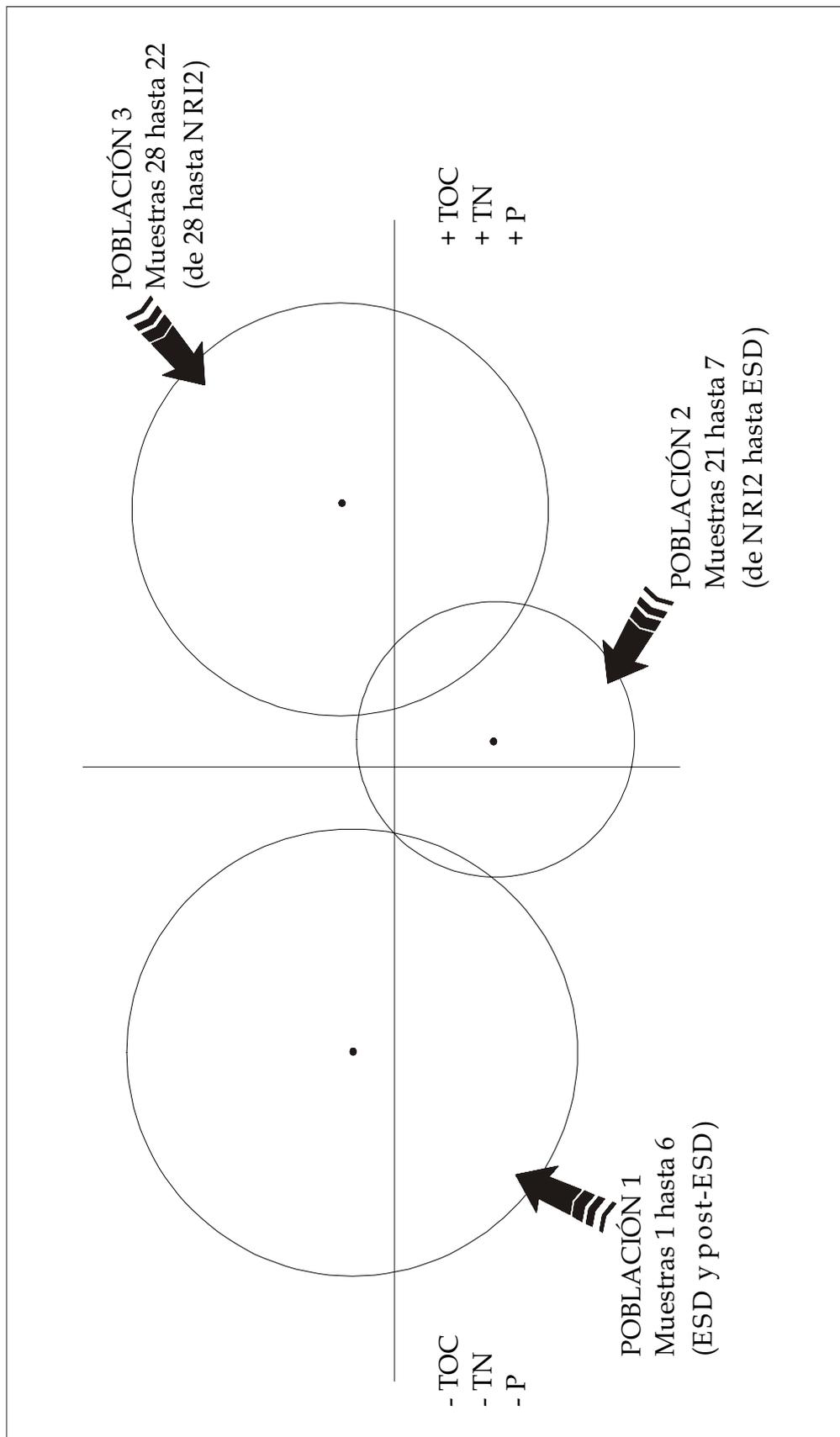


Fig. 19.18. Análisis Canónico de Poblaciones de las muestras de la secuencia sedimentaria (TOC, TN y P) del testigo SANI35E. Las muestras más profundas de la secuencia sedimentaria (población 3) presentan los valores más elevados en materia orgánica. Las muestras más superficiales (ESD y post-ESD) presentan los valores más bajos en materia orgánica.

- b) La población 2 está representada por las muestras intermedias de la secuencia sedimentaria, entre la muestra 21 (inicio de NRI2) hasta la muestra 7 (última muestra pre-ESD), conteniendo valores intermedios de materia orgánica.
- c) Finalmente, la población 1 está representada por las muestras más superficiales del testigo SAN135E, entre la muestra 6 (base del horizonte estratigráfico ESD) y la muestra 1 (muestra superficial de la secuencia), constituyendo, por lo tanto, los tramos ESD y post-ESD. La celda 1 contiene valores relativamente bajos de materia orgánica.

Los resultados obtenidos mediante Análisis Canónico de Poblaciones evidencian, nuevamente, la importancia de los niveles sedimentarios NRI y ESD en el control y determinación de gran parte de las variaciones en materia orgánica de la secuencia sedimentaria SAN135E (**Fig. 19.18**).

#### 19.7. Relaciones geoquímicas.

Las relaciones geoquímicas establecidas han sido las siguientes: K/Ca, Mg/Ca, Na/Ca, K/Na, K/Mg, Mg/Na y Al/Ti. La **Fig. 19.19** muestra los valores de estas relaciones geoquímicas en función de la profundidad (testigo SAN135E). Los resultados obtenidos han evidenciado la importancia de la existencia del horizonte estratigráfico NRI1 y ESD en la determinación de las principales tendencias observadas en los valores de las relaciones geoquímicas. Así, es posible distinguir 3 tipos diferentes de agrupaciones:

- a) Grupo de K/Ca, Mg/Ca, Na/Ca, K/Na, y K/Mg (**Fig. 19.19 a, b, c, d, e**): sus valores aumentan progresivamente desde la base del testigo hasta una profundidad situada aproximadamente en 64 cm. A partir de los 64 cm de profundidad, la relación geoquímica cambia significativamente su comportamiento, para comenzar una tendencia de decrecimiento progresivo que perdurará hasta el techo del testigo. El cambio de tendencia en las relaciones geoquímicas coincide exactamente con el comienzo del horizonte estratigráfico NRI1.
- b) Grupo de Mg/Na (**Fig. 19.19 f**): su valor no presenta ninguna tendencia creciente o decreciente significativa antes del horizonte estratigráfico NRI1, manteniendo unos valores relativamente constantes. No obstante, los valores de Mg/Na son relativamente bajos durante los horizontes estratigráficos NRI1 y ESD.
- c) Grupo Al/Ti (**Fig. 19.19 g**): su valor no presenta ninguna tendencia creciente o decreciente significativa antes del horizonte estratigráfico ESD. No obstante, durante el horizonte ESD los valores de Al/Ti son relativamente bajos.

