



**ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES DE MICROSCOPIA
ELECTRÓNICA DE RITMITAS SILICICLÁSTICAS.
INTERPRETACIÓN LIMNOGEOLÓGICA DE LOS
REGISTROS LACUSTRES DE ORIGEN GLACIAR
(NO SISTEMA IBÉRICO)**

*BSE digital image analysis of detrital rhythmites. Limnogeological interpretation
of lacustrine sedimentary records of glacial origin (NW Iberian Range)*

Análisis digital de imágenes de microscopía electrónica de ritmitas siliciclásticas.
Interpretación limnogeológica de los registros lacustres de origen glaciario (no sistema ibérico)

J. Vegas

*Recursos Minerales y Geoambiente. Instituto Geológico y Minero de España.
Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid
Telf. +34 913 49 57 40 - Fax +34 913 49 58 34. E-mail: j.vegas@igme.es*

Resumen: En los lagos de origen glaciario del NO del Sistema Ibérico se han preservado sedimentos finamente laminados (varvas, ritmitas, capas gradadas). Su presencia depende de la interacción de varios factores: morfometría del lago, tipos de roca/suelo de la cuenca de drenaje y condiciones climáticas. El análisis digital de imágenes de microscopía electrónica (imágenes de electrones retrodispersados: BSEI) a partir de láminas delgadas, ofrece datos de alta resolución sobre el número, textura, estructura y composición a escala anual y subanual. En sondeos realizados en dos lagos de origen glaciario se han identificado e interpretado 9 clases de ritmitas siliciclásticas, que se agrupan en dos tipos principales: i) Simples, formadas por dos láminas, que corresponden a la sedimentación anual. ii) Múltiples, con más de dos láminas, donde cada una representa estaciones o eventos climáticos de corta duración dentro de las estaciones (p.e. fusión nival, fusión glaciario en verano, tormentas de otoño, etc.). Las ritmitas están presentes desde el origen de la sedimentación en estos lagos de origen glaciario (31.360 a. Cal BP: laguna del Hornillo y 20.420 a. Cal BP: laguna Grande), hasta el comienzo del Holoceno.

Palabras clave: Análisis digital, imágenes, microscopía electrónica, índices texturales, ritmita, lagos alpinos.

Abstract: In favourable geological and geomorphological settings of the NW Iberian Range glacial lakes accumulate and preserved fine laminated sediments (varves, rhythmites, graded layers). Their occurrence seem to be dependent on various interacting environmental factors, such as basin and catchment morphometry, catchment's rocks and soils types and climate conditions. Image analysis of Backscattered Scanning Electron microscope Images (BSEI) of thin sections provides high-resolution digital documentation related to the number, texture, structure and composition of laminated sediments at annual and subannual scale. A careful construction of a fine-scale physical/textural properties of annually laminated lake sediments were emphasized in the present study. Nine kinds of detrital rhythmites are iden-



J. Vegas (2007). Análisis digital de imágenes de microscopía electrónica de ritmitas siliciclásticas. Interpretación limnogeológica de los registros lacustres de origen glaciario (no sistema ibérico). *Rev. C. & G.*, 21 (3-4), 49-75.

tified that can be grouped in two main types: i) Single rhythmites with two laminae. A single annual unit is composed of two layers (laminae) that can be distinguished on the basis of their thickness, composition and texture. ii) Multiple rhythmites with more than two laminae. In detail, these individual layers are representing certain seasons or even short-term events within seasons (e.g. nival melt, spring floods, summer glacial melt, autumn storms, etc.). Detrital rhythmites are present in both sedimentary lacustrine records since their glacial origin (31360 y. Cal BP in the Hornillo lake and 20420 y. Cal BP in the Grande lake) to the beginning of the Holocene.

Keywords: Digital image analysis, backscattered electron images, textural indexes, rhythmites, alpine lakes.

1. Introducción

Los sedimentos laminados de bajo espesor (<1 cm) y con un marcado carácter estacional en su formación, suelen formarse en el fondo de cuencas de baja energía, bien sea en ambiente lacustre o marino. Este tipo de laminaciones reciben dos nombres muy comunes: **varvas** y **ritmitas**, nombrándose, en ocasiones, como **laminitas**. No existe una terminología aceptada sobre este tipo de sedimentos, por ello, en numerosas ocasiones se denominan de la misma manera a las laminaciones que tienen diferente composición, textura, espesor, color, contenido biológico, entre otros, y que han sido originadas en ambientes muy diversos, pudiendo encontrar ejemplos tanto en el registro actual como fósil (Anderson y Dean, 1988).

Gerard De Geer (1912) describió en Suecia, por primera vez, sedimentos laminados que se formaban estacionalmente en el fondo de lagos glaciares y acuñó el término “*varva*”. Identificó dos componentes dentro de un ciclo anual, formados por alternancia rítmica de láminas de tamaño de grano grueso con láminas más finas y denominó a cada pareja de láminas *varva*, estableciendo uno de los métodos más precisos para reconstruir y datar las variaciones glaciares. Este concepto fue aplicado mundialmente a otras secuencias, proporcionando archivos paleoambientales únicos, de la misma manera que los registros de los sondeos en hielo. De esta forma, en origen y por definición, el término *varva*, estaba limitado al ambiente glaciolacustre y, de hecho, se empleó para datar y correlacionar sedimentos glaciares en Escandinavia y América del Norte (De Geer, 1912; Antevs, 1922; Sauramo, 1923). Los sedimentos varvados de origen glaciolacustre están caracterizados por un componente grueso de verano y un componente

fino de invierno (Shaw y Archer, 1978). Aunque, más recientemente, se ha demostrado que los sedimentos proglaciares laminados pueden tener estructuras diferentes y patrones más variables que aquellas descritas originalmente en las secuencias suecas (p.e. Sturm, 1979; Lambert y Hsü, 1979; Karlén, 1981; Leemann y Niessen, 1994a,b; Ohlendorf *et al.*, 1997; Blass *et al.*, 2003; Vegas, 2006).

Desde entonces se ha especulado sobre el mecanismo de sedimentación que da lugar a la formación de varvas y si debían considerarse exclusivamente de origen glaciolacustre, puesto que en las décadas de los 60 y 70 aparecieron publicados varios trabajos no sólo en ambiente glaciario (p.e. Ashley, 1975), sino también en otros tipos de ambientes lacustres (p.e. Kempe, 1977; Sturm y Mater, 1978) e, incluso, marinos (p.e. Gorsline, 1977; Kelts y Hsü, 1978; Degens *et al.*, 1978). Todos los autores manifiestan que uno de los requisitos para denominar una pareja de láminas como “*varva*” es que correspondan a un ciclo de sedimentación anual, que sea el reflejo de las variaciones estacionales en la sedimentación de la materia mineral (Alapieti y Saarnisto, 1981; Francus y Saarinen, 1999).

Las lagunas de origen glaciario estudiadas en este trabajo contienen una gran variedad de sedimentos laminados que, a pesar de su sencillez en el estudio visual, presentan notables diferencias texturales a microescala. Por ello, el objetivo de este trabajo consiste en el estudio cuantitativo, mediante análisis digital de imágenes de microscopía electrónica, de los índices texturales de sedimentos lacustres laminados de grano fino (ritmitas). Con estos índices se ha realizado una caracterización individualizada de cada evento sedimentario, que contiene información limnogeológica y climática, de acuerdo a los factores ambientales que condicionaron su

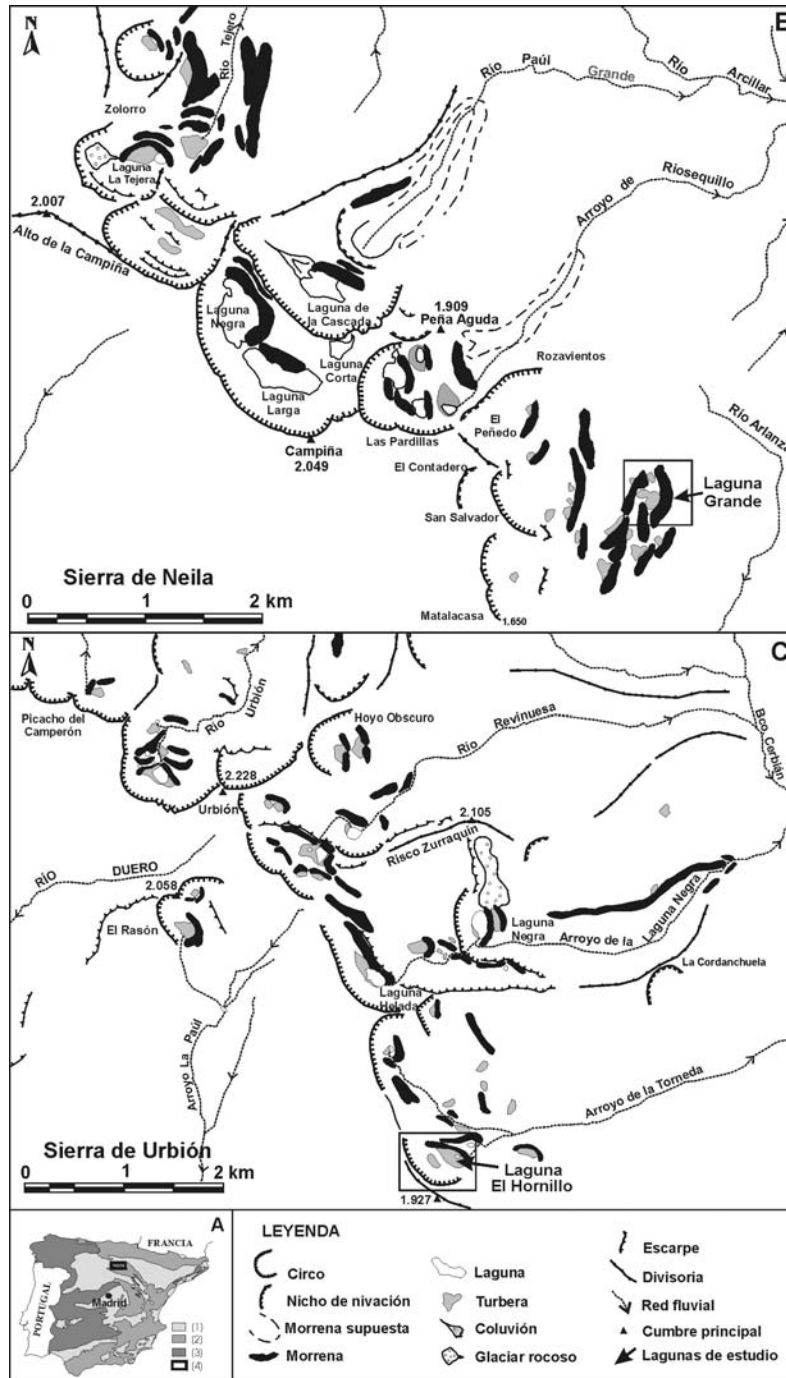


Figura 1. A. Mapa de situación en la Península Ibérica: (1) Cuencas terciarias. (2) Cordillera Alpina. (3) Macizo Paleozoico. (4) Zona de estudio. B. Mapa geomorfológico de la Sierra de Neila. C. Mapa geomorfológico de la Sierra de Urbión.

Figure 1.- A. Situation map of the Iberian Peninsula: (1) Tertiary basins. (2) Alpine mountain range. (3) Palaeozoic massif. (4) Study site. B. Geomorphological map of the Sierra de Neila. C. Geomorphological map of the Sierra de Urbión.

formación. Para no introducir términos genéticos en las descripciones, como el de “varva”, que podrían forzar las interpretaciones, se empleará el término más genérico de ritmita. Las ritmitas siliciclásticas están presentes en las unidades inferiores de los registros sedimentarios de la laguna Grande (Sierra de Neila) y de la laguna del Hornillo (Sierra de Urbión), relacionadas con la dinámica glaciolacustre en el NO del Sistema Ibérico.

2. Situación geográfica y geológica

La región de estudio se encuentra al NO del Sistema Ibérico (Fig. 1A), en las sierras de Neila y Urbión, donde se encuentran evidencias de un glaciario de tipo alpino en las cotas más elevadas, con cuenca de alimentación y lengua corta o inexistente (Thornes, 1968; Ortega y Centeno, 1987; Sanz Pérez, 1994a,b; García Ruiz *et al.*, 1997; Sanz Pérez, 2001; Vegas, 2006). Estas sierras han sido motivo de estudio por diferentes autores, con el objetivo de reconstruir los cambios ambientales y las respuestas en la vegetación durante el Tardiglaciario y Holoceno (Peñalba 1989, 1994; Gómez-Lobo, 1993; Gómez-Lobo *et al.*, 1994, 1998; Allen *et al.*, 1996, 2001; Peñalba *et al.*, 1997; Sánchez-Goñi y Hannon, 1999; Ruiz-Zapata *et al.*, 2000, 2002, 2003).

Para este trabajo se eligieron la laguna Grande, en la vertiente NE de la Sierra de Neila (provincia de Burgos) y la laguna del Hornillo, en la Sierra de Urbión (provincia de Soria), por ser ejemplos representativos de los sistemas lacustres de origen glaciario en estas sierras. El Hornillo es una pequeña laguna situada a una altitud de 1.800 m s.n.m. en una cuenca de sobre-excavación de un circo glaciario (Fig. 1C). La laguna Grande es un pequeño lago proglaciario a una elevación de 1.510 m s.n.m. situada en una depresión intermorrénica, relacionada con el glaciario de San Salvador-Matalacasa (Fig. 1B). Estos circos glaciares tuvieron un bajo potencial de acumulación de hielo, debido a su pequeño tamaño y su relativa baja altitud, donde sus lenguas glaciares fluyeron hacia el E. En la actualidad, estas lagunas están colmatadas y cubiertas por turberas reotróficas que permanecen encharcadas durante la mayor parte del año. El sustrato de las dos cuencas de drenaje está formado por conglome-

rados y areniscas del Grupo Urbión, de edad Cretácico Inferior (Mas y García, 2004).

