



# El Lago de Sanabria: un sensor de las oscilaciones climáticas del Atlántico Norte durante los últimos 6.000 años

El registro de la Pequeña Edad del Hielo (LIA), los eventos Dansgaard-Oeschger (D-O), y el ciclo de Bond

---

Memoria presentada por JOSÉ ANTONIO LUQUE MARÍN, bajo la dirección del Dr. RAMON JULIÀ BRUGUÉS, para optar al título de DOCTOR EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Memoria realizada dentro del marco del Programa de Doctorado 'GEOLOGÍA ECONÓMICA y AMBIENTAL' del Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica (Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona)

Bienio 1998/2000

El Doctorando

JOSÉ ANTONIO LUQUE MARÍN

El Director de Tesis

Dr. RAMON JULIÀ BRUGUÉS  
Profesor de Investigación  
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)  
Instituto de Ciencias de la Tierra 'Jaume Almera' (Barcelona)

*Barcelona, 3 de febrero de 2003*





Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto de Ciencias de la Tierra 'Jaume Almera' (Barcelona)

# El Lago de Sanabria: un sensor de las oscilaciones climáticas del Atlántico Norte durante los últimos 6.000 años

El registro de la Pequeña Edad del Hielo (LIA), los eventos  
Dansgaard-Oeschger (D-O), y el ciclo de Bond

José Antonio Luque Marín  
Febrero 2003

La presente Tesis ha sido desarrollada principalmente gracias al financiamiento del proyecto científico AMB97-0376-03 "Indicadores ecológicos y paleolimnológicos de cambio global en una cuenca abierta *vs* una cuenca cerrada situadas en áreas climáticas diferentes" (CICYT). El Doctorando ha disfrutado de una Beca pre-Doctoral dentro del Programa de Formación de Personal Investigador (FPI) del Ministerio de Educación y Cultura (convocatoria: 18.11.97). El trabajo realizado ha sido efectuado fundamentalmente en el Instituto de Ciencias de la Tierra 'Jaume Almera' (Barcelona) (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC). Parte del trabajo ha sido desarrollado en las instalaciones del *Servei Científic-Tècnic* de la Universidad de Barcelona, así como en el *Environmental Radiation Research Laboratory (Department of Experimental Physics, University College Dublin (UCD))*. El trabajo realizado en el *Department of Experimental Physics (UCD)*, llevado a cabo entre agosto-octubre de 1999 y en junio de 2001, ha sido financiado por una Beca-Estancia del CSIC.

## Agradecimientos

*La realización de esta Tesis no hubiera sido posible sin el apoyo, directo o indirecto, de un gran número de personas e instituciones durante estos últimos años. Mis agradecimientos a todas ellas:*

- *Al Dr. Ramon Julià, director de la presente Tesis Doctoral, por introducirme en la investigación científica paleoclimática y paleolimnológica. Le agradezco toda la ayuda prestada en numerosas ocasiones, tanto personal como científica, relacionadas con cuestiones surgidas durante diversos aspectos del trabajo: cuestiones científicas, burocráticas, económicas, y tantas otras cosas. Mis agradecimientos también por introducirme en las técnicas de obtención de testigos sedimentarios, y por la obtención de los testigos del Lago de Sanabria.*
- *Al Dr. Francisco Comín y a la Dra. Caridad de Hoyos, por su apoyo personal y científico en cuestiones relacionadas con el ecosistema del Lago de Sanabria. Gracias por ayudarme siempre que lo he requerido. Mis agradecimientos al Dr. Francisco Comín por su ayuda en la extracción de testigos sedimentarios en el Lago de Sanabria durante los calurosos días de Julio de 1999.*
- *Al Dr. Francesc Burjachs y al Dr. Santi Giralt, por su apoyo personal y científico durante tanto tiempo compartiendo despacho. Gracias por ayudarme en todas las cuestiones surgidas durante estos últimos años.*
- *Al Dr. Santi Riera, por su apoyo personal y científico. Mis agradecimientos por realizar el análisis palinológico del registro del Lago de Sanabria y por su colaboración en la discusión paleoambiental desarrollada.*
- *Al Dr. Josep Ramon Roca, por su ayuda en la extracción de testigos sedimentarios en el Lago de Sanabria durante la campaña de Mayo de 2000.*
- *A Ana I. Negro y Juan Ángel Alejandro, compañeros de la Universidad de Salamanca, por su inestimable ayuda en muchísimas cuestiones relacionadas con el Lago de Sanabria, entre ellas, las de aportar los datos sobre las trampas de sedimentación. Gracias a Ana, por su inagotable disposición a ayudar siempre que era necesario; por su apoyo en todas las campañas de extracción de testigos (desde 1998 hasta 2000), por todos los comentarios y discusiones sobre el ecosistema del Lago de Sanabria (y sus diatomeas!), y por su hospitalidad en Zamora. Gracias a Juan Ángel, por ayudar en la campaña de extracción de testigos (Mayo de 2000), y por ayudar en muchas cuestiones relacionadas con las tareas científicas. Mis agradecimientos a Juan Ángel por realizar el análisis de diatomeas del registro del Lago de Sanabria.*
- *A José Carlos Vega, por ofrecer su hospitalidad durante las campañas de extracción de los testigos en el Lago de Sanabria, y por compartir sus conocimientos sobre el sistema lacustre. Por la lancha prestada para las 'excursiones' en el lago. Por echar un cable en requerimientos burocráticos. Por recibirnos en el Centro de Interpretación del Parque Natural del Lago de Sanabria (San Martín de Castañeda).*
- *A Jesús Palacios Alberti, director del Parque Nacional del Lago de Sanabria, por permitir llevar a cabo las actividades de extracción de los testigos sedimentarios y la utilización del albergue existente a las orillas del lago.*
- *Al Dr. Roger Flower, por su ayuda en cuestiones científicas relacionadas con el contenido en diatomeas del sedimento del Lago de Sanabria.*
- *A Juan Manuel Luque, por toda su inestimable colaboración en muchos aspectos relacionados con las cuestiones estadísticas y matemáticas de la Tesis. Muchas gracias por la ayuda prestada en estos últimos años, por la valiosa participación en el análisis estadístico desarrollado, y por su buen hacer con los números y la paciencia. Gracias!*