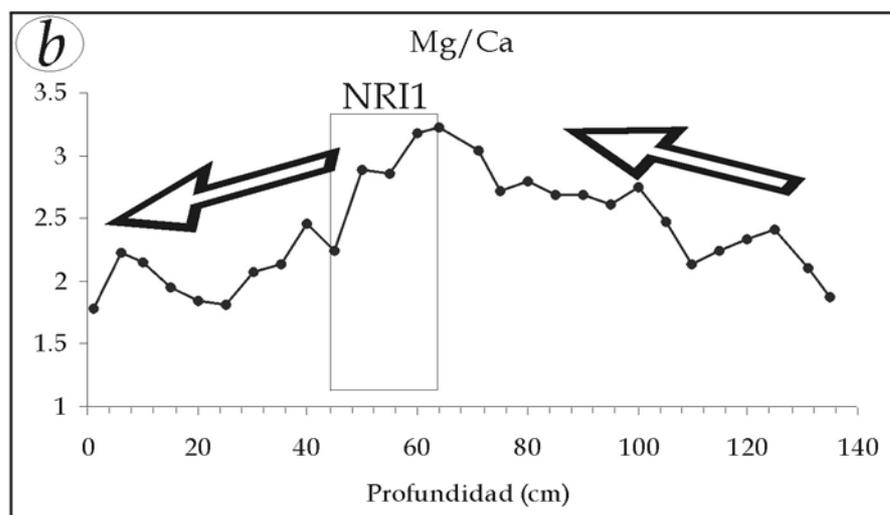
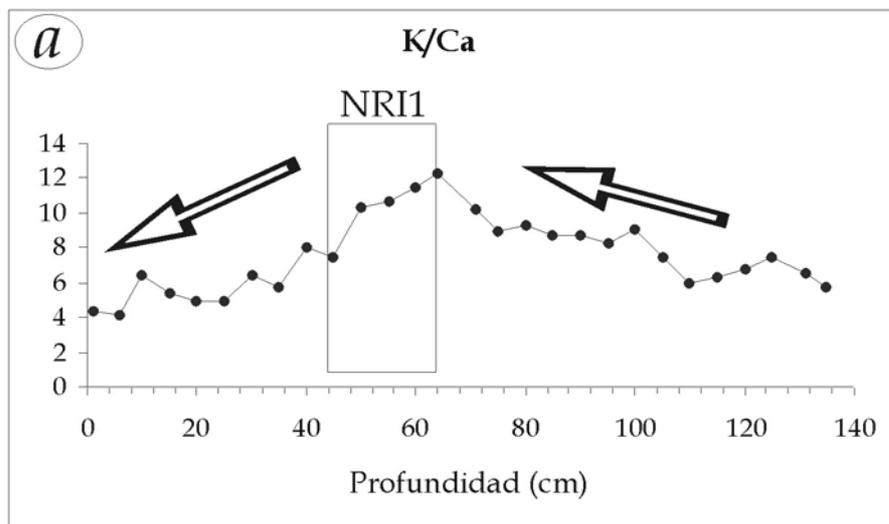


Fig. 19.19. Evolución de las relaciones geoquímicas (K/Ca y Mg/Ca) del testigo SAN135E y situación del horizonte estratigráfico NRI1.

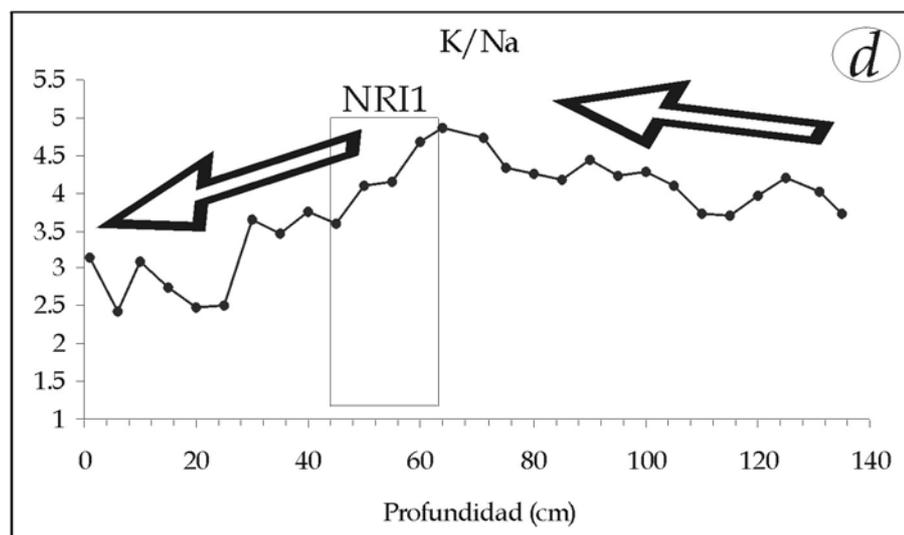
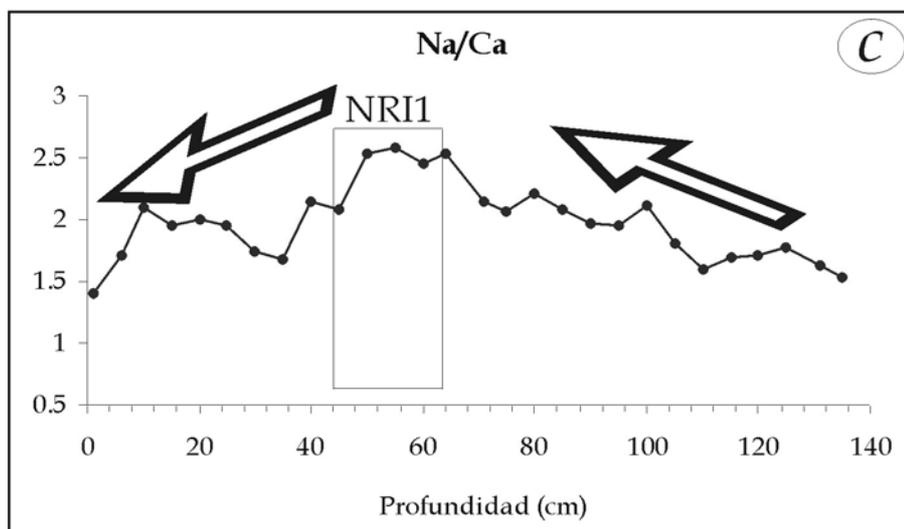


Fig. 19.19. Evolución de las relaciones geoquímicas (Na/Ca y K/Na) del testigo SAN135E y situación del horizonte estratigráfico NRI1.

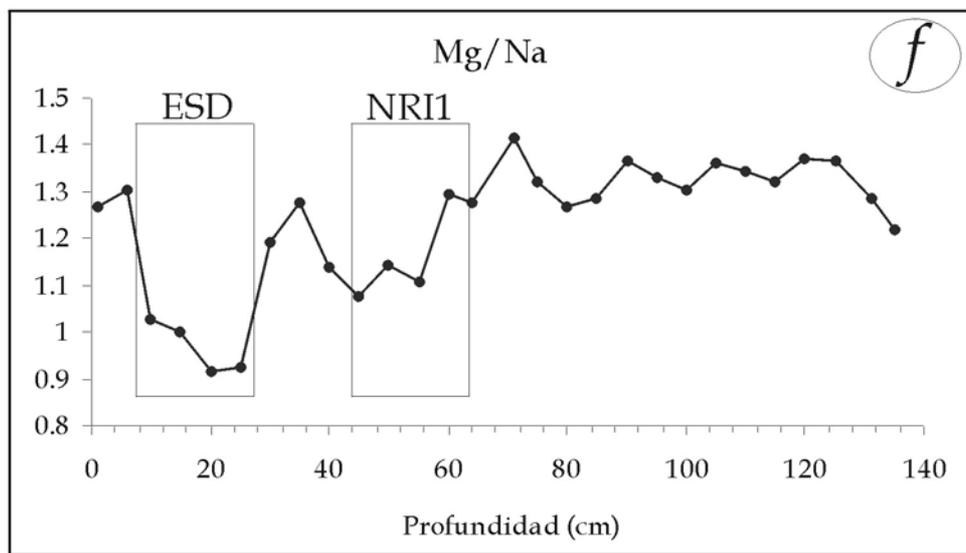
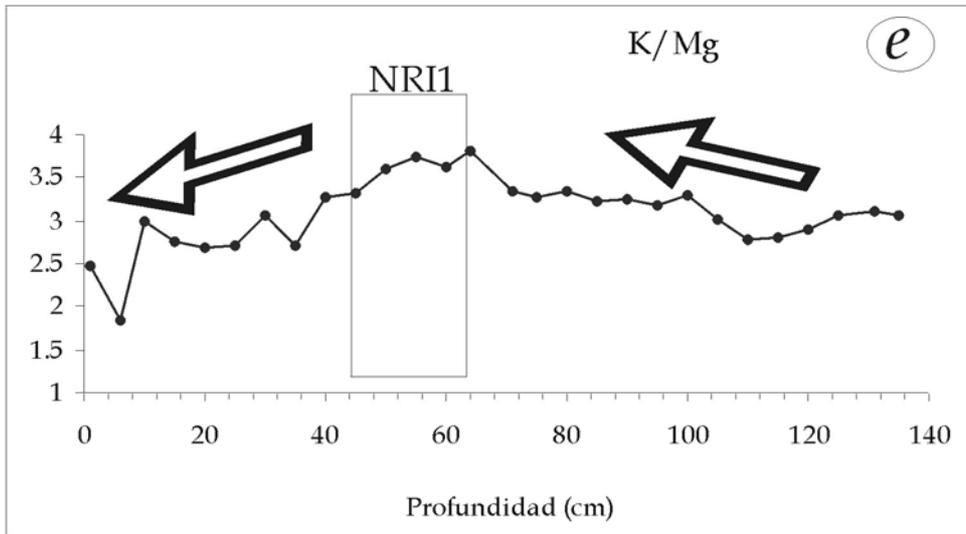