2.1. Laguna Grande

Esta laguna proglaciario contiene una secuencia sedimentaria de 10 m de profundidad, que abarca desde los últimos 20.420 a. Cal BP hasta la actualidad y comienza en una unidad de capas de arenas gradadas de edad desconocida. El registro sedimentario de la laguna Grande se ha dividido en 9 unidades sedimentarias (Fig. 2), de acuerdo con los esquemas de descripción y clasificación de Schnurrenberger *et al.* (2001, 2003), que están basados en la descripción de los rasgos macroscópicos y en el estudio microscópico de los componentes sedimentarios, para su uso en sedimentos lacustres. Contiene una gran variedad de facies lacustres que se pueden clasificar en tres grandes grupos: i) capas centimétricas detríticas de *debris-flow* y turbiditas; ii) sedimentos finamente laminados (ritmitas y capas gradadas) y iii) sedimentos orgánicos (turberas y limos matriz-soportados con materia orgánica).

2.2. Laguna del Hornillo

Esta laguna de circo tiene una secuencia sedimentaria de 9,60 m de profundidad, que comprende los últimos 31.360 a. Cal BP hasta la actualidad. Este registro sedimentario se ha dividido en 8 unidades sedimentarias (Fig. 2), de acuerdo con Schnurrenberger *et al.* (2001, 2003). Las facies lacustres se agrupan en dos clases principales: i) sedimentos finamente laminados (ritmitas y capas gradadas) y ii) sedimentos orgánicos (turberas y limos matriz-soportados con materia orgánica).

3. Metodología

Se realizaron sondeos de recuperación continua en las partes centrales de la laguna Grande (10 m) y del Hornillo (9,6 m), mediante una sonda manual de tipo Rusa (Jowsey, 1966), estando representadas en los testigos las facies más profundas sucedidas a lo largo del tiempo. Los registros sedimentarios se han datado mediante radiocarbono (AMS y convencional) en el laboratorio BETA Analytic Inc.

Tabla 1. Dataciones de radiocarbono para las lagunas Grande y el Hornillo. Edades convencionales de radiocarbono BP y su correspondiente edad calibrada BP, 2 sigma al 95% de probabilidad. Los métodos de datación han sido AMS y radiométrico convencional con mayor tiempo de recuento (extended counting time).

Table 1. Radiocarbon ages of Grande and Hornillo lakes. Radiocarbon conventional and calibrated ages BP (2 sigma at 95% likelihood). Dating techniques are AMS and standard with extended counting time.

Prof. (cm)	Laboratorio	Método	Edad (a. ^{14}C BP)	Edad calibrada (a. Cal ^{14}C BP)			
				2 σ (95% prob.)	Mediana 2 σ		
LAGUNA GRANDE	45	Beta-141665	Convencional	330 \pm 110	540-250 230-130 115-70 35-0	130	
	95	Beta-141666	Convencional	2.760 \pm 50	2.960-2.765	2.855	
	205	Beta-145039	AMS	6.070 \pm 40	7.010-6.790	6.900	
	270	Beta-156222	Convencional	7.820 \pm 70	8.960-8.940 8.850-8.840 8.780-8.430	8.845	
	325	Beta-145040	AMS	8.010 \pm 30	9.010-8.770	8.990	
	535	Beta-145041	AMS	9.700 \pm 50	11.200-11.080 10.940-10.870	11.010	
	547	Beta-175915	AMS	10.400 \pm 90	12.850-11.890	12.340	
	585	Beta-141667	AMS	10.650 \pm 60	12.945-12.610 12.490-12.355	12.600	
	645	Beta-141668	AMS	11.420 \pm 70	13.795-13.665 13.510-13.150	13.588	
	755	Beta-135634	AMS	12.040 \pm 40	15.115-14.760 14.290-14.185 14.150-13.830	14.237	
	845	Beta-135633	AMS	16.630 \pm 50	20.250-19.400	19.825	
	875	Beta-141669	AMS	17.150 \pm 100	20.965-19.875	20.420	
	EL HORNILLO	95	Beta-145042	Convencional	3.720 \pm 90	4.380-3.840	4.110
		235	Beta-148896	AMS	6.640 \pm 40	7.580-7.440	7.510
327		Beta-156221	AMS	8.770 \pm 60	10.130-10.060 9.950-9.560	10.005	
395		Beta-148897	AMS	9.860 \pm 40	11.280-11.190	11.235	
725		Beta-141670	AMS	13.340 \pm 70	16.475-15.675	16.075	
835		Beta-141671	AMS	19.850 \pm 110	24.185-22.905	23.545	
975		Beta-148900	AMS	27.160 \pm 150	31.560-31.160	31.360	

empleando materia orgánica total (Tabla 1) y se han calibrado con la curva INTCAL98 (Stuiver et al., 1998) y el programa CalPal (*Cologne Radiocarbon Calibration Palaeoclimate Research Package*, Weninger et al., 2005).

El muestreo para la preparación de láminas delgadas se realizó mediante electro-ósmosis, siguiendo la metodología descrita en Francus y Asikainen (2001) para sedimentos finos y sin consolidar. Las láminas delgadas se han elaborado mediante liofili-

zado *-freeze drying technique-* y se han embutido en resina (Lotter y Lemcke, 1999; Francus, 1997, 1998). Una vez elaboradas se han escaneado con una precisión de 0,05 mm, obteniendo un “mapa” de las laminaciones para situar las imágenes digitales. Éstas se han obtenido en el microscopio electrónico, modelo JEOL JSM-5410 (*UMass Dept., USA*) en el modo de electrones retrodispersados (BSE). Para comparar los resultados del análisis digital entre todas las imágenes, se realizaron con

Tabla 2. Tipos de ritmitas silicásticas identificadas en los registros sedimentarios de la laguna Grande (Sierra de Neila) y laguna del Hornillo (Sierra de Urbión). *Pres. indica la presencia de las ritmitas en las lagunas estudiadas:

LG, laguna Grande y LH, laguna del Hornillo.

Table 2. Main types of detrital rhythmites identified in sedimentary records of the laguna Grande (Neila Mountains) and the Hornillo lake (Urbion Mountains). *Pres. is referred to rhythmites presence: LG, laguna Grande and LH, Hornillo lake.

TIPOS		P (%)	mDo (µm)	Min. Autigénicos y M.O.	Pres*	Interpretación
Descripción						
A1	Arcilla	-	-		LH y LG	Flujos superficiales turbulentos. Sedimentación estacional en lago estratificado. Capa de hielo en invierno con decantación de arcilla.
	Limos grano-soportados sin matriz	30	6,5-7	(-) esferrulitos siderita	LH y LG	Flujos intermedios turbulentos del drenaje subglaciar, que tocan ligeramente el fondo. Pulso superficiales durante periodo sin estratificación.
A2	Arcilla con limos dispersos	6	6	(-) esferrulitos siderita	LH y LG	Flujos intermedios turbulentos en un lago con mayor productividad orgánica. Fondo anóxico ligeramente reductor.
	Limos grano-soportados con matriz	45	9,5-10	M.O.	LH y LG	Flujos profundos de baja densidad. Fondo anóxico ligeramente reductor.
A3	Arcilla con limos dispersos	16	6,8	M.O.	LH y LG	Flujos profundos de baja densidad. Fondo anóxico ligeramente reductor.
	Limos grano-soportados, matriz y M.O.	45,1	10,5	M.O.	LH y LG	Flujos profundos de baja densidad. Fondo anóxico ligeramente reductor.
A4	Limos finos matriz-soportados, restos orgánicos	14	7	M.O.	LH y LG	Flujos profundos de baja densidad. Fondo anóxico ligeramente reductor.
	Limos grano-soportados con matriz	31,5	8,5	Esf.-parches siderita	LH y LG	Glaciar/nevero en contacto con el lago. Episodios de fusión y desprendimiento de hielo.
A5	Arcilla con limos y <i>drepanids</i>	31	8	M.O.	LH	Glaciar/nevero en contacto con el lago. Episodios de fusión y desprendimiento de hielo.
	Limos grano-soportados, matriz y M.O.	45-48	9,5-10	Parches siderita	LH	<i>Mud-flows</i> por deslizamientos que incorporan arena o por fuertes vientos invernales que depositan partículas gruesas sobre la capa de hielo. Glaciar de circo.
A6	Arcilla con limos dispersos	17		-	LH	Sin patrón anual. Reducción del aporte detrítico.
	Limos gruesos y arenas matriz-soportadas	38		-	LH	Sin patrón anual. Reducción del aporte detrítico.
A7	Arcilla con limos y M.O. dispersos	5	6	M.O.	LH y LG	Cuenca sin glaciares.
	Limos matriz-soportados con M.O.	6	6,5	M.O.	LH y LG	Cuenca sin glaciares.
B1	4 láminas: Lam. fina 2: Techo. Arcilla	2	-		LH y LG	Tripleta formada por una sedimentación sub-anual, con 2 máximos en el aporte (fusión nival + fusión glaciar). Culmina con una lámina arcillosa de invierno.
	Lam. gruesa 2: Limos grano-soportados sin matriz	30	7	Esferrulitos siderita-viviania	LH y LG	Retroceso del glaciar, que está próximo al lago.
B2	Lam. fina 1: Limos finos con matriz	20	6,2		LH	5 episodios de sedimentación grueso-fino. Marcadores estacionales dentro de un ciclo anual. 5 máximos en el aporte (fusión nival, fusión glaciar y tormentas).
	Lam. gruesa 1: Limos grano-soportados sin matriz	30,5	8-10	M.O.	LH	Culmina con una lámina arcillosa de invierno.
B2	10 láminas: 5 láminas gruesas de limos grano-soportados sin matriz, 4 láminas finas intercaladas de limos finos matriz-soportados y 1 lámina arcillosa de techo.	LF: 10-22 LG: 25-42	LF: 6-7 LG: 8-9	M.O.	LH	5 episodios de sedimentación grueso-fino. Marcadores estacionales dentro de un ciclo anual. 5 máximos en el aporte (fusión nival, fusión glaciar y tormentas).

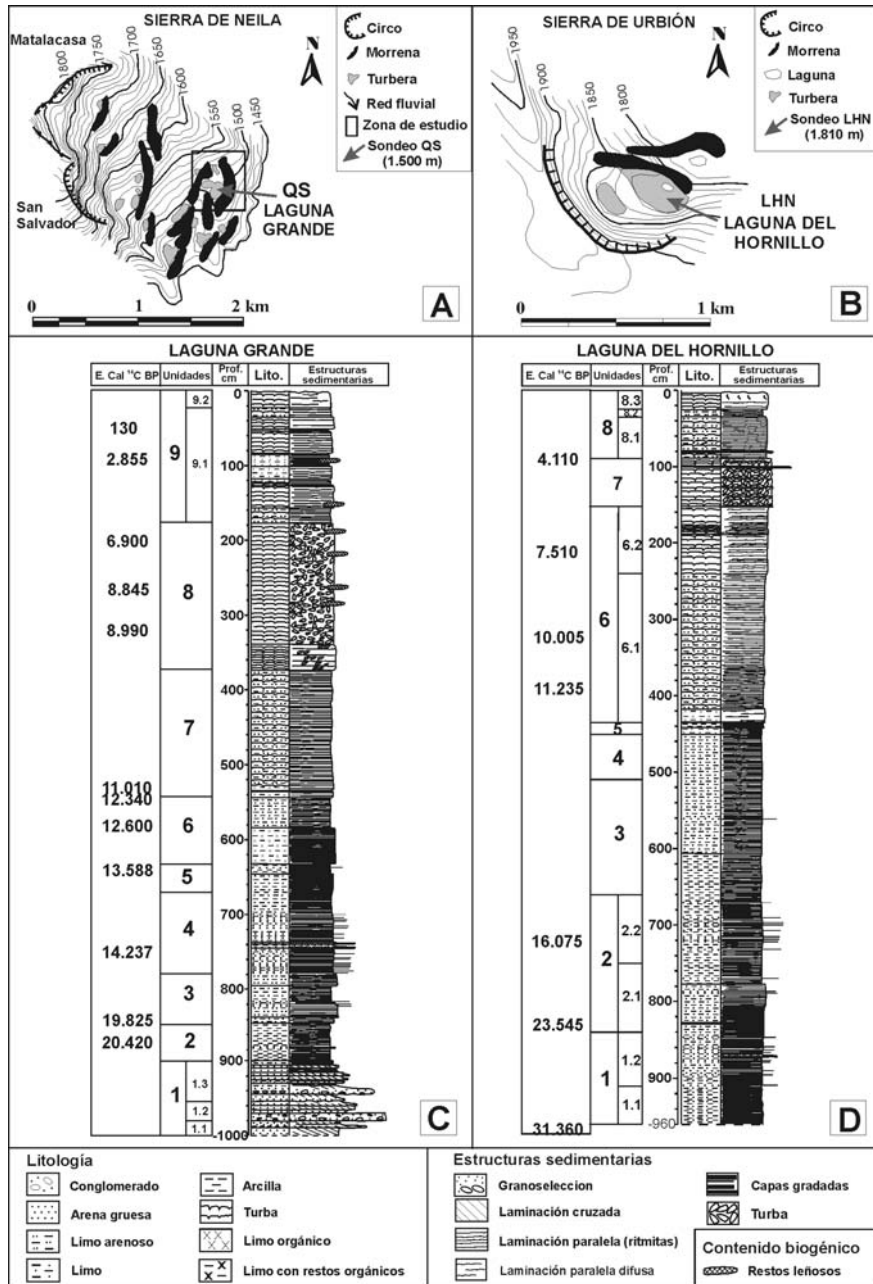


Figura 2. A. Mapa topográfico con la zona de estudio de laguna Grande. B. Mapa topográfico con la zona de estudio de la laguna y el circo del Hornillo. C. Columna estratigráfica del registro sedimentario de la laguna Grande, con indicación de las edades de radiocarbono calibradas y las unidades sedimentarias. D. Columna estratigráfica del registro sedimentario de la laguna del Hornillo, con indicación de las edades de radiocarbono calibradas y las unidades sedimentarias.