*Al equipo técnico y humano del Instituto de Ciencias de la Tierra 'Jaume Almera' CSIC, mi agradecimiento por la ayuda aportada durante el desarrollo de la tesis:*

- *A Mercè Cabañas, por realizar el análisis de ICP-MS del sedimento del Lago de Sanabria.*
- *A Josep Elvira y al Dr. Felicià Plana, por la realización del análisis mineralógico del sedimento mediante difracción de R-X, y por la aclaración de los problemas planteados.*
- *A Jesús Parga, por la elaboración de las láminas delgadas del sedimento.*
- *A Graciela Monzón, Silvia Rico y Sandra Toro, por compartir muchos momentos de laboratorio.*
- *Al Sr. Oriol, por preparar y arreglar diversos aspectos relacionados con el material de sondeo y el material analítico. Gracias.*
- *A Quico Burjachs, David Regüés, Lothar Schulte y Montse Soler, por compartir tantas comidas.*
- *A mis sucesivos compañeros de despacho: Quico Burjachs, Santi Giralt, Vicky, Joan Sánchez, Lidia Gómez, y Sergio Bea.*
- *A todos los becarios pre-doctorales del Instituto Ciencias de la Tierra "Jaume Almera", por compartir filosofía de trabajo.*
- *A Maria Izquierdo, Juan Carlos Umaña, Faviola Lacueva, Nuria Roca.*
- *A Ana Gómez y al Dr. Miquel Garcès, por compartir el 'deward' del nitrógeno.*
- *Al personal administrativo del Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaume Almera" CSIC: Assumpció Cercós, Leonor Fernández, Chelo Palacio, M. Rosa Ramis y Alejandro Santos.*
- *A Montse Caba, Amelia Salas y Xavi, por los 'buenos días' y las 'buenas tardes' en la recepción del Instituto.*

*Al equipo técnico y humano del Servei Científic-Tècnic de la Universitat de Barcelona, mi agradecimiento por la ayuda aportada: Ramon Fontarnau, Isidre Casals, Elionor Pelfort, y Santiago Mata. Asimismo, al servicio de Criogenia.*

*A Javier Morales, por el viaje en todoterreno a través de las lagunas y embalses del Parque Natural del Lago de Sanabria, hasta la presa Vega de Tera.*

*Al Archivo Municipal de Zamora, por facilitar el conocimiento y la consulta de documentos históricos de la región de Sanabria; por su amabilidad en la aclaración de cuestiones surgidas al respecto.*

*Al Dr. L. Araus (UB), por facilitar el análisis de  $\delta^{13}\text{C}$  de diversas muestras de sedimento del Lago de Sanabria.*

*Al Dr. Antoni Calafat (UB), por sus comentarios relacionados con el relleno sedimentario del Lago de Sanabria.*

*Al Dr. Ramon Vaquer (UB), por aceptar ser el tutor de mi tesis y llevar adelante todos los trámites de papeleo.*

*Al Área de Prehistoria (Universitat Rovira i Virgili, Tarragona), y en especial al Dr. Francesc Burjachs, por facilitarme realizar las fotos de láminas delgadas del sedimento del Lago de Sanabria.*

*De mis dos estancias en Dublín (Irlanda), quiero expresar mi agradecimiento a las siguientes personas:*

- *Al Dr. Eddie McGee, por reunir todos sus esfuerzos en preparar mi incorporación al 'Department of Experimental Physics (University College Dublin)', por preparar mi alojamiento en Dublín, por aprender sobre la aplicabilidad de la radiactividad en muestras ambientales, por su gran hospitalidad, por las montañas de Wicklow, por la campaña de muestreo en la bellísima costa noroccidental de Irlanda... Thanks Eddie!!*
- *Al Dr. Peter Mitchell, Director del 'Department of Experimental Physics (UCD)', por permitir mi incorporación a su departamento y enseñarme el proceso de calibración de detectores en espectrometría gamma. Mi agradecimiento por permitir trabajar en la realización de los análisis de  $^{210}\text{Pb}$  y  $^{137}\text{Cs}$  de las muestras sedimentarias del Lago de Sanabria.*
- *A todos los compañeros del 'Department of Experimental Physics' (Dr. Eddie McGee, Dr. Luis León-Vintró, Donal Gallagher, Julie Lucey, Robert Ryan, Kilian Smith, Catherine, Humberto Jiménez...), por trabajar con ellos en el laboratorio, por ayudarme en todas las cuestiones relacionadas con la espectrometría gamma y el análisis de  $^{210}\text{Pb}$  y  $^{137}\text{Cs}$ , por su hospitalidad y amabilidad.*
- *A Donal Gallagher, por ser un excelente anfitrión y por alojarme en su casa de Dublín. A todos los habitantes de la casa de Stillorgan, por hacerme sentir como en casa (Donal, Ciara, Meabh, Yvette).*
- *A Maggie, por alojarme en su casa de Dublín durante mi segunda estancia. Muchísimas gracias por la hospitalidad demostrada. Thanks a lot!!*
- *A Luis León Vintró, por