Fig. 19.19. Evolución de las relaciones geoquímicas (K/Mg y Mg/Na) del testigo SAN135E y situación del horizonte estratigráfico NRI1 (19 e, f) y del horizonte ESD (19 f).

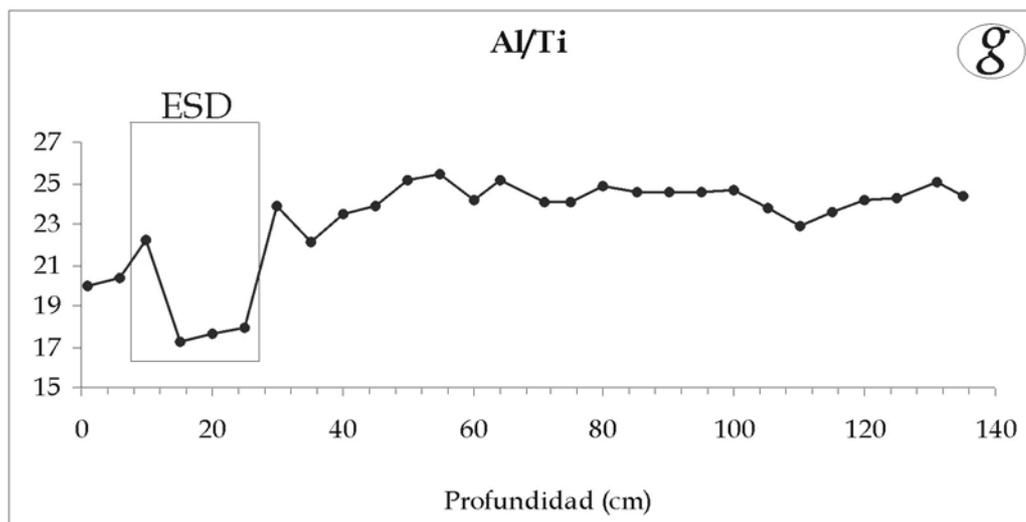


Fig. 19.19. Evolución de la relación geoquímica Al/Ti del testigo SAN135E y situación del horizonte estratigráfico ESD.

## Subcapítulo 20. CONTENIDO EN DIATOMEAS DEL SEDIMENTO DEL LAGO DE SANABRIA.

El contenido en diatomeas del sedimento lacustre constituye un parámetro paleoambiental importante en numerosos estudios paleolimnológicos. La abundancia y distribución de las diatomeas en un sistema lacustre se encuentra controlado fuertemente por las condiciones físico-químicas y los procesos sedimentarios existentes (Battarbee, 1986; Cameron et al., 1999). Así, las diatomeas se utilizan para las reconstrucciones paleoambientales, existiendo funciones de transferencia que permiten reconstruir el pH y los nutrientes (p. ej., Cameron et al., 1999).

La determinación del contenido en diatomeas del sedimento del Lago de Sanabria ha sido realizada por el Área de Ecología (Facultad de Biología) de la Universidad de Salamanca. La preparación de las muestras ha seguido el protocolo standard especificado para el estudio de las diatomeas en los sedimentos lacustres (Battarbee, 1986).

El contenido en diatomeas ha sido determinado en el testigo SAN135E (cubeta oriental), cada 1 cm de profundidad. Los resultados obtenidos han sido comparados, en el mismo testigo sedimentario, con parámetros paleolimnológicos relacionados con el contenido en materia orgánica: estos parámetros son el *Total Organic Carbon (TOC)* y el fósforo total (PT).

### 20.1. Caracterización cualitativa de las diatomeas del sedimento.

Las principales especies de diatomeas identificadas en el sedimento del Lago de Sanabria se muestran en la **Tabla 20.1**. Las diatomeas pertenecientes al orden Centrales tienen poca diversidad, estando representadas únicamente por un 10.8% del total de las especies de diatomeas. En cambio, las diatomeas Pennales presentan una diversidad mucho mayor (constituyen el 89.2% del total de especies). Las diatomeas Centrales proceden del fitoplancton del Lago de Sanabria, mientras que las diatomeas Pennales proceden de los ambientes bentónicos y fluviales del perímetro del lago. Las especies Centrales detectadas en el sedimento corresponden a las diatomeas más abundantes actualmente presentes en el fitoplancton del agua del lago (*Aulacoseira distans*, *Cyclotella stelligera*, y *Cyclotella glomerata*) (De Hoyos, 1996).

### 20.2. Caracterización cuantitativa de las diatomeas del sedimento.

El contenido total de valvas de diatomeas del testigo SAN135E (cubeta oriental) se muestra en la **Fig. 20.1**. El análisis evidencia la existencia de importantes fluctuaciones de orden mayor en la concentración de diatomeas, determinadas por la presencia de 3 tramos sedimentarios con valores relativamente bajos. Estos tramos coinciden con el Episodio Sedimentario Detrítico (ESD) y los niveles NRI (NRI1 y NRI2) (**Fig. 20.1**). Por lo tanto, las principales variaciones en el contenido de diatomeas del sedimento, en el testigo SAN135E, están determinadas por los horizontes sedimentarios ESD, NRI1 y NRI2. Asimismo, la secuencia sedimentaria evidencia una disminución paulatina hacia techo en la concentración de valvas de diatomeas.

Principales especies de diatomeas presentes en el sedimento	
Diatomea	Orden
<i>Aulacoseira distans</i> (Ehrenb) Simonsen	Centrales (planctónicas)
<i>Cyclotella stelligera</i> Cleve & Grunov	
<i>Cyclotella glomerata</i> Bachmann	
<i>Fragillaria</i> sp.	Pennaes (bentónicas)
<i>Tabellaria</i> sp.	
<i>Eunotia</i> sp.	
<i>Cymbella</i> sp.	
<i>Gomphonema</i> sp.	
<i>Navicula</i> sp.	
<i>Pinnularia</i> sp.	
<i>Surirella</i> sp.	
% especies Centrales	10.80%
% especies Pennales	89.20%

Tabla 20.1. Principales diatomeas identificadas en el sedimento del Lago de Sanabria. Las diatomeas Centrales (*Aulacoseira distans*, *Cyclotella stelligera*, y *Cyclotella glomerata*) constituyen las especies más abundantes presentes actualmente en el fitoplancton del lago (De Hoyos, 1996). Las especies Pennales proceden de los ambientes bentónicos y fluviales del perímetro lacustre, y presentan una mayor diversidad de sus especies.