Figure 2. A. Topographical map of the laguna Grande site. B. Topographical map of the lake and glacial cirque of the Hornillo site. C. Stratigraphical section from the Grande lake sedimentary record. It is indicated calibrated radiocarbon ages and sedimentary units. D. Stratigraphical section from the Hornillo lake sedimentary record. It is indicated calibrated radiocarbon ages and sedimentary units.

la misma ampliación (x100), a 20 kv y 20 mm de distancia de trabajo y cubren un área de 1300 x 1000 mm. Se han procesado con el programa *NIH Image* versión 1.63 (*U.S. National Institute of Health*, disponible en <http://rsb.info.nih.gov/ni-image/>). En este proceso la imagen original (255 niveles de grises) se transforma en una binaria (blanco y negro), en la cual, los píxeles negros representan los granos detríticos (Francus, 1998; Ojala y Francus, 2002). En cada imagen se ha medido el área superficial de cada grano (con más de 1000 granos por cada foto analizada) y a partir de esta medida se calcula el tamaño de grano empleando el diámetro aparente (Francus, 1998), que corresponde con el diámetro de una esfera que tiene el mismo área superficial que la partícula (Last, 2001). Con esta técnica no es posible medir las partículas inferiores a 4 μ m. La composición se ha determinado mediante el estudio de láminas delgadas en el microscopio petrográfico (modelo Olympus BX51), difracción de rayos-X con agregado orientado de la fracción arcillosa (difractómetro *Phillips* con unidad de control PW17, tubo de cobre, radiación $K\alpha$ Cu y monocromador de grafito) y EDAX en el microscopio electrónico.

4. Ritmitas siliciclásticas

La composición de las ritmitas es muy similar, puesto que las cuencas de drenaje en los dos casos de estudio tienen la misma litología. Las láminas inferiores están formadas mayoritariamente por granos de cuarzo (80-90%) y, en menor proporción, por filosilicatos (micas y clorita), feldespato potásico (K) y fragmentos de roca sedimentaria (RS: cuarzoarenitas de grano fino). Como minerales accesorios están monacita, circón, rutilo y óxidos de hierro-manganeso. Las láminas superiores arcillosas están compuestas por illita, caolinita y clorita de origen detrítico, heredados del área fuente. Todas las ritmitas analizadas son planares y no tienen estructuras de corriente (de tipo *ripple* o laminaciones cruzadas o marcas de corriente). Estos datos sugieren que las ritmitas estudiadas en los puntos de sondeo no se produjeron por flujos profundos fuertes con carga arenosa (Smith, 1978).

Las ritmitas identificadas se han clasificado en 9 tipos básicos (Vegas, 2006) en función de la tex-

tura, estructuras y del número de láminas que contienen en un ciclo de sedimentación (Tabla 2). Los cambios en las microfacies de las ritmitas se consideran como *proxies* para determinar la variabilidad climática sub-anual (Brauer, 1994; Lamoureux y Bradley, 1996; Brauer y Negendank, 2002), puesto que el patrón estacional de la sedimentación refleja las características típicas del clima en el periodo temporal involucrado. Se han seleccionado las más significativas para cada tipo y sobre cada lámina se han cuantificado el tamaño de grano (media: mediaDo; mediana: mDo; centil: MaxDo) y el porcentaje de granos del esqueleto (índice P) (Según Francus, 1997, 1998). En este estudio "matriz" se refiere exclusivamente a partículas <4 mm. Se ha elegido este límite puesto que coincide con el tamaño más pequeño que se ha podido discriminar con este análisis y porque se ha observado, cualitativamente, que separa dos modos de tamaño de grano en las imágenes. También, se han separado 3 clases texturales para los limos (según Francus *et al.*, 2003): 1) limos gruesos (60-20 mm); 2) limos medios (20-10 mm) y 3) limos finos (10-4 mm).

4.1. Ritmitas simples (dos láminas)

En este tipo de ritmitas los espesores medidos son muy variables, desde pares que no superan 1 mm, hasta 3 mm y son las más abundantes en los dos registros lacustres estudiados. En todas, el contacto es neto entre la lámina inferior de tamaño de grano más grueso y la lámina superior de tamaño arcilla. Además, excepto el tipo A7, se han interpretado que corresponden a un patrón de sedimentación de orden anual. El criterio seguido, puesto que se encuentran en ambientes glaciolacustres, es que cada lámina superior de grano más fino (predominantemente arcillosa) se decantaría rítmicamente durante la estación de invierno, probablemente, bajo una capa de hielo, marcando así el ciclo anual de sedimentación (p.e. Smith, 1978; Sturm & Matter, 1978; Sturm, 1979; Blass *et al.*, 2003).

4.1.1. Tipo A1: Pares formados por limos sin matriz / arcilla

Lámina inferior- Limos grano-soportados, sin matriz arcillosa (Fig. 3).

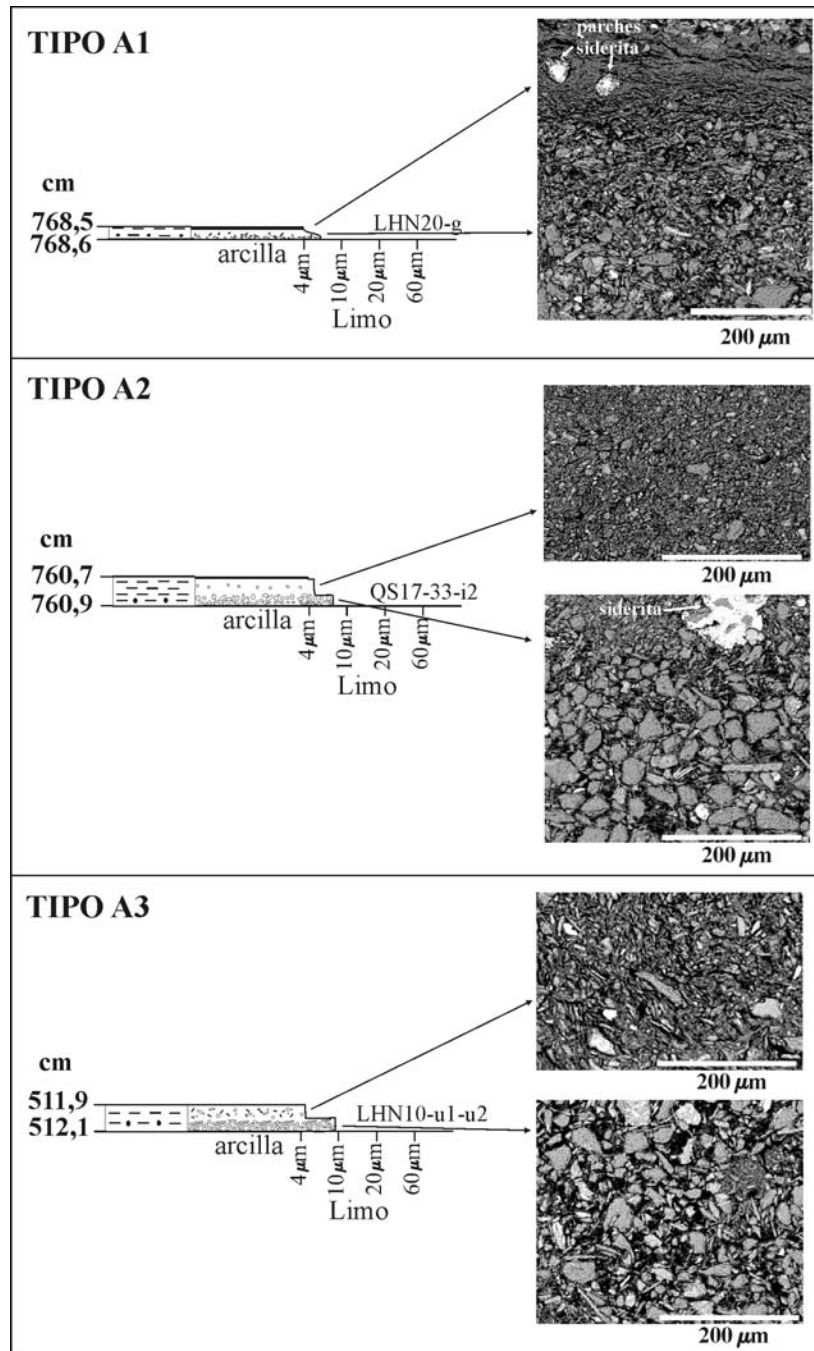


Figura 3. Columnas estratigráficas e imágenes BSE de microscopio electrónico de las ritmitas siliciclásticas simples: Tipo A1, Pares formados por limos sin matriz/arcilla. Tipo A2, Pares de limos grano-soportados con matriz/arcilla con limos dispersos. Tipo A3, Pares de limos grano-soportados con matriz y restos orgánicos/arcilla con limos dispersos.

Figure 3. Stratigraphical columns and BSE electronic microscopy images of single detrital rhythmites: Type A1, pairs of silts without matrix/clay; Type A2, pairs of grain-supported silts with matrix/clay with dispersed silts; Type A3, pairs of grain-supported silts with matrix and organic matter remains/ clay with dispersed silts.

Lámina superior- Es muy homogénea y está formada por partículas de tamaño arcilla y, en ocasiones, con parches de siderita (Fig. 3). Suele ser de menor espesor que la lámina inferior.

Índices texturales: (Fig. 4). Destacar que la distribución de la proporción de granos que forman el esqueleto de la lámina inferior es de un 40% de limo grueso (20-60 mm), un 30-35% de limo medio (10-20 mm) y un 20-25% de limo fino (4-10 mm).

Interpretación: Este par se formaría a partir de descargas de agua y sedimentación superficiales (*overflows*) turbulentos en una masa de agua estratificada de un lago oligotrófico. Están originadas por inestabilidades de la red de drenaje subglaciar y proglaciar, que inyectarían sedimento en suspensión durante la fusión al final de la primavera o comienzo de verano. El contacto no erosivo y la falta de matriz indican una sedimentación por decantación (Shamunghan, 2000) desde la parte superficial de las aguas del lago, que originaría la lámina inferior gruesa del par en zonas distales de la cuenca.

La lámina superior se formaría por decantación durante el invierno del material más fino, que quedó en suspensión atrapado en el epilimnion durante la estratificación de verano. Como es muy homogénea y está formada mayoritariamente por partículas de tamaño arcilla, la sedimentación ocurriría bajo una capa de hielo, impidiendo la entrada de otras partículas al lago. El espesor de esta lámina puede variar de año en año y, posiblemente, sea el reflejo de la cantidad de materia en suspensión que ha sido transportada al lago durante el verano y el otoño (Blass *et al.*, 2003).

4.1.2. Tipo A2: Pares de limos grano-soportados con matriz / arcilla con limos dispersos

Lámina inferior- Limos grano-soportados, con un ligero contenido de matriz arcillosa detrítica (1-2%). La base es plana pero se puede observar cómo los granos penetran en la lámina arcillosa infrayacente, incorporando partículas arcillosas de una ritmita previa. Puntualmente aparecen concreciones de siderita.

Lámina superior- Formada por partículas de arcilla con limos dispersos. En el contacto entre las dos láminas se forman concreciones de siderita (Fig. 3).

Índices texturales: (Fig. 4). Los tamaños calculados en este tipo siempre son algo mayores en las ritmitas de la laguna Grande, en comparación con las del Hornillo. Lo más significativo es que el índice P en la lámina superior es de un 6%. La proporción de arena y limo grueso es mayor en la lámina inferior. En la lámina superior coexisten las tres fracciones de limos, predominando la fracción limo grueso frente a las demás.

Interpretación: Este tipo A2 se originaría por aportes de la red de drenaje, durante el final de la primavera y/o verano por fusión nival y/o glaciario. El contacto plano, pero ligeramente erosivo, y la presencia de matriz detrítica entre los clastos de la lámina inferior, indicarían una sedimentación a partir de un flujo turbulento de baja energía, que al tocar el fondo asimilaría una pequeña cantidad de arcilla de la lámina infrayacente.

La lámina superior es ligeramente diferente a la del tipo A1, puesto que tiene partículas de limo (hasta un 6%). Sturm (1979) atribuyó su origen a la presencia de pulsos superficiales adicionales durante el periodo sin estratificación en el lago, que pueden causar la decantación de partículas más gruesas a la vez que las partículas arcillosas que estaban retenidas en el epilimnion.

4.1.3. Tipo A3: Pares de limos grano-soportados con matriz y restos orgánicos / arcilla con limos dispersos

Lámina inferior- Limos grano-soportados, con matriz detrítica (<3%) y restos orgánicos entre los clastos del esqueleto (<2%). Frecuentes concreciones de siderita y vivianita (Fig. 3).

Lámina superior- Mayoritariamente está formada por partículas de tamaño arcilla, con algunos limos y restos de materia orgánica dispersos. Son frecuentes los parches de siderita, que reemplazan la materia orgánica (Fig. 3).

Índices texturales: (Fig. 4). El índice P en la lámina superior alcanza el 16%, como consecuencia de un mayor contenido en limo de esta lámina. La evolución de los intervalos texturales que forman el esqueleto muestra cómo la proporción de arena y limo grueso es mayor en la lámina inferior. En cambio, en la lámina superior no hay fracción arena y predomina la fracción limo grueso.