El contenido en diatomeas por especies (**Fig. 20.2**) evidencia el desarrollo de ciertas diatomeas en determinados tramos de la secuencia sedimentaria SAN135E, siendo las especies más representativas las diatomeas: a) *Aulacoseira distans*, b) *Cyclotella stelligera* y c) *Tabellaria*.

a) *Aulacoseira distans*: constituye la principal diatomea del total de valvas contadas (valor medio: 75.8%, con valores máximos de hasta un 85-90%). Las principales variaciones en la concentración de esta diatomea se encuentran determinadas fundamentalmente por la existencia de los horizontes sedimentarios ESD y NRI (NRI1 y NRI2) (**Fig. 20.1 y 20.2**). Así, los horizontes ESD y NRI provocan una disminución importante en la concentración de valvas, apreciándose, de forma más acusada, en los niveles ESD y NRI1.

b) *Cyclotella stelligera*: se encuentra representada exclusivamente en los primeros 27 cm de la secuencia, coincidiendo con el inicio del horizonte ESD (edad: 1959 AD) (**Fig. 20.2**). Durante el ESD se alcanzan los valores mínimos.

## Contenido total de valvas de Diatomeas Testigo SAN135E

(millones valvas/g sedimento)

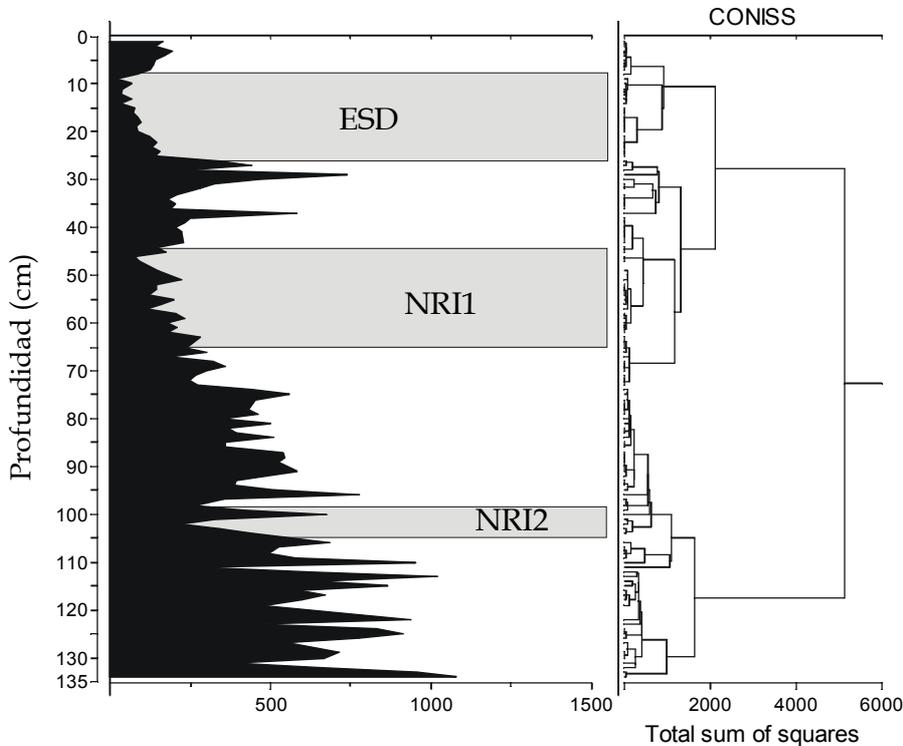


Fig. 20.1. Contenido total de valvas de diatomeas del sedimento del Lago de Sanabria (testigo SAN135E). Las principales variaciones en la concentración de diatomeas se encuentran determinadas fundamentalmente por la presencia de los horizontes ESD y NRI (NRI1 y NRI2). Durante estos 3 niveles, las concentraciones presentan valores relativamente bajos.

c) *Tabellaria*: presenta concentraciones relativamente elevadas en la base de la secuencia SAN135E, pero experimenta una importante disminución a partir del horizonte sedimentario NRI2. Esta disminución se estabiliza con valores relativamente constantes desde el horizonte NRI2 hasta el techo de la secuencia (**Fig. 20.2**).

Las valvas más abundantes del sedimento del Lago de Sanabria están representadas por la diatomea central *Aulacoseira distans* (**Fig. 20.2**). El 81.0% del total de valvas pertenecen a diatomeas Centrales; únicamente un 19.0% está representado por diatomeas Pennales (**Fig. 20.3**). Por lo tanto, las variaciones en las concentraciones de diatomeas en el sedimento están determinadas fundamentalmente por las diatomeas del orden Centrales (planctónicas).

## Contenido en Diatomeas Testigo SAN135E

(millones valvas/g sedimento)

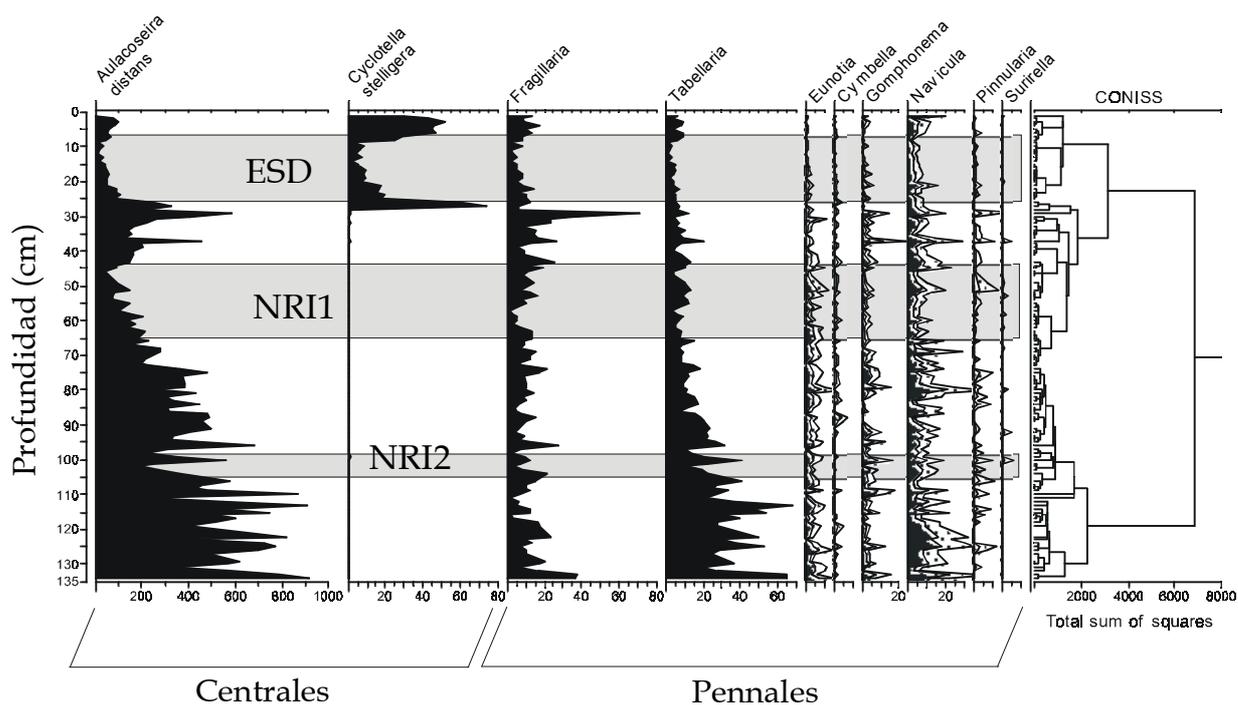


Fig. 20.2. Contenido de valvas de diatomeas, por especies, en el sedimento del Lago de Sanabria. Las diatomeas Centrales constituyen el 81.0% de las valvas totales. 'Aulacoseira distans' es la diatomea más abundante, representando un 75.8% del total de valvas. Los horizontes ESD y NRI (NRI1 y NRI2) determinan gran parte de las variaciones detectadas en las concentraciones de las diatomeas.

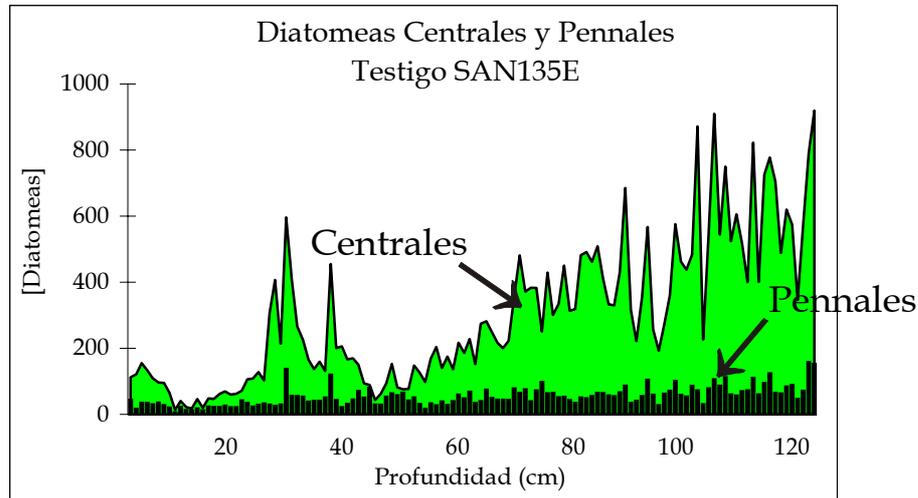


Fig. 20.3. Diatomeas del orden Centrales y Pennales en el sedimento del Lago de Sanabria (testigo SAN135E). El 81.0% del total de valvas pertenecen a diatomeas Centrales; únicamente un 19.0% está representado por diatomeas Pennales. Las variaciones en las concentraciones de diatomeas están determinadas fundamentalmente por las diatomeas del orden Centrales (planctónicas). La concentración de diatomeas está expresada en  $10^6$  valvas/g sedimento.

### 20.3. Relación entre el contenido de diatomeas y el contenido de C y P del sedimento.

El contenido en diatomeas de la secuencia sedimentaria SAN135E ha sido comparado con el contenido en carbono orgánico total (TOC) y el contenido en fósforo total (PT) (Fig. 20.4). El contenido en nitrógeno total (TN) no ha sido representado debido a la elevada correlación presentada con el TOC ( $r^2 = 0.98$ ). El TOC presenta un valor cada 1 cm de profundidad, mientras que el PT es de cada 5 cm de profundidad.

El perfil del contenido en diatomeas evidencia un paralelismo significativo con las tendencias establecidas por el contenido en TOC y PT. Así, los horizontes sedimentarios ESD y NRI (NRI1 y NRI2) están asociados a contenidos relativamente bajos en cada uno de los parámetros paleolimnológicos considerados. El contenido en C, P y diatomeas evidencia una tendencia decreciente de sus valores hacia techo.

La correlación entre el TOC y el contenido en diatomeas es positiva ( $r^2 = 0.56$ ). Si consideramos únicamente las muestras con una concentración de diatomeas inferior a  $400 \times 10^6$  valvas/g la correlación es más alta ( $r^2 = 0.64$ ) (Fig. 20.5 a,b). La correlación entre el PT y el contenido en diatomeas es positiva ( $r^2 = 0.50$ ) (Fig. 20.6).

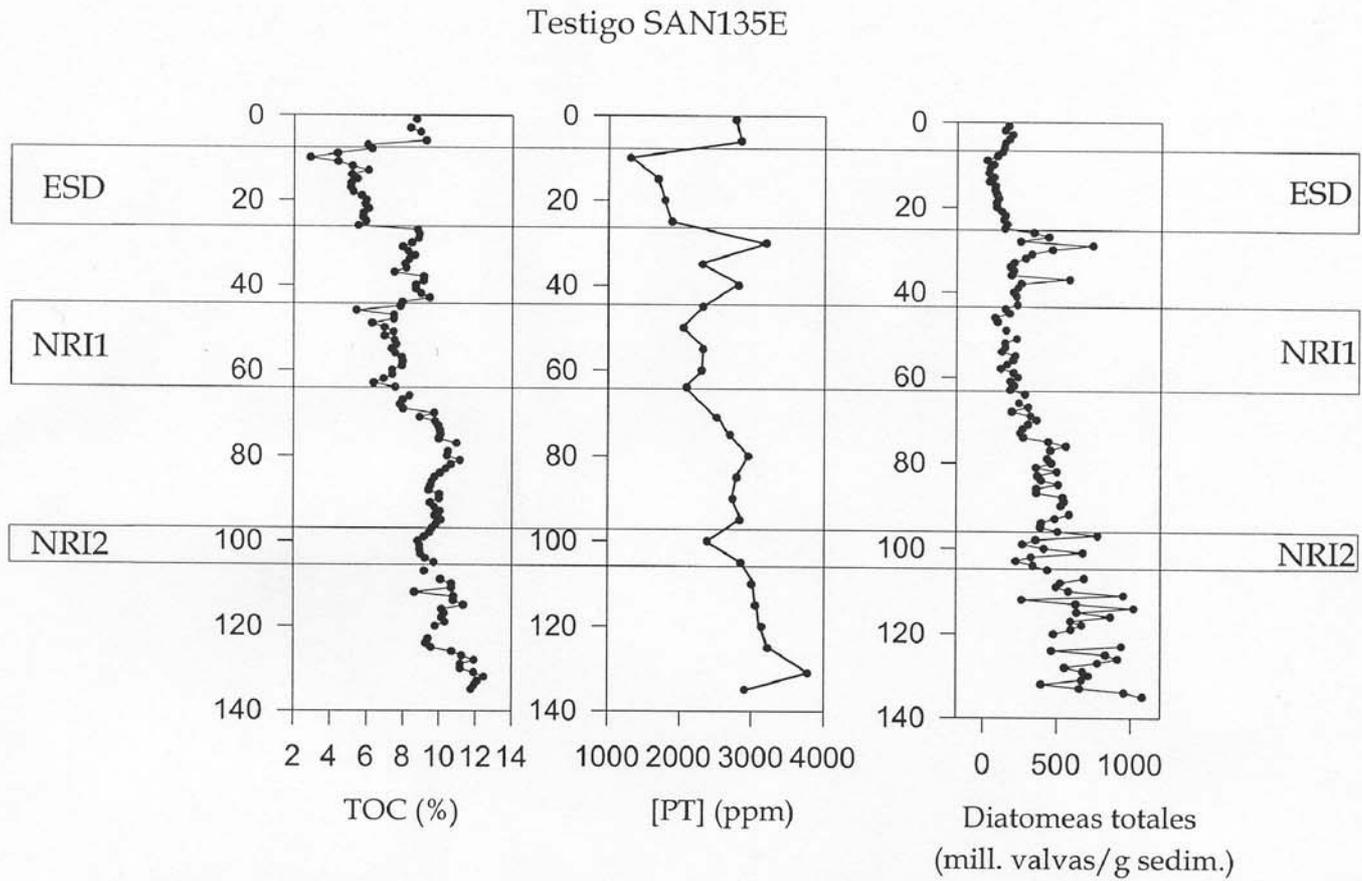


Fig. 20.4. Contenido en carbono orgánico total (TOC), fósforo total (PT), y contenido total de valvas de diatomeas, en la secuencia sedimentaria SAN135E. El contenido de diatomeas presenta un paralelismo significativo con el TOC y el PT. Los horizontes sedimentarios ESD y NRI (NRI1 y NRI2) determinan valores relativamente bajos en los 3 parámetros paleolimnológicos.