Interpretación: Este tipo se produciría por descargas intermedias (*interflows*) y superficiales

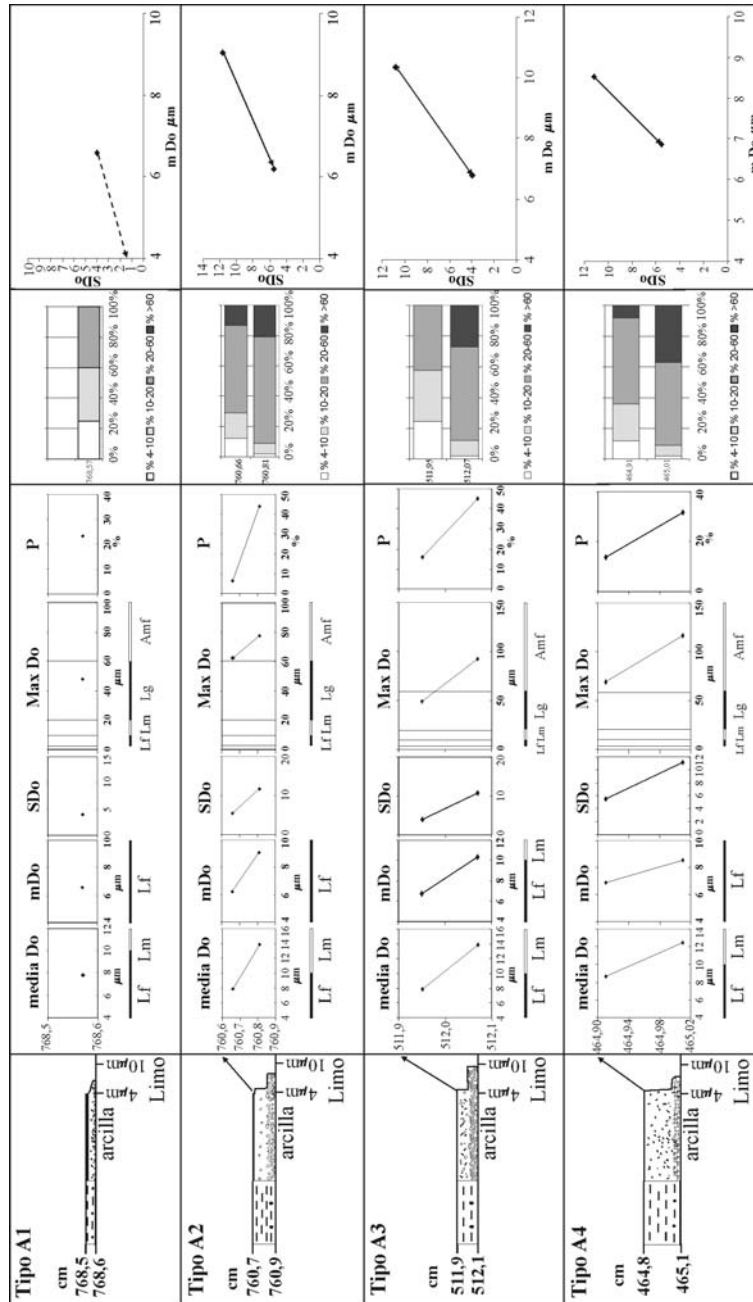


Figura 4. Representación gráfica de los índices texturales calculados mediante análisis digital de imágenes para las ritmitas de tipo A1, A2, A3 y A4. media Do: media del tamaño de grano; mDo: mediana del tamaño de grano; SDo: desviación estándar; Max Do: centil; P: porcentaje de partículas del esqueleto; (%4-10; %10-20; %20-60 y %>60) corresponde al porcentaje de partículas en los intervalos 4-10 μm, 10-20 μm, 20-60 μm y mayores de 60 μm. Gráfico mDo/SDo, con los valores de la mediana y la desviación estándar del tamaño de grano.

Figure 4. Textural indexes plots measured by digital image analysis. Rhythmites A1, A2, A3 and A4. mediaDo: average of grain size; mDo: median of grain size; SDo: standard deviation; MaxDo: centile; P: percentage of skeletal grains; (%4-10; %10-20; %20-60 and %>60) percentage of grains between 4-10 μm, 10-20 μm, 20-60 μm and grains greater than 60 μm. mDo/SDo plot with median and standard deviation of grain size.

(*overflows*) en una masa de agua estratificada, durante el final de la primavera y comienzo de verano por fusión nival y/o glaciar. Durante el verano la productividad sería mayor y se colonizarían parcialmente las orillas por la vegetación, que aportarían restos orgánicos autóctonos a la sedimentación. El contacto no erosivo y la presencia de muy poca cantidad de matriz en la lámina inferior indica una sedimentación por decantación (Shanmugham, 2000, 2002).

La lámina superior es similar a la de tipo A2, formándose por decantación bajo una cubierta de hielo permanente del material en suspensión y los micro-restos orgánicos atrapados en el epilimnion. Estos restos orgánicos más finos sirvieron de punto de nucleación de la siderita en un ambiente anóxico no sulfhídrico (Berner, 1981), en un medio débilmente reductor.

4.1.4. Tipo A4: Pares de limos grano-soportados con matriz / limos matriz-soportados con restos orgánicos

Lámina inferior- Limos grano-soportados con matriz arcillosa detrítica y restos orgánicos (1-2%). Se observan esferulitos de siderita que rellenan puntualmente la porosidad y reemplazan a la materia orgánica (Fig. 5).

Lámina superior- Partículas de limo muy fino, mal seleccionadas, matriz-soportadas en arcilla y con restos dispersos de materia orgánica. En ocasiones, aparecen parches de siderita.

Índices texturales: (Fig. 4). En la lámina inferior las fracciones mayoritarias son arena (37%) y limo grueso (54%), mientras que las fracciones limo medio y fino son minoritarias. En la lámina superior, en cambio, predomina el limo grueso (56%).

Interpretación: En este tipo el contacto no erosivo y la mayor cantidad de matriz en la lámina inferior, probablemente, se explicaría por la existencia de flujos profundos (*underflows*) de muy baja densidad. Estos flujos inyectaron partículas más finas en el fondo de la cuenca, donde se produce una sedimentación de baja energía en una posición intermedia con respecto al punto de aporte. También podrían existir, simultáneamente, entradas de flujos intermedios (*interflows*) y superficiales (*overflows*) menos importantes. Durante los meses de verano la productividad sería mayor, aportando restos orgánicos a la sedimentación. La lámina

superior se formaría por decantación del material detrítico fino y restos orgánicos durante el invierno. En estas circunstancias, la cubierta de hielo pudo no ser permanente, permitiendo la entrada de partículas limosas por fenómenos meteorológicos.

4.1.5. Tipo A5: Pares de limos grano-soportados, mal seleccionados, con materia orgánica / arcillas con limos y arenas

Lámina inferior- Limos grano-soportados, con matriz arcillosa y baja selección (Fig. 5). La base de la lámina es ondulada y el contacto ligeramente erosivo. Ocasionalmente hay clastos de cuarzo de tamaño arena.

Lámina superior- Este tipo se distingue de los demás porque contiene clastos dispersos de tamaño arena, que suelen ser mayores que los de la lámina inferior (Fig. 5). Este tipo de clastos han sido descritos como *dropsands* en láminas arcillosas (Brauer y Casanova, 2001). Se observan parches de siderita.

Índices texturales: (Fig. 6). El índice P de la lámina inferior es el más elevado de todas las ritmitas analizadas, alcanzando el 48%. En la lámina superior el índice más significativo es el tamaño del centil, en el intervalo de tamaño arena media (400 mm), que es una diferencia notable en comparación con los demás tipos analizados. Como consecuencia, el índice P para la lámina superior es el más elevado (31%). En el gráfico de distribución de tamaño de grano se observa muy bien la importancia de los clastos de arena en la lámina superior, con un 92% del total.

Interpretación: Este tipo sólo se ha identificado en la laguna del Hornillo. Estas ritmitas se suelen originar en periodos donde el glaciar está próximo al lago (Brauer y Casanova, 2001). En este caso, la pared del circo del Hornillo estaría cubierta por un pequeño glaciar o un nevero, que desprendió trozos de hielo hacia el lago que incorporarían material de tamaño arena hacia el centro de la cuenca. La formación de este tipo de ritmitas, además estaría favorecido por la ausencia de un delta o de un punto de aporte individualizado en la cubeta del Hornillo. Como esta cuenca de drenaje no tiene arroyos, los episodios de fusión y desprendimiento penetrarían desde la pared del circo, sin jerarquizarse en una red de drenaje, hecho que favorecería un mayor aporte de partículas gruesas.

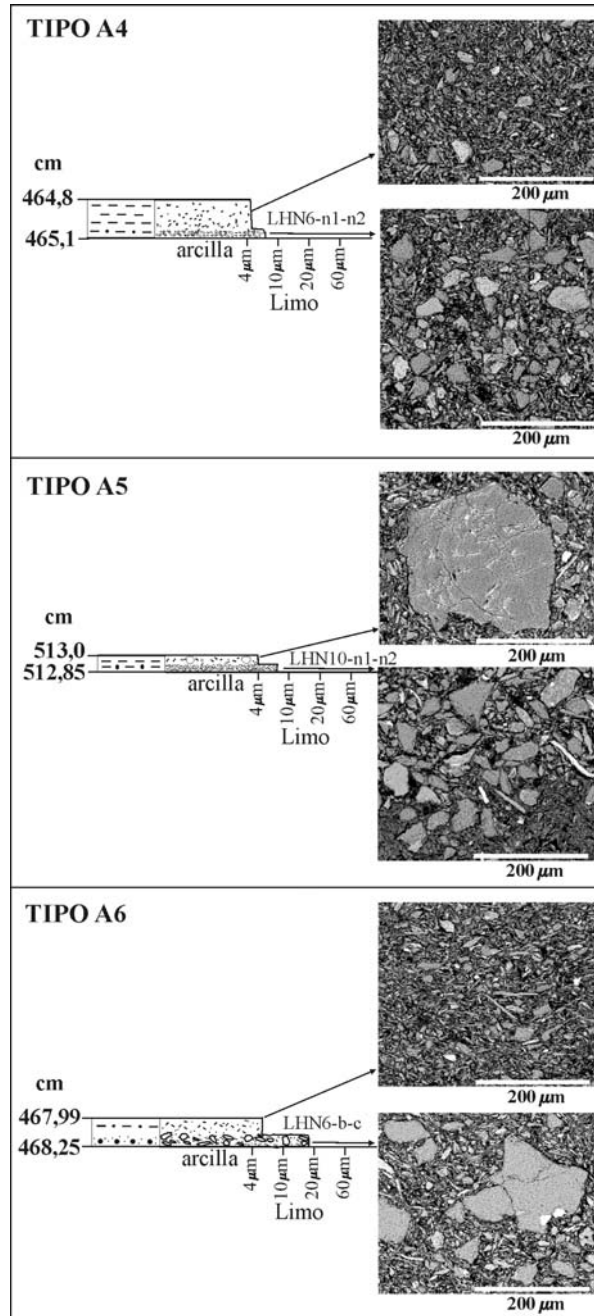


Figura 5. Columnas estratigráficas e imágenes BSE de microscopio electrónico de las ritmitas siliciclásticas simples: Tipo A4, Pares de limos grano-soportados con matriz/limos matriz-soportados con restos orgánicos. Tipo A5: Pares de limos grano-soportados, mal seleccionados, con materia orgánica/arcillas con limos y arenas. Tipo A6: Pares de limos gruesos y arenas matriz-soportados/arcillas con limos dispersos.

Figure 5. Stratigraphical columns and BSE electronic microscopy images of single detrital rhythmites: Type A4, pairs of grain-supported silts with matrix/matrix-supported silts with organic remains. Type A5, pairs of poor selected grain-supported silts with organic matter/clays with silts and sands grains. Type A6, pairs of matrix-supported sands and coarse silts/clays with dispersed silts.

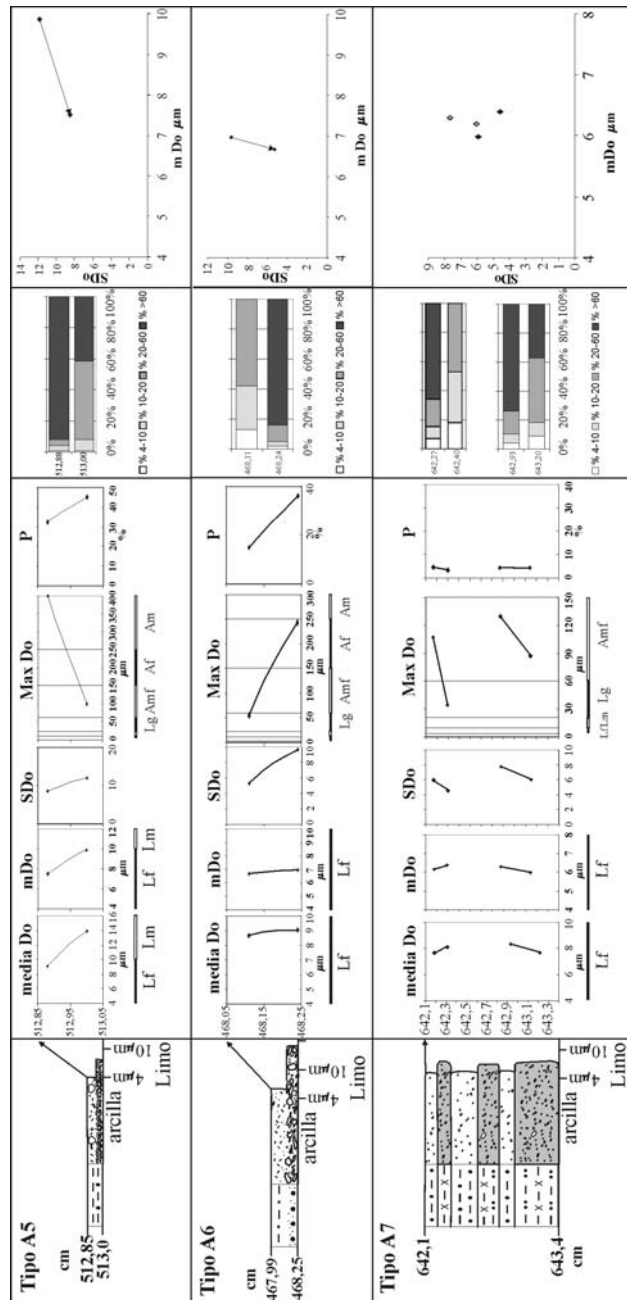


Figura 6. Representación gráfica de los índices texturales calculados mediante análisis digital de imágenes para las ritmitas de tipo A5, A6 y A7. media Do: media del tamaño de grano; mDo: mediana del tamaño de grano; SDo: desviación estándar; Max Do: centil; P: porcentaje de partículas del esqueleto; (%4-10; %10-20; %20-60 y %>60) corresponde al porcentaje de partículas en los intervalos 4-10 μm , 10-20 μm , 20-60 μm y mayores de 60 μm . Gráfico mDo/SDo, con los valores de la mediana y la desviación estándar del tamaño de grano.

Figure 6. Textural indexes plots measured by digital image analysis. Rhythmites A5, A6 and A7. mediaDo: average of grain size; mDo: median of grain size; SDo: standard deviation; MaxDo: centil; P: percentage of skeletal grains; (%4-10; %10-20; %20-60 and %>60) percentage of grains between 4-10 μm , 10-20 μm , 20-60 μm and grains greater than 60 μm . mDo/SDo plot with median and standard deviation of grain size.

4.1.6. Tipo A6: Pares de limos gruesos y arenas matriz-soportados / arcillas con limos dispersos

Lámina inferior- La característica fundamental es la presencia de clastos de cuarzo de tamaño arena y limo grueso, matriz-soportados en limos finos y arcilla (Fig. 5).

Lámina superior- Partículas de arcilla con limos dispersos.

Índices texturales: (Fig. 6). Lo más reseñable es el tamaño del centil en la lámina inferior, que está próximo al tamaño arena media (243 mm). En la lámina superior el centil desciende hasta el intervalo de limo grueso (54 mm) y el índice P es del 14,5%, como consecuencia del contenido en limo de esta lámina.

Interpretación: Este tipo se ha identificado, únicamente, en la laguna del Hornillo. El modelo propuesto para la lámina inferior es la formación de *mud-flows* a partir de flujos profundos de baja densidad. Estos flujos de reología plástica y de baja energía son capaces de incorporar partículas arcillosas en el fondo de la cuenca (Shamungham, 2000). La incorporación de granos arenosos como granos flotantes, remarcan la reología plástica del flujo (Shanmugam, 2002). La formación de este tipo de deslizamientos subacuados de pequeña entidad estaría favorecido por episodios de fusión que penetrarían desde la pared del circo sin jerarquizarse en una red de drenaje. Otra hipótesis para el origen de las partículas gruesas de la lámina inferior puede ser por una procedencia eólica, de tal forma que se acumularían partículas de limo y arena sobre la capa de hielo que cubriría la laguna durante el invierno debido a fuertes vientos (Lamoureaux & Gilbert, 2004). Posteriormente, estas partículas se incorporarían a la lámina gruesa durante las primeras etapas de fusión en primavera. La lámina superior se formaría por decantación del material detrítico fino durante los meses de invierno.

4.1.7. Tipo A7: Laminitas de limos matriz-soportados, con materia orgánica / arcillas, con limos dispersos y materia orgánica

Estas laminaciones se han identificado en los dos registros y presentan espesores muy variables, entre 1 y 7 mm. Lo más característico es que no se reconocen pares de láminas como en las ritmitas anteriormente descritas, por ello, no ha sido posible

identificar un patrón de sedimentación anual, puesto que no hay diferencias claras entre láminas gruesas de fusión, ni láminas más finas de invierno. Solamente alternan láminas con clastos de cuarzo matriz-soportados en arcilla y materia orgánica amorfa (Fig. 7), con láminas formadas por partículas de arcilla con limos dispersos, mal seleccionados y escasos restos de materia orgánica (Fig. 7).

Índices texturales: (Fig. 6). Como no tienen un patrón anual, se han analizado varias láminas con el objetivo de identificar alguna tendencia textural. El elevado contenido en arcilla en todas las láminas se observa claramente en el índice P, que no supera el 6%. La distribución de intervalos texturales es muy variable en todas las láminas, predominando la arena (65-80%) y limo grueso (18-20%) en las láminas con limos grano-soportados. En cambio, en las láminas más arcillosas la fracción limo fino es mayor (9-18%).

Interpretación: Este tipo se formaría a partir de material proveniente de una cuenca de drenaje con cubierta edáfica más evolucionada, que aportaría más partículas arcillosas y restos orgánicos a la sedimentación. La ausencia de una lámina típicamente de invierno, hace muy poco probable la existencia de una capa de hielo permanente durante periodos prolongados. Los restos de materia orgánica están oxidados, lo que indica una degradación parcial en condiciones subacuáticas por procesos de bioturbación (Meyers y Lallier-Vergès, 1999), que enmascaran parcialmente la textura original. Además, las precipitaciones estacionales deberían ser menos intensas o, en todo caso, se habría desarrollado una cubierta vegetal, que reduciría significativamente el aporte de extracuencales. Los cuarzos dispersos también podrían provenir de los granos que se incorporan con las turbas flotantes. Este tipo de laminitas indican una reducción en la cantidad de aportes detríticos y una estacionalidad menos marcada, que son reflejo de un cambio ambiental.

4.2. Ritmitas siliciclásticas múltiples (más de dos láminas)

4.2.1. Tipo B1: Ritmitas formadas por 4 láminas

Se han identificado en las dos lagunas de estudio y su espesor varía entre 1 y 10 mm. Los mayo-

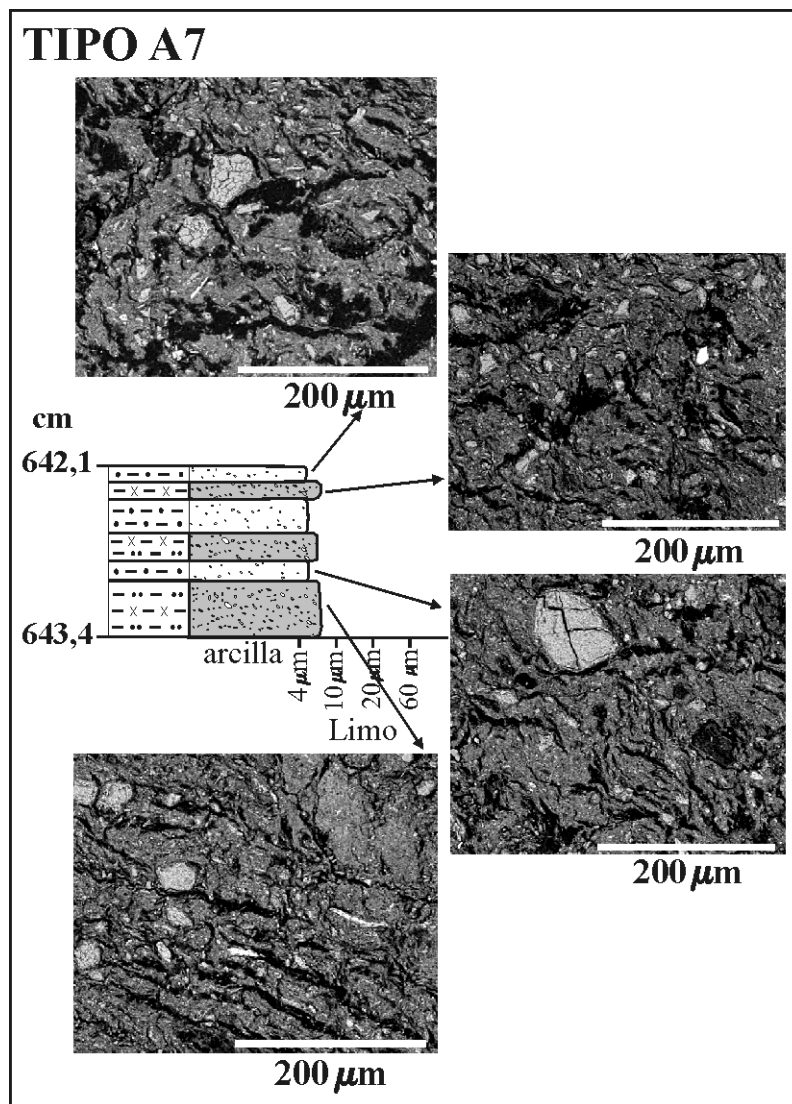


Figura 7. Columnas estratigráficas e imágenes BSE de microscopio electrónico de las laminitas siliciclásticas Tipo A7, Laminitas de limos matriz-soportados, con materia orgánica/arcillas con limos dispersos y materia orgánica.
Figure 7. Stratigraphical columns and BSE electronic microscopy images of detrital laminites Type A7, matrix-supported silts with organic matter/clays with dispersed silts and organic matter.

res espesores (8-10 mm) se suelen encontrar en el registro de la laguna Grande.

Lámina inferior gruesa 1: Limos finos sin matriz, similar a la lámina inferior del tipo A1 (Fig. 8). El índice P es el mayor de las 4 láminas, con un 30,4% (Fig. 9).

Lámina fina 1: Limos finos con matriz arcillosa (Fig. 8). El índice P desciende hasta el 20%, en comparación con la lámina inferior 1 (Fig. 9).

Lámina gruesa 2: Limos finos grano-soportados sin matriz (Fig. 8), con pequeñas concreciones de siderita y vivianita. Los índices texturales tienen valores inferiores que la lámina gruesa 1 y el índice P aumenta hasta un 30% (Fig. 9).

Lámina fina de techo 2: Es una lámina arcillosa, con alguna partícula de limo fino disperso (Fig. 8). El índice P disminuye drásticamente hasta un 2-3% (Fig. 9).

Interpretación: Este tipo de ritmitas han sido descritas por Smith (1978) y están formadas por una tripleta con dos láminas gruesas, separadas por una lámina más fina, correspondientes a la sedimentación de verano. Estos eventos de sedimentación sub-anual son frecuentes en las varvas detríticas (Lambert y Hsü, 1979; Desloges, 1994) y pueden identificarse porque los límites de la lámina fina 1 no son tan nítidos como el límite entre la lámina arcillosa de invierno y la lámina de limos de primavera de una varva con 2 láminas (Brauer y Casanova, 2001). Estas tripletas se piensa que son el resultado de dos máximos separados en el aporte (Smith, 1978): 1) fusión de la capa de nieve durante el final de la primavera y el comienzo del verano; y 2) fusión glaciár durante o al final del verano. El máximo aporte nival puede ocurrir muy temprano en la estación de fusión, antes de que la estratificación del lago comience a estar bien desarrollada. Entonces, este aporte temprano de sedimentos se decantaría en el fondo antes de que se produjera el máximo de fusión glaciár posterior. Los picos mayores de fusión nival no se producen cada año, dependiendo de la acumulación de nieve en invierno y de la tasa de fusión. Además, normalmente, son de más corta duración y transportan menos sedimento que los flujos posteriores derivados de la fusión glaciár. Por ello, la lámina inferior de la tripleta es, normalmente, más delgada que la lámina de limo más alta. La lámina fina 1 intermedia entre las dos láminas gruesas varía en espesor,

pero frecuentemente es más delgada y ligeramente visible e indica la existencia de múltiples eventos (Shaw y Archer, 1978). La lámina de techo arcillosa es similar a la del tipo A1, identificándose un patrón de sedimentación anual. La Fig. 9 muestra el gráfico mDo-SDo con una tendencia doble, que marca muy bien los cuatro episodios de sedimentación de esta ritmita.

4.2.2. Tipo B2: Ritmitas formadas por 10 láminas

Este tipo de ritmitas sólo aparecen en el registro de la laguna del Hornillo y el espesor siempre es superior a 10 mm, pudiendo encontrar ritmitas de hasta 14 mm.

Lámina inferior gruesa 1: Limos grano-soportados mal seleccionados, sin matriz y concreciones de siderita (Fig. 8). La media y la mediana del tamaño de grano son las más bajas de todas las láminas gruesas analizadas (Fig. 9).

Lámina fina 1: Limos finos matriz-soportados en arcilla (Figs. 8 y 9).

Lámina gruesa 2: Limos gruesos grano-soportados, con escasísima matriz arcillosa, con restos de materia orgánica y concreciones de siderita (Fig. 8). El índice P aumenta hasta un 37% y el centil está dentro del intervalo de arena fina, siendo el mayor de todos los analizados en este tipo de ritmita (Fig. 9).

Lámina fina 2: Limos finos con matriz arcillosa y restos orgánicos (Figs. 8 y 9).

Lámina gruesa 3: Limos medios grano-soportados sin matriz (Fig. 8). Valores texturales similares a los descritos en la lámina gruesa 2 (Fig. 9).

Lámina fina 3: Limos finos grano-soportados (Fig. 8). Es de bajo espesor (0,5 mm), en ocasiones difícil de distinguir. Valores texturales similares a la lámina fina 2 (Fig. 9).

Lámina gruesa 4: Limos medios grano-soportados, con escasa matriz, restos de materia orgánica y concreciones de siderita (Fig. 8). Valores texturales muy similares a las láminas gruesas 2 y 3 (Fig. 9), salvo el índice P que es ligeramente mayor (42%).

Lámina fina 4: Es la lámina fina de mayor espesor (hasta 7mm) y está formada por limos finos matriz-soportados en arcilla, con materia orgánica y parches de siderita (Fig. 8). La media y la mediana del tamaño de grano son constantes en toda la lámina (Fig. 9).