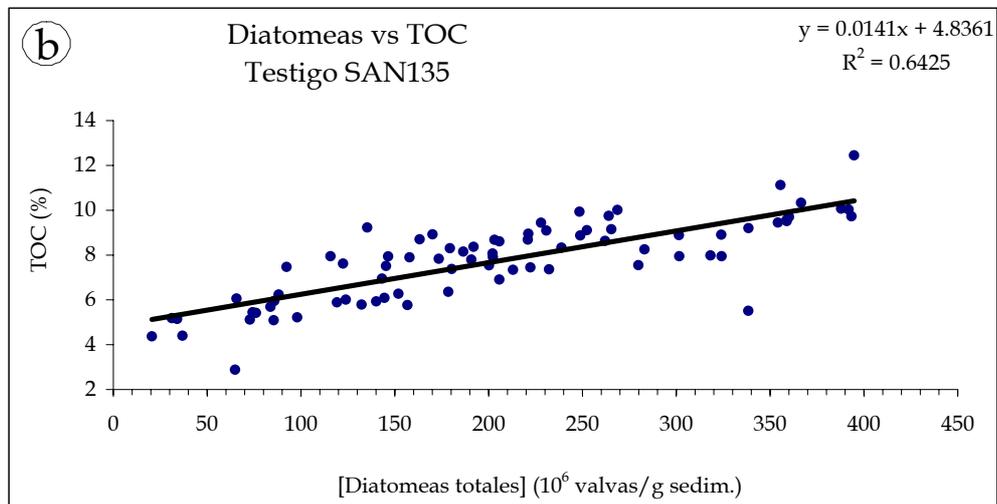
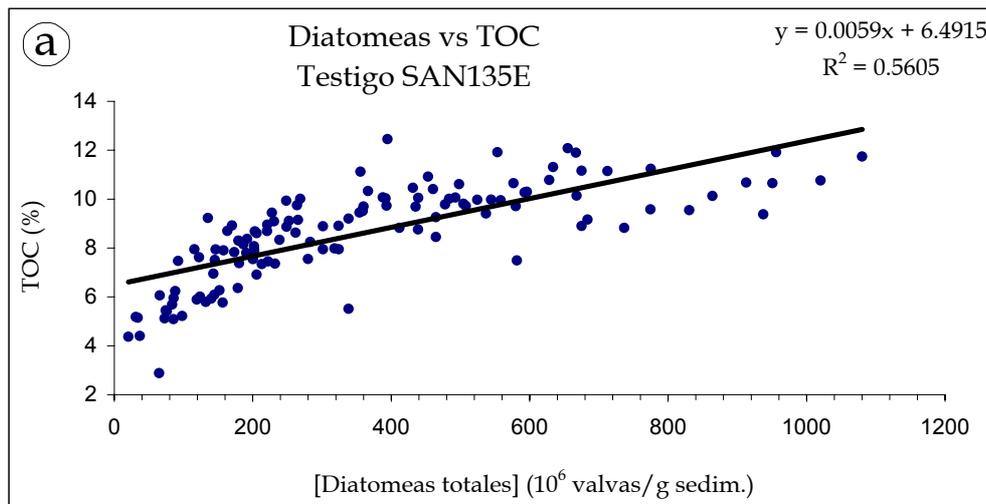


Fig. 20.5. Correlación entre el carbono orgánico total (TOC) y el contenido total de valvas de diatomeas, en la secuencia sedimentaria SAN135E.

a) todas las muestras ( $n = 134$ );  $r^2 = 0.56$

b) muestras inferiores a 400 ( $10^6$  valvas/g sedimento) ( $n = 88$ );  $r^2 = 0.64$

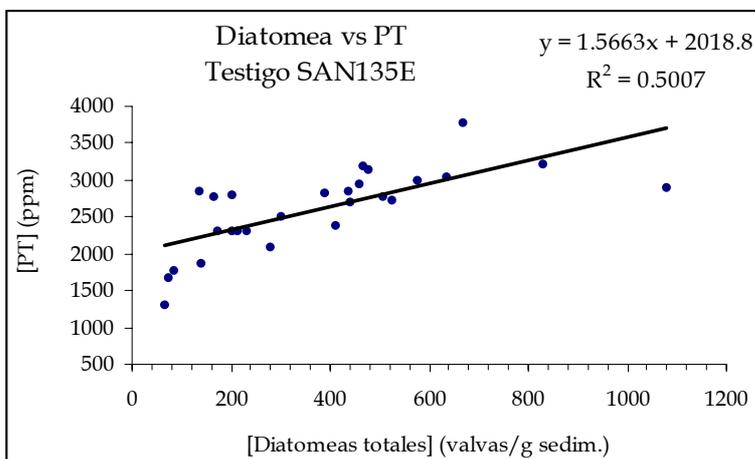


Fig. 20.6. Correlación entre el contenido en fósforo total (PT) y el contenido total de valvas de diatomeas, en la secuencia sedimentaria SAN135E ( $r^2=0.50$ );  $n=27$  muestras).

## **Subcapítulo 21. ANÁLISIS POLÍNICO DEL SEDIMENTO DEL LAGO DE SANABRIA.**

El contenido polínico de los sedimentos lacustres es un parámetro paleolimnológico usado con frecuencia en numerosas reconstrucciones paleoclimáticas y paleoambientales (Pons & Reille, 1988; COHMAP miembros, 1988; Faegri & Iverson, 1989; Guiot et al., 1993; Webb et al., 1993; Peñalba, 1994; Pérez-Obiol & Julià, 1994; Allen et al., 1996; Sánchez Goñi & Hannon, 1999; Santos et al., 2000). Las características cualitativas y cuantitativas del contenido polínico aportan importante información sobre cambios en la composición y distribución espacial de las comunidades vegetales. Las variaciones climáticas y ambientales provocan cambios en las comunidades vegetales continentales; estas variaciones son detectables en las secuencias sedimentarias lacustres.

En el lago de Sanabria, el polen puede llegar por transporte aéreo y por transporte fluvial. Como consideración general, el polen existente en el sedimento de un lago proviene fundamentalmente de tres orígenes diferentes: a) de la vegetación regional, b) de la vegetación de la cuenca hidrográfica, y c) de la vegetación acuática del propio lago. Estos diferentes orígenes pueden dominar, en menor o mayor medida, dependiendo del ambiente lacustre en el cual ha sido acumulada la secuencia sedimentaria analizada. Así, en secuencias extraídas en ambientes profundos de grandes lagos, es más probable la existencia de polen representativo de la vegetación regional. En cambio, en secuencias sedimentarias situadas en ambientes someros, el contenido polínico es más abundante, debido al aporte adicional de polen procedente de la vegetación de la cuenca y de la vegetación acuática del lago.

En el Lago de Sanabria, se ha realizado el análisis polínico de la secuencia sedimentaria SAN235E, situada en la cubeta oriental. Este testigo ha sido extraído en un ambiente sedimentario suficientemente profundo (51 m) como para minimizar las posibles influencias del polen local existente en los ambientes someros y marginales del lago. El contenido polínico analizado garantiza, pues, la detección de una mínima contribución de fracción polínica de carácter local; de esta manera, los cambios climáticos son mejor registrados, representando cambios a escala regional.

La determinación del contenido en polen del testigo SAN235E ha sido realizada por el Dr. S. Riera (Departamento de Riesgos Naturales, Instituto Ciencias de la Tierra "Jaume Almera" CSIC). El protocolo de tratamiento del sedimento, para la separación del polen, ha seguido los procedimientos standard establecidos (Faegri & Iverson, 1989; Moore et al., 1991). La secuencia sedimentaria ha sido analizada cada 5 cm de profundidad (en los 40 cm más superficiales) y cada 10 cm de profundidad (en el resto del testigo).