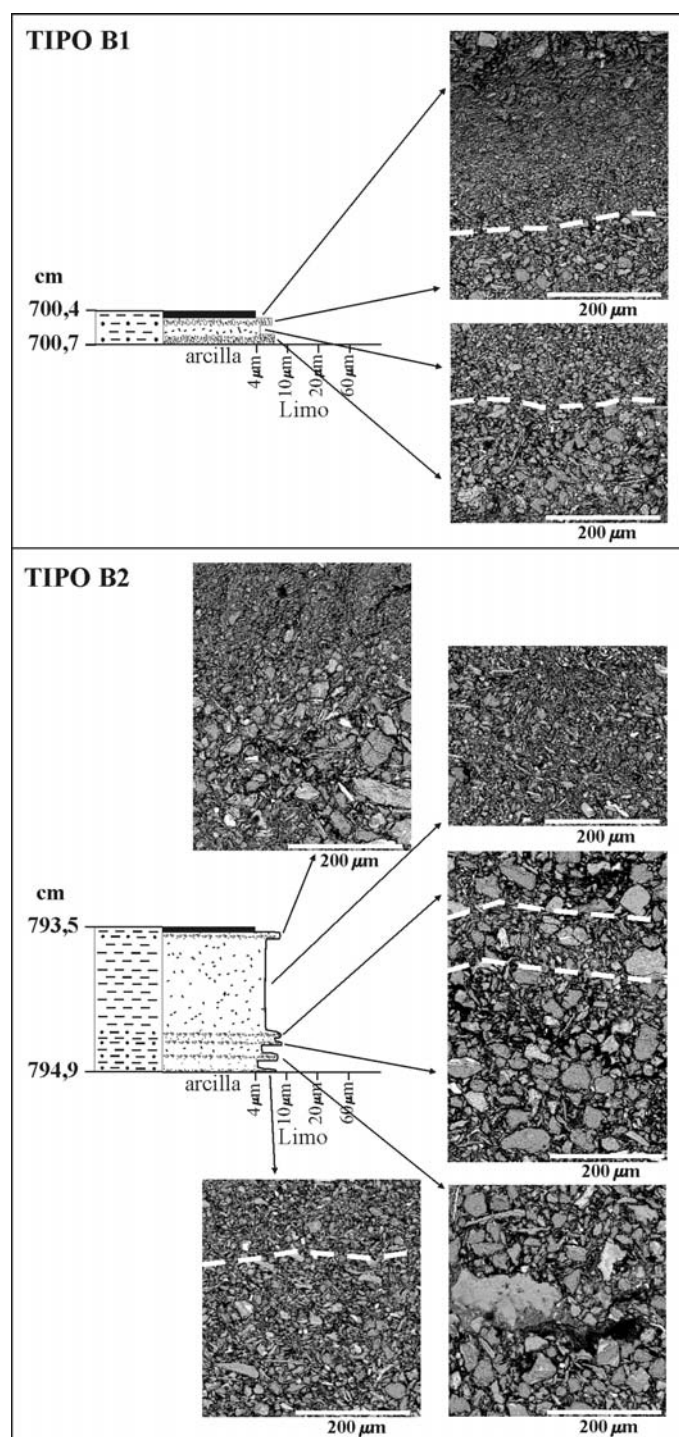


Figura 8. Columnas estratigráficas e imágenes BSE de microscopio electrónico de las ritmitas siliciclásticas múltiples: Tipo B1, formadas por 4 láminas. Tipo B2: Ritmitas formadas por 10 láminas.
Figure 8. Stratigraphical columns and BSE electronic microscopy images of multiple detrital rhythmite: Type B1, 4 laminae on each annual cycle. Type B2, 10 laminae on each annual cycle.

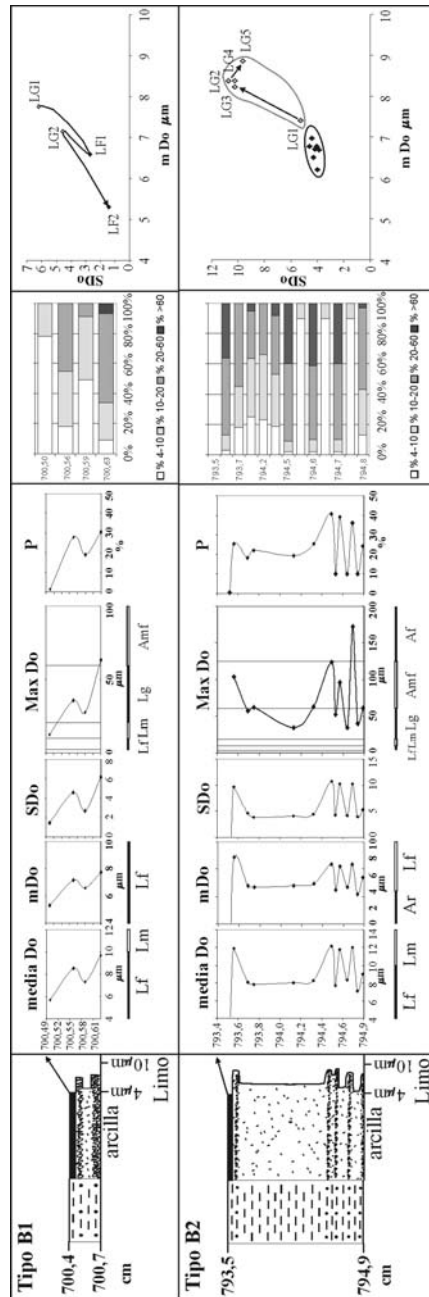


Figura 9. Representación gráfica de los índices texturales calculados mediante análisis digital de imágenes para las ritmitas múltiples de tipo B1 y B2. media Do: media del tamaño de grano; mDo: mediana del tamaño de grano; SDo: desviación estándar; Max Do: centil; P: porcentaje de partículas del esqueleto; (%4-10; %10-20; %20-60 y %>60) corresponde al porcentaje de partículas en los intervalos 4-10 µm, 10-20 µm, 20-60 µm y mayores de 60 µm. Gráfico mDo/SDo, con los valores de la mediana y la desviación estándar del tamaño de grano.

Figure 9. Textural indexes plots calculated by digital image analysis. Multiple rhythmites B1 and B2. mediaDo: average of grain size; mDo: median of grain size; SDo: standard deviation; MaxDo: centile; P: percentage of skeletal grains; (%4-10; %10-20; %20-60 and %>60) percentage of grains between 4-10 µm, 10-20 µm, 20-60 µm and grains greater than 60 µm. mDo/SDo plot with median and standard deviation of grain size.

Lámina gruesa 5: Limos grano-soportados, con un bajo contenido en matriz (2%) y escasa materia orgánica (Figs. 8 y 9).

Lámina fina de techo 5: Es marcadamente arcillosa, con restos de materia orgánica y parches de siderita (Fig. 8).

En este tipo cabe destacar la evolución del índice P en la vertical, que muestra un aumento progresivo en las láminas gruesas, hasta la lámina 4, y que desciende significativamente en la lámina 5 (Fig. 9). Este hecho apunta a que el mayor aporte de sedimentos se produciría al final de la estación de verano, probablemente, coincidiendo con la mayor fusión de hielo. Texturalmente, las láminas finas 1, 2 y 3 son muy similares, con un predominio de limos finos (80%). En la lámina fina 4, en cambio, aparecen representados todos los intervalos, aunque el mayoritario es la fracción limo grueso y medio (Fig. 9). El gráfico mDo-SDo es más complejo y muestra un doble agrupamiento, pudiendo separarse dos conjuntos bien definidos para las láminas finas y las gruesas (Fig. 9).

Interpretación: Este tipo está formado por 5 episodios de sedimentación de material más grueso, separados entre sí por 4 láminas de granulometría más fina y una lámina arcillosa que marca el final del ciclo de sedimentación. Se ha seguido el mismo criterio en su identificación que para el tipo B1, donde las láminas finas intermedias no corresponden a la sedimentación de la estación de invierno. Estas ritmitas son buenos indicadores, pues registran múltiples eventos estacionales sucedidos a lo largo de un año. La lámina gruesa inferior 1 podría corresponder con las primeras fusiones de nieve al comienzo de primavera, que fueron originadas por descargas superficiales, debido al menor tamaño de grano que presentan (Fig. 9). En cambio, las láminas gruesas 2, 3 y 4 se originarían por pulsos de fusión del hielo y/o por episodios de precipitaciones más fuertes, probablemente, asociados a tormentas. La lámina gruesa 5 se puede interpretar como un aporte por fenómenos meteorológicos extremos al final de la estación de otoño. La lámina arcillosa del techo marca el final del ciclo de sedimentación anual y se ha interpretado como un depósito de invierno bajo cubierta de hielo en la laguna.

5. Implicaciones paleoambientales y paleoclimáticas

Las ritmitas siliciclásticas descritas anteriormente están presentes desde el comienzo de la sedimentación en estos lagos glaciares, hasta la base del Holoceno (Fig. 10) y son el tipo de facies predominante, junto con las capas gradadas de bajo espesor (*debris-flows*, *mud-flows* y turbiditas, según Vegas 2006). Todas ellas se combinan en diferentes asociaciones de facies, que se han empleado para la interpretación ambiental y climática de estos registros (Vegas, 2006). Estas ritmitas, por si solas, no son indicadoras exclusivas de un tipo climático, es mediante el estudio detallado de las asociaciones de facies y de la geomorfología del entorno de las lagunas, donde se interpreta el ambiente y los condicionantes climáticos que pudieron originarlas (Tablas 3 y 4). Posteriormente, aplicando la metodología de la estratigrafía de eventos (Björck *et al.*, 1998; Walker *et al.*, 1999), se han correlacionado los eventos climáticos detectados en la región de estudio a partir del análisis de facies y la cronología de las unidades sedimentarias, con los principales ciclos climáticos definidos para el Atlántico Norte (Fig. 10).

5.1. Laguna Grande

Las ritmitas siliciclásticas identificadas en este registro son: i) simples del tipo A1, A2, A3, A4, A7 y ii) múltiples de tipo B1. Estas ritmitas aparecen en 7 de las asociaciones de facies finamente laminadas (Tabla 3), que están directamente relacionadas con la dinámica proglaciar desde hace unos 20.420 a. Cal BP hasta el comienzo del Holoceno (Fig. 10). En la tabla 3 se detallan el significado limnogeológico y paleoambiental de las asociaciones de facies donde aparecen. Las ritmitas simples son mucho más abundantes y aparecen en todos los eventos climáticos desde el Último Máximo Glaciar (GS-2), hasta el estadal GS-1 (*Younger Dryas*) (Fig. 10). En cambio, las ritmitas múltiples B1 sólo se formaron durante el interestadial frío GI-1c, también denominado como *Older Dryas*, caracterizando a este evento con una gran variabilidad estacional (Fig. 10).

En este registro sedimentario las laminitas A7 aparecen durante el GI-1a (*Allerød*) y el GS-1

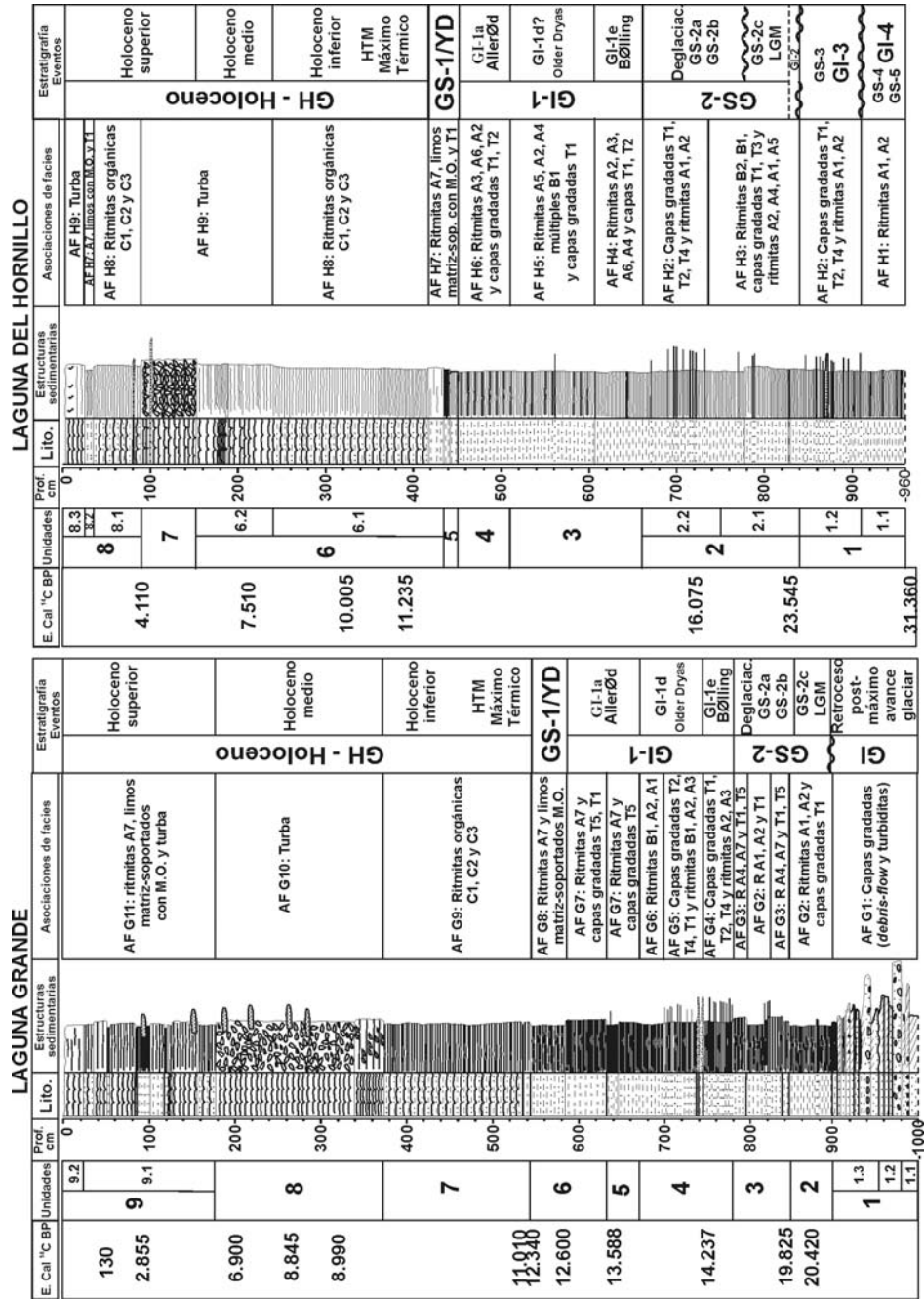


Figura 10. Asociaciones de facies y eventos paleoclimáticos identificados en los registros sedimentarios de la laguna Grande y la laguna del Hornillo. Se incluyen las columnas estratigráficas y las edades de radiocarbono calibradas (Vegas, 2006). Estratigrafía de eventos climáticos según Björck et al. (1998) y Walker et al. (1999). La línea ondulada representa posibles hiatos y bajas tasas en la sedimentación.

Figure 10. Facies Associations and paleoclimatic events identified in the sedimentary records of Grande and Hornillo lakes (Vegas, 2006). Stratigraphical sections and calibrated radiocarbon ages are included in the figure. Event Stratigraphy is based on Björck et al. (1998) and Walker et al. (1999). Undulated line represents most probably hiatus and low sedimentation rates.

Tabla 3. Asociaciones de facies de la laguna Grande (AF G) donde aparecen las ritmitas siliciclásticas descritas en este trabajo. Capas gradadas: T1, turbiditas con gradación normal y sin matriz. T2, mud-flows/turbiditas con gradación inversa en la base; T3, mud-flows con gradación inversa en la base y mud-chips arcillosos. T4, turbiditas con doble gradación normal. T5, debris-flows con abundantes restos orgánicos.

Table 3. Facies associations of Grande lake (AF G). Graded layers: T1, turbidites with normal gradation. T2, mud-flow/turbidites with inverse gradation on the base. T3, mud-flows with inverse gradation and mud-chips. T4, Double normal graded turbidites. T5, debris-flows with organic remains and clay matrix.

Tipos AF	Descripción	Ritmitas	Significado limnogeológico-paleoambiental	
Laguna Grande (tipo proglacial)	AF G1	Capas gradadas arenosas, con gravas de <i>tills</i> glaciares	-	Sedimentación subglaciar de <i>tills</i> en el margen de la lengua glaciar. Lengua glaciar muy próxima al lago dentro de un contexto de retroceso, posteriores al máximo avance glaciar. Fusiones rápidas de corta duración.
	AF G2	Ritmitas siliciclásticas simples A1-A2 y capas gradadas T1	A1-A2	Medio lacustre con gran influencia glaciar, estacionalidad marcada de tipo anual y un aporte de material detrítico muy bajo. Adelgazamiento de la lengua glaciar. Sistema glaciar con baja disponibilidad de agua líquida y/o suelo de la cuenca congelado.
	AF G3	Ritmitas siliciclásticas simples A4-A7 y capas gradadas T1-T5	A4-A7	Estacionalidad menos marcada e inviernos menos rigurosos. Ligero aumento de materia orgánica en los sedimentos con recuperación de cubierta edáfica. Glaciar restringido parte alta de los circos.
	AF G4	Capas gradadas T1-T2 y ritmitas simples A2-A3-A4	A2-A3-A4	Elevadas tasas de erosión glacio-fluvial y/o incremento disponibilidad de sedimentos en la cuenca de drenaje. Ligero desarrollo de la cubierta edáfica y vegetal en la cuenca de drenaje.
	AF G5	Capas gradadas T1-T2-T4 y ritmitas B1-A2-A1-A3	B1-A2-A1-A3	Predominio de capas gradadas por una mayor descarga de flujos y elevadas tasas de sedimentación. Estacionalidad marcada en una cuenca de drenaje desprovista de vegetación. Recrudescimiento climático.
	AF G6	Ritmitas siliciclásticas múltiples B1, simples A2-A3 y capas gradadas T1-T2	B1 A2-A3	Reavance de las condiciones glaciares, facies más proximales. Registro de eventos subanuales por estacionalidad muy marcada. Aumento de la precipitación, mayor componente nival y glaciar.
	AF G7	Laminillas A7, limos matriz-soportados con M.O. y capas gradadas T5-T1	A7	Estacionalidad mucho menos marcada y aumento productividad del lago. No se detecta en la sedimentación la influencia directa de los procesos glaciares en estas lagunas bajas de la Sierra de Neila.
	AF G8	Laminillas A7, limos matriz-soportados con M.O. y pirita	A7	Elevado contenido en M.O. por erosión de la cubierta edáfica y del litoral lacustre. Disminución lámina de agua, fondo anóxico con pirita y disminución de aporte detrítico.

(*Younger Dryas*). Sin embargo, en el GI-1a (*Allerød*) se encuentran en la asociación de facies 7 (Fig. 10), junto con capas gradadas de tipo turbidita (T1) y *debris-flow* con restos orgánicos (T5), que en conjunto indicarían una estacionalidad muy

poco marcada. En cambio, en el GS-1 (*Younger Dryas*), están formando parte de la asociación de facies 8 (Tabla 3), junto con capas de limos matriz-soportados y restos de materia orgánica alóctona (Fig. 10). Esta asociación 8 indicaría la erosión de

Tabla 4. Asociaciones de facies de la laguna del Hornillo (AF H) donde aparecen las ritmitas siliciclásticas descritas en este trabajo. Capas gradadas: T1, turbiditas con gradación normal y sin matriz. T2, mud-flows/turbiditas con gradación inversa en la base; T3, mud-flows con gradación inversa en la base y mud-chips arcillosos. T4, turbiditas con doble gradación normal. T5, debris-flows con abundantes restos orgánicos.

Table 4. Facies associations of Hornillo lake (AF H). Graded layers: T1, turbidites with normal gradation. T2, mud-flow/turbidites with inverse gradation on the base. T3, mud-flows with inverse gradation and mud-chips. T4, Double normal graded turbidites. T5, debris-flows with organic remains and clay matrix.

Tipos AF		Descripción	Ritmitas	Significado limnogeológico-paleoambiental
Laguna del Hornillo (circo glaciar)	AF H1	Ritmitas simples A1-A2 y múltiples B2-B1	A1-A2 B2-B1	Glaciar de circo con aportes subglaciares al lago en un único periodo al año. Cubierta de hielo gran parte del año. Estacionalidad marcada. Sedimentación controlada por baja disponibilidad sedimentos, que favorecerían la formación de laminaciones de tamaño de grano muy fino y bajo espesor.
	AF H2	Capas gradadas T1-T2-T4 y ritmitas siliciclásticas simples A1-A2	A1-A2	Retroceso glaciar, pérdida de espesor pasando a ser un nevero, con grandes aportes subglaciares. Incremento disponibilidad de sedimentos. Mayor proporción de capas gradadas frente a ritmitas
	AF H3	Ritmitas siliciclásticas múltiples B2-B1, capas T1-T3 y ritmitas simples A2-A4	B2-B1 A4-A7	Fase de nevero. Cambio hidrológico, régimen pluvio-nival. Predominan flujos subestacionales, con gran variabilidad anual. Inestabilidades en el talud del lago.
	AF H4	Ritmitas simples A2-A3-A4-A5-A6 y capas gradadas T1-T2	A2-A3- A4-A5-A6	Reducción del nevero. Estacionalidad marcada. Procesos periglaciares en la cuenca de drenaje. Abundante siderita, con ligera recuperación de la cubierta edáfica y colonización de las orillas.
	AF H5	Ritmitas siliciclásticas simples A5-A2-A4, múltiples B1 y capas gradadas T1	A5-A2-A4 B1	Presencia de <i>dropsilts</i> , acumulación de hielo en el circo, formación de un nevero. Estacionalidad marcada por un recrudescimiento climático.
	AF H6	Ritmitas siliciclásticas simples A3- A6- A2- A1 y capas gradadas T1-T2	A3- A6- A2-A1	Deslizamientos de los taludes del lago, con mayor aporte de sedimentos. Contraste estacional menos marcado, menor persistencia de la capa de hielo. Régimen pluvio-nival. Recuperación cubierta edáfica y vegetal.
	AF H7	Laminillas A7, limos matriz-soportados con M.O. y pirita	A7	Mayor contenido en M.O. por erosión de la cubierta edáfica y del litoral lacustre. Pérdida de la ritmicidad en las facies por disminución de la lámina de agua. Fondo anóxico con pirita y disminución acusada de aportes detríticos.

las orillas de la laguna, pérdida de la cubierta vegetal en la región de estudio y una disminución de la lámina de agua (Ruiz-Zapata *et al.*, 2002, 2003; Vegas *et al.*, 2003, Vegas, 2006).

5.2. Laguna del Hornillo

Las ritmitas siliciclásticas presentes en este registro son: i) simples de tipo A1, A2, A3, A4, A5,

A6, A7 y ii) múltiples de tipo B1 y B2. Estas aparecen en 7 de las asociaciones de facies relacionadas con la dinámica del glaciar de circo del Hornillo (Tabla 4), desde hace unos 31.360 a. Cal BP hasta el comienzo del Holoceno (Fig. 10). En la tabla 4 se incluye el significado limnogeológico y paleoambiental de las asociaciones de facies donde aparecen estas ritmitas siliciclásticas. Las ritmitas simples son mucho más abundantes y aparecen en

todos los eventos climáticos desde hace 31.360 a. Cal BP, hasta el final del estadal GS-1 (*Younger Dryas*). Sin embargo, las ritmitas múltiples de tipo B1 se sedimentaron durante el *Older Dryas* (GI-1d) y el estadal GS-2. También las ritmitas de tipo B2, que aparecen en la asociación de facies 1 y 3 (Tabla 4), son más características del estadal GS-2 (Fig. 10).

Es de destacar que sólo en este registro aparecen las ritmitas simples A5 y A6, donde el tipo A6 aparece principalmente en la asociación de facies 6 (Tabla 4), que es característica del subinterstadial GI-1a (*Allerød*), indicando una mayor inestabilidad del pequeño glaciar de circo. Aunque no pueden descartarse la existencia de fuertes vientos durante el invierno en estas regiones altas de la sierra. En cambio, el tipo A5 predomina en la asociación de facies 5 (Tabla 4, Fig. 10), que se formó durante el GI-1d (*Older Dryas*).

Las laminitas A7 en este registro sedimentario aparecen sólo durante el GS-1 (*Younger Dryas*), en la asociación de facies 7 (Tabla 4), junto con capas de limos matriz-soportados y restos de materia orgánica (Fig. 10). Esta asociación indicaría la erosión de las orillas de la laguna, pérdida de la cubierta vegetal en la región de estudio y una disminución de la lámina de agua en la laguna (Ruiz-Zapata *et al.*, 2000; Vegas *et al.*, 2003; Vegas, 2006).

Conclusiones

La aplicación del análisis digital de imágenes de microscopía electrónica de los sedimentos lacustres, se ha mostrado una herramienta fundamental en el estudio de las facies laminadas de grano fino (limo y arcilla). Con esta metodología se han podido analizar individualizadamente cada lámina, permitiendo obtener datos texturales cuantitativos para cada evento del registro sedimentario. El cálculo de los índices texturales, obtenidos a partir del análisis digital de imágenes de BSE, ha permitido identificar 7 tipos de ritmitas siliciclásticas simples (dos láminas por cada ciclo de sedimentación) y 2 tipos de ritmitas siliciclásticas múltiples (entre 4 y 10 láminas por cada ciclo). Todas las ritmitas analizadas anteriormente tienen dos características básicas, que son comunes a todas

ellas: 1) Su elevado contenido en cuarzo en las láminas inferiores de los pares, siendo el componente fundamental del esqueleto; 2) La media y la mediana del tamaño de grano se sitúan en los intervalos de limo fino (4-10 mm) y limo medio (10-20 mm).

Las cuencas de drenaje de los dos lagos tienen la misma litología (areniscas y conglomerados del Grupo Urbión, Cretácico Inferior) y una orientación similar de sus circos glaciares (E). A pesar de ello, se ha comprobado que las diferencias en el contexto geomorfológico y en los procesos activos de las cuencas de drenaje de estos lagos alpinos, han afectado significativamente el patrón de los sedimentos laminados de las lagunas estudiadas. Por ello, los sedimentos laminados han reflejado de manera diferente los cambios ambientales y climáticos ocurridos, dependiendo del tipo de lago en el cual se forman: a) un lago de tipo proglaciar, como es la laguna Grande (Sierra de Neila) situado a cotas más bajas (1.510 m s.n.m.) y b) un lago de sobre-excavación de un circo glaciar (1.800 m s.n.m.), como es la laguna del Hornillo (Sierra de Urbión).

En conclusión, en la laguna Grande las ritmitas están influenciadas por una cuenca de drenaje mayor que la del Hornillo, con mayor distancia de transporte y mayor disponibilidad de sedimentos, así como por las características físicas de esta laguna. Este registro sedimentario de tipo proglaciar es más sensible a las fluctuaciones glaciares, en comparación con el registro de la laguna del Hornillo (situada en un circo glaciar).

En cambio, en la laguna del Hornillo la cuenca de drenaje es un circo glaciar, donde las ritmitas están influenciadas por una menor distancia de transporte y una menor disponibilidad de sedimentos. Por ello, los archivos paleoclimáticos situados en las lagunas de circos glaciares pueden quedar enmascarados y, de hecho, también están controlados por el mayor tiempo que el glaciar ocupa en la posición más alta del sistema glaciar en estas sierras. Los eventos estadales más fríos del Pleistoceno superior son más difíciles de situar en el registro de la laguna del Hornillo que, en parte, es debido a un menor número de dataciones radiométricas. Por las características geomorfológicas de esta cuenca y el análisis de facies, podría haber amplios periodos temporales durante los cuales la

sedimentación estaría muy restringida, la laguna estaría cubierta permanentemente por el hielo y el drenaje sería reducido. En este contexto, se puede suponer que el glaciario ocuparía las cotas más elevadas de los circos en estas sierras del Sistema Ibérico, con una baja alimentación nival que limitaría la acumulación y su crecimiento. Por ello, probablemente, los procesos de sedimentación más activos ocurrirían durante los eventos interestadiales de menor duración, en comparación con los eventos estadiales.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de la Tesis Doctoral de la autora, financiada por ENRESA y el C.S.N. dentro del proyecto PALEOCLIMA y por una beca predoctoral de la UCM. Agradezco sinceramente a mis directores, Alfredo Pérez-González y Rafaela Marfil, su ayuda y tutela científica durante esta investigación. También quiero expresar mi gratitud al Dr. Pierre Francus, quién me enseñó la metodología empleada en este trabajo durante las estancias que realicé en la Universidad de Massachusetts (U.S.A.). A David Uribe Larrea, Alfonso Benito, Youssef Himi, Blanca Ruiz-Zapata, Irene Ortolan, Miriam Dorado, M^a José López y Ana Valdeolmillos por su ayuda en los trabajos de campo. El manuscrito ha sido notablemente mejorado gracias a los comentarios y sugerencias de los revisores Ramón Juliá y Blas Valero-Garcés, así como del editor Gerardo Benito.