### 21.1. Diagrama polínico.

El diagrama polínico del testigo SAN235E se muestra en la **Fig. 21.1**. Las agrupaciones establecidas por el análisis de proximidades Cluster dividen la secuencia sedimentaria en 4 zonas principales (zonas A, B, C y D), cuyos límites coinciden con la existencia de

los horizontes sedimentarios ESD, NRI (NRI1 y NRI2), y la isócrona cal. 1450 BP (edad del comienzo del cuarto y último ciclo de materia orgánica detectado en el testigo SAN434). Las concentraciones de los principales componentes vegetales (comunidad arbórea, arbustiva y herbácea) se ilustran en la **Fig. 21.2**.

Las zonas polínicas establecidas evidencian la alternancia de fases de mayor estabilidad forestal (zonas B y C2) con fases de menor estabilidad (zonas A y C1). La zona D constituye el tramo más superficial, relacionado con el sedimento depositado durante el evento catastrófico de la rotura de la presa Vega de Tera (1959 AD). Las características de cada una de las zonas son:

Zona A (menor recubrimiento forestal): constituye el tramo más antiguo de la secuencia. Está caracterizado por concentraciones intermedias de polen arbóreo (AP), entre los que destaca el *Quercus caducifolia*, evidenciando una extensión moderada de la masa forestal (**Fig. 21.1 y 21.2**). Los porcentajes de polen herbáceo son relativamente elevados.

Zona B (mayor recubrimiento forestal): zona delimitada por la isócrona cal. 1450 BP (comienzo del aumento brusco en materia orgánica en el ciclo 1 del testigo SAN434), y el nivel NRI2 (cal. 700-800 BP). Este intervalo está caracterizado por porcentajes elevados de polen arbóreo (**Fig. 21.1 y 21.2**). El bosque está constituido principalmente por robles (*Quercus*) y abedules (*Betula*). La comunidad herbácea disminuye considerablemente en cal. 1450 BP, mostrando las concentraciones más bajas de toda la secuencia sedimentaria; asimismo, la comunidad arbustiva, y en especial *Erica*, aumenta bruscamente en la base de la zona (**Fig. 21.2**). El comienzo de la zona B (isócrona cal. 1450 BP) determina cambios bruscos en determinados taxones arbustivos, como: a) aumento considerable de *Erica* y *Plantago*, b) disminución considerable de *Poaceae* (que mantiene las concentraciones más bajas de la secuencia durante toda la zona B), así como disminución de *Fraxinus* y *Rumex*.

La zona B finaliza con el horizonte sedimentario NRI2 (cal. 700-800 BP). La existencia de este horizonte, con el consiguiente cambio a la zona C1, determina todo un conjunto de cambios importantes en la comunidad vegetal (**Fig. 21.1 y 21.2**). Estos cambios son:

- 1) El contenido arbóreo disminuye considerablemente, alcanzándose los porcentajes polínicos existentes con anterioridad (zona A). El principal taxon afectado es *Quercus* (roble).
- 2) Desaparecen taxones que hasta ahora existían en las zonas A y B. Estos taxones son: *Cerealia* y *Sphagnum* (musgo). Asimismo, disminuye considerablemente los porcentajes de *Calluna vulgaris*.
- 3) Las concentraciones de *Poaceae* recuperan nuevamente los valores relativamente elevados de la zona A. Durante toda la zona B, *Poaceae* se encuentra en porcentajes bajos.
- 4) La existencia del horizonte NRI2 (cal. 700-800 BP) determina una disminución importante de los valores de *Isoetes* (helechos), que permanece con valores relativamente bajos durante toda la zona C1. Asimismo, la vegetación acuática adquiere valores relativamente bajos con la presencia del nivel NRI2.

El nivel sedimentario NRI2 constituye la zona de separación entre la zona B (extensa cobertura vegetal) y la zona C1.

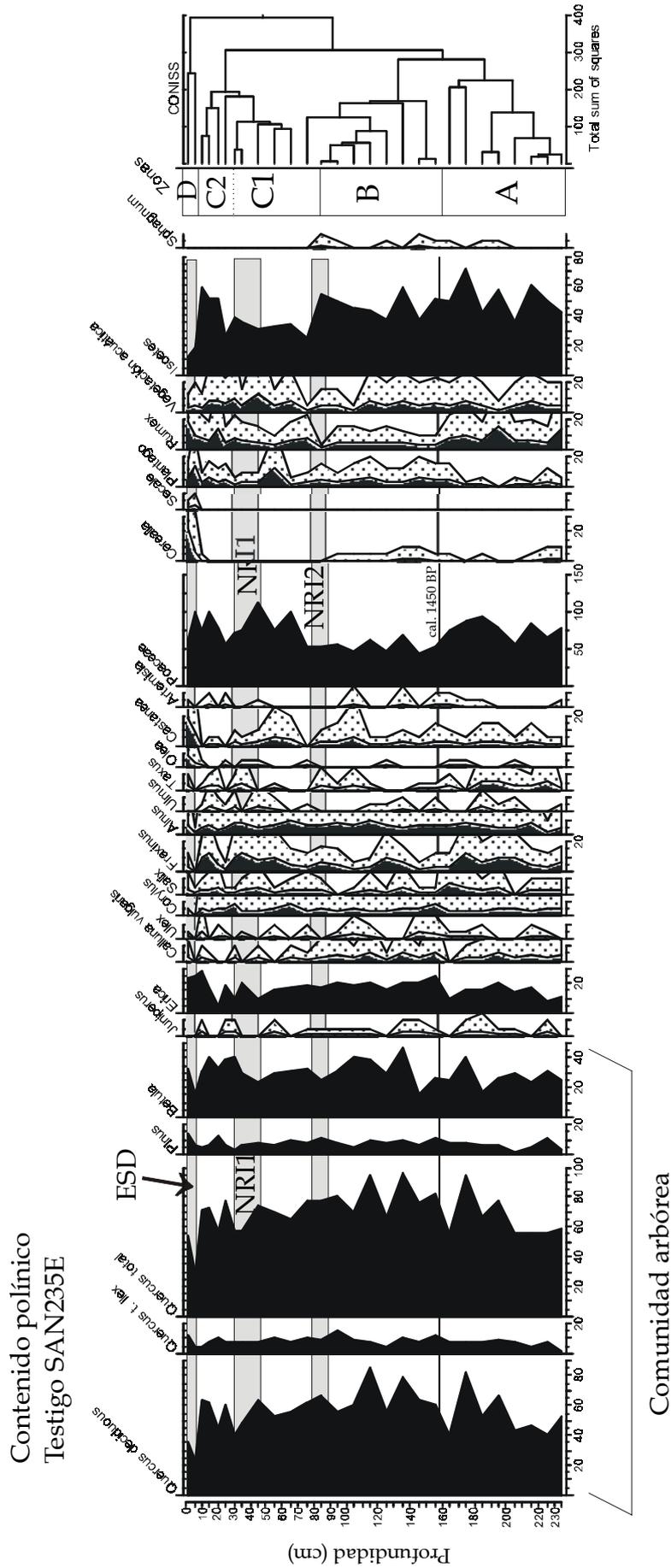


Fig. 20.1. Análisis polínico del sedimento del Lago de Sanabria (testigo SAN235E, cubeta oriental). Las principales características del contenido en polen se encuentran determinadas por la presencia de los horizontes sedimentarios ESD y NRI (NRI1 y NRI2), así como la isócrona cal. 1450 BP (comienzo del cuarto y último ciclo de materia orgánica del testigo SAN434). Los resultados están expresados en valores relativos de polen (%). Las abundancias más pequeñas han sido exageradas de 3 a 5 veces.