Referencias bibliográficas

- Alapieti, T. & Saarnisto, M. (1981). Energy dispersive X-ray microanalysis of laminated sediments from Lake Valkiajärvi, Finland. *Bull. Geol. Soc. Finland* 53, 3-9.
- Allen, J.R.M., Huntley, B. & Watts, W.A. (1996). The vegetation and climate of northwest Iberia over the last 14.000 yr. *J. Quat. Sci.* 11, 125-147.
- Allen, J.R.M., von Engelbrechten, S., Mitchell, F. & Huntley, B. (2001). A comparison of three European Holocene lacustrine palaeovegetation records at ca. 42°N. *Terra Nostra* 2001/2, 11-18.
- Anderson, R.Y. & Dean, W.E. (1988). Lacustrine varve formation through time. *Palaeog., Palaeoclim., Palaeoecol.* 62, 215-235.
- Antevs, E. (1922). The recession of the last ice sheet in New England. *Am. Geog. Soc. Res. Serv.* 11, 120pp.
- Ashley, G.M. (1975). Rhythmic sedimentation in glacial Lake Hitchcock, Massachusetts-Connecticut. En: *Glaciofluvial and Glaciolacustrine Sedimentation* (A.V. Jopling y B.C. McDonald, eds.), Spec. Pub. SEPM 23, 304-320.
- Berner, R.A. (1981). A new geochemical classification of sedimentary environments. *J. Sed. Petrol.* 51, 359-365.
- Björck, S., Walker, M.J.C., Cwynar, L.C., Johnsen, S., Knudsen, K-L, Lowe, J., Wohlfarth, B. & INTIMATE Members (1998). An event stratigraphy for the Last Termination in the North Atlantic region based on the Greenland ice-core record: a proposal by the INTIMATE group. *J. Quat. Sci.* 13, 283-292.
- Blass, A., Anselmetti, F. & Ariztegui, D. (2003). 60 years of glaciolacustrine sedimentation in Steinsee (Sustenpass, Switzerland) compared with historic events and instrumental meteorological data. *Eclogae geol. Helv.* 96 (1), S59-S71.
- Brauer, A. (1994). Weichselzeitliche Seesedimente des Holzmaars - Warvenchronologie des Hochglazials und Nachweis von Klimaschwankungen. *Documenta naturae* 85, 210.
- Brauer, A. & Casanova, J. (2001). Chronology and depositional processes of the laminated sediment record from Lac d'Annecy, French Alps. *J. Paleolim.* 25, 163-177.
- Brauer, A. & Negendank, J.F.W. (2002). The value of annually laminated lake sediments in Palaeoenvironment reconstruction. *Quat. Int.* 88, 1-3.
- De Geer, G. (1912). A geochronology of the last 12,000 years. 11th International Geological Congress 1910 Stockholm, *Compt. Rend.* 11, 241-253.
- Degens, E.T., Stoffers, P., Golubic, S. & Dickman, M.D. (1978). Varve chronology: estimated rates of sedimentation in the Black Sea deep basin. *In. Rep. D.S.D.P* 42(2), 499-508.
- Desloges, J.R. (1994). Varve deposition and the sediment yield record at three small lakes of the Southern Canadian Cordillera. *Artic Alp. Res.* 26, 130-140.
- Francus, P. (1997). *Contribution de la microsédimentologie assistée par analyse d'image aux reconstitutions paléoclimatiques de séquences lacustres du Quaternaire. Les exemples du lac Baïkal (Sibérie), de Vico (Italie) et de Nogaret (France)*. Tesis Doctoral, Université Catholique de Louvain, 345 pp.
- Francus, P. (1998). An image-analysis technique to measure grain-size variation in thin sections of soft clastic sediments. *Sed. Geol.* 121, 289-298.
- Francus, P. & Asikainen, C. (2001). Sub-sampling unconsolidated sediments: a solution for the preparation of undisturbed thin-sections from clay-rich sediments. *J. Paleolim.* 26, 323-326.
- Francus P., Bradley R.S., Abbott M.B., Patridge W. & Keimig F. (2003). Paleoclimate studies of minerogenic sediments using annually resolved textural parameters. *Geophys. Res. Lett.* 29(20): Art. No. 1998
- Francus, P. & Saarinen, T. (1999). Advances in varved sediments studies help paleoclimate reconstructions. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union* 80 (33), 422-424.
- García Ruiz, J.M., Ortigosa, L., Arnáez, J. & Pellicer, F. (1997). Geomorfología glacial del Sistema Ibérico. En: *Las Huellas Glaciares de las montañas españolas* (Gómez Ortiz, A. &

- Pérez Alberti A., eds.), Universidade de Santiago de Compostela, 349-381.
- Gómez-Lobo, A. (1993). *Historia de la vegetación durante los últimos 15.000 años en los Picos de Urbión (Soria) en base al análisis polínico*. Tesis Doctoral, Universidad de Alcalá, Madrid (España). (Inédita).
- Gómez-Lobo, A., Atienza Ballano, M. & Ruiz Zapata, B. (1994). Datos palinológicos pertenecientes a dos turberas localizadas en Picos de Urbión (Soria). *Polen y Esporas: Contribución a su conocimiento. Serie Informes* 35, 393-399.
- Gómez-Lobo, A., Gil García, M.J., Atienza Ballano, M. & Ruiz Zapata, B. (1996). Evolución de la paleovegetación en el noroeste del Sistema Ibérico (Soria), durante los últimos 7000 BP. *Botánica Macaronésica* 23, 233-240.
- Gorsline, D.S. (1977). Changes in the depth of the oxygen minimum over a glacial cycle. *10th INQUA Congress 1977*. Birmingham.
- Jowsey, P.C. (1966). An improved peat sampler. *New Phytol.* 65, 245-248.
- Karlén, W. (1981). Lacustrine Sediment Studies. *Geografisk. Ann.* 63A, 273-281.
- Kelts, K. & Hsü, K.J. (1978). Freshwater carbonate sedimentation. En: *Lakes, Chemistry Geology Physics* (A. Lerman, ed.), Springer. 295-323.
- Kempe, S. (1977). Hydrographie, Warvenchronologie und Organische Geochemie des Van Sees, Ost-Türkei. *Mitt. Geol. Pal. Inst. Univ. Hamburg* 47, 125-228.
- Lambert, A.M. & Hsü, K.J. (1979). Varve-like sediments of the Walensee, Switzerland. En: *Moraines and Varves; origin, genesis, classification* (C. Schluochter, ed.). A.A. Balkema, Rotterdam, 287-298.
- Lamoureux, S.F. & Bradley, R.S. (1996). A late Holocene varved sediment record of environmental change, northern Ellesmere Island, Canada. *J. Paleolim.* 16, 239-255.
- Lamoureux, S.F. & Gilbert, R. (2004). A 750-yr record of autumn snowfall and temperature variability and winter storminess recorded in the varved sediments of Bear Lake, Devon Island, Arctic Canada. *Quat. Res.* 61, 134-147.
- Last, W. (2001). Textural analysis of lake sediments. En: *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Physical and Geochemical Methods* (W. Last & J. Smol, eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 41-81.
- Leemann, A. & Niessen, F. (1994a). Varve formation and the climatic record in an Alpine proglacial lake. *The Hol.* 4(1), 1-8.
- Leemann, A. & Niessen, F. (1994b). Holocene glacial activity and climatic variations in the Swiss Alps: reconstructing a continuous record from proglacial lake sediments. *The Hol.* 4(3), 259-268.
- Lotter, A.F. & Lemcke, G. (1999). Methods for preparing and counting biochemical varves. *Boreas* 28, 243-252.
- Mas, J.R. & García, A. (Coords.) (2004). Segunda fase de rifting: Jurásico Superior-Cretácico Inferior. En: *Geología de España* (J.A. Vera, ed.). Sociedad Geológica de España e Instituto Geológico y Minero de España, 503-510.
- Meyers, P.A. & Lallier-Vergès, E. (1999). Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates. *J. Paleolim.* 21, 345-372.
- Ohlendorf, C., Niessen, F. & Weissert, H. (1997). Glacial Varve Thickness and 127 Years of Instrumental Climate Data: A Comparison. *Clim. Change* 36, 391-411.
- Ojala, A.E.K. & Francus, P. (2002). X-ray densitometry vs. BSE-image analysis of thin-sections: a comparative study of varved sediments of Lake Nautajärvi, Finland. *Boreas* 31, 57-64.
- Ortega, L. & Centeno, J.D. (1987). Nota sobre nuevos focos glaciares detectados en la Sierra de Neila (NW del Sistema Ibérico, España). *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Geología)* 82, 147-150.
- Ruiz Zapata, M.B., Gil García, M.J., Dorado, M. & Valdeolillos, A. (2000). Estudio palinológico de los sondeos de laguna Grande (Quintanar de la Sierra) y laguna del Hornillo. En: Informe final del proyecto de investigación: *Estudio sobre la evolución paleoambiental de la mitad norte de la Península Ibérica*. ENRESA – C.S.N., Vol. 2, 140-186. (Inédito)
- Ruiz Zapata, M.B., Gil García, M.J., Dorado, M., Valdeolillos, A., Vegas, J. & Pérez-González, A. (2002). Clima y vegetación durante el Tardiglacial y el Holoceno en la Sierra de Neila (Sistema Ibérico Noroccidental). *Rev. C. & G.* 16 (1-2), 9-20.
- Ruiz Zapata, M.B., López Saéz, J.A., Vegas, J., López García, M.J., Pérez González, A., Gil García, M.J., Dorado Valiño, M. & Valdeolillos, A. (2003). Environmental changes during the Late Glacial-Holocene transition in Sierra de Neila (Laguna Grande Lacustrine record, Spain). En: *Quaternary climatic changes and environmental crises in the Mediterranean Region* (B. Ruiz Zapata, M. Dorado, A. Valdeolillos, M.J. Gil García, T. Bardají, I. De Bustamente & I. Martínez Mendizábal, eds.). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares (España), 139-147.
- Sanz Pérez, E. (1994a). *Inventario-Estudio sobre el glaciario y periglaciario de las Sierras de la Demanda y Neila*. Dirección General del Medio Natural. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de Burgos. 94 pp. (Inédito)
- Sanz Pérez, E. (1994b). *Inventario-Estudio sobre el glaciario y periglaciario de las Sierras de Urbión y Cebollera*. Dirección General del Medio Natural. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de Soria. 114 pp. (Inédito)
- Sanz Pérez, E. (2001). *Las montañas de Urbión, Cebollera y Cabrejas. Geomorfología y Patrimonio Geológico*. Ediciones de la Excm. Diputación Provincial de Soria. Colección temas Sorianos 43. 244 pp.
- Sauramo, M (1923). Studies on the Quaternary varve sediments in southern Finland. *Fennia* 44, 1-164.
- Schnurrenberger, D., Kelts, K., Johnson, T., Shane, L. & Ito, E. (2001). National lacustrine core repository (LacCore). *J. Paleolim.* 25, 123-127
- Schnurrenberger, D., Russell, J. & Kelts, K. (2003). Classification of lacustrine sediments based on sedimentary components. *J. Paleolim.* 29, 141-154.
- Shanmugam, G. (2000). 50 years of the turbidite paradigm (1950s-1990s): deep-water processes and facies models – a critical perspective. *Mar. Petrol. Geol.* 17, 285-342.

- Shanmugam, G. (2002). Ten turbidite myths. *Earth-Sci. Rev.* 58, 311-341.
- Shaw, J. & Archer, J. (1978). Winter turbidity current deposits in Late Pleistocene glaciolacustrine varves, Okanagan Valley, British Columbia, Canada. *Boreas* 7, 123-130.
- Smith, N.D. (1978). Sedimentation processes and patterns in a glacier-fed lake with low sediment input. *Can. J. Earth Sci.* 15, 741-756.
- Stuiver, M., Reimer, P.J., Bard, E., Beck, J.W., Burr, G.S., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, G., van der Plicht J. & Spurk, M. (1998). INTCAL98 Radiocarbon Age Calibration, 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon* 40, 1041-1083.
- Sturm, M. (1979). Origin and composition of clastic varves. En: *Moraines and Varves* (Ch. Schlüchter, ed.), A.A. Balkema, Rotterdam, 281-285.
- Sturm, M. & Matter, A. (1978). Turbidites and varves in Lake Brienz (Switzerland): deposition of clastic detritus by density currents. En: *Modern and Ancient Lake Sediments* (A. Matter & E. Tucker, eds.), *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment.* 2, 147-168.
- Thornes, J.B. (1968). Glacial and periglacial features in the Urbion Mountains, Spain. *Est. Geol.* XXIV, 249-258.
- Vegas, J. (2006). *Los sistemas lacustres de las sierras de Neila y Urbión. Análisis sedimentológico y climático del Pleistoceno superior y Holoceno.* Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid (España), 389 pp. (Inédita)
- Vegas, J., Ruiz-Zapata, B., López-García, M.J., Gil García, M.J., Dorado, M., Valdeolmillos, A. & Pérez-González, A. (2003). The GS-1/Younger Dryas event in the Laguna Grande lacustrine record. Late Glacial-Holocene transition in the NW Iberian Range, Spain. En: *Limnogeology in Spain: A tribute to Kerry R. Kelts* (B. Valero-Garcés, ed.), Colección Biblioteca de Ciencias, vol. 14, CSIC, Ecología y Medio Ambiente, Zaragoza, 283-304.
- Walker, M.J.C., Björck, S., Lowe, J.J., Cwynar, L.C., Johnsen, S., Knudsen, K.L., Wohlfarth, B. & INTIMATE group (1999). Isotopic 'events' in the GRIP ice core: a stratotype for the Late Pleistocene. *Quat. Sci. Rev.* 18, 1143-1150.
- Weninger, B., Jöris, O. & Danzeglocke, U. (2005). Software CalPal, 2-D Dispersion Calibration Program, versión Mayo 2005. *Cologne Radiocarbon Calibration Research Package.* www.calpal.de