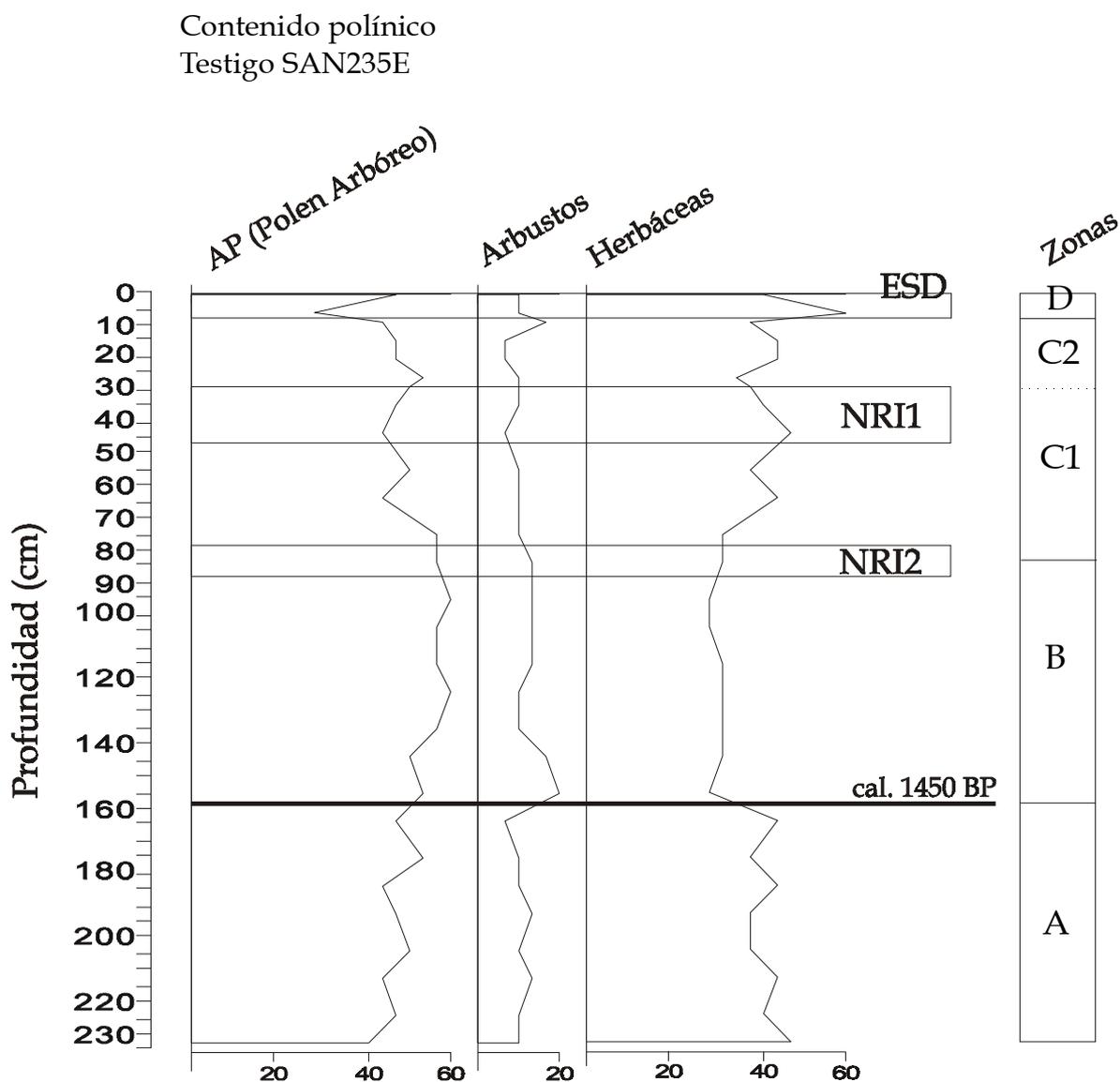


Fig. 20.2. Análisis polínico del sedimento del Lago de Sanabria (testigo SAN235E, cubeta oriental). Contenido en polen arbóreo (AP), polen de arbustos, y polen de herbáceas. Las principales tendencias en el contenido polínico se encuentran determinadas por la presencia de los horizontes sedimentarios ESD y NRI (NRI1 y NRI2), así como la isócrona cal. 1450 BP. Los resultados están expresados en valores relativos de polen (%).

Zona C1 (reducción forestal): esta zona incluye los horizontes sedimentarios NRI (NRI1 y NRI2). El horizonte NRI2 (cal. 700-800 BP) determina la base de la zona, constituyendo el nivel limítrofe entre la zona B y zona C1; asimismo, NRI1 (cal. 250-450 BP) está situado en el techo del tramo, y constituye el nivel limítrofe entre la zona C1 y la zona C2 (**Fig. 21.1** y **21.2**). La zona C1 experimenta una disminución general de los porcentajes de polen arbóreo (AP), así como un aumento considerable de la población herbácea, alcanzando, ambas poblaciones, los niveles existentes en la zona A (**Fig. 21.2**). Los porcentajes de arbustos experimentan una ligera disminución, alcanzando, también, los niveles de la zona A.

En la zona C1 se evidencian las siguientes características: a) expansión considerable de *Poaceae*, alcanzando los valores máximos de toda la secuencia sedimentaria, b) las concentraciones de *Isoetes* adquieren valores bajos en toda la zona C1, c) se alcanzan los valores máximos en toda la secuencia de los taxones nitrófilos (*Plantago* y *Rumex*).

El horizonte sedimentario NRI1 (cal. 250-450 BP) constituye la fase final de la zona C1. Este nivel origina todo un conjunto de cambios en la comunidad vegetal, determinados por las siguientes características (**Fig. 21.1**): a) disminución de la comunidad arbórea, especialmente *Quercus*, b) disminución relativamente brusca de *Poaceae*, *Castanea* y *Plantago*.

Zona C2 (recuperación forestal): esta zona se encuentra delimitada por el horizonte NRI1 (en su parte inferior), y por el Episodio Sedimentario Detrítico (ESD) (en su parte superior). Está caracterizada por (**Fig. 21.1**): a) una recuperación de las comunidades arbóreas (*Quercus* y *Betula*), b) un aumento importante de *Isoetes*, alcanzándose los valores previos de las zonas A y B, c) recuperación de los valores de *Poaceae*, disminuidos anteriormente durante el horizonte NRI1.

Zona D (evento catastrófico): constituye los 7 cm más superficiales de la secuencia SAN235E, y se encuentra representado por el Episodio Sedimentario Detrítico (ESD). El sedimento aportado por la avenida asociada a la rotura de la presa Vega de Tera (1959 AD) ha provocado un cambio drástico en los espectros polínicos. La zona D está caracterizada por (**Fig. 21.1**): a) una disminución brusca de la comunidad arbórea (*Quercus* y *Betula*), b) porcentajes máximos de *Erica*, c) disminuciones bruscas de *Ulex*, *Corylus*, *Fraxinus*, *Ulmus*, y *Taxus*, c) aumentos bruscos de los taxones de cultivo, es decir, *Olea*, *Castanea*, *Cerealía* y *Secale* (este último taxon aparece por primera vez en toda la secuencia sedimentaria), d) disminución muy brusca de *Isoetes*, alcanzando los porcentajes más bajos de toda la secuencia, e) un aumento brusco de los taxones nitrófilos (como ejemplo, *Plantago*). El horizonte ESD se caracteriza, por lo tanto, por una disminución drástica del polen arbóreo (AP) y un aumento drástico del polen no arbóreo (arbustos y herbáceas) (**Fig. 21.2**). El nivel evidencia una gran actividad humana con extensión de la agricultura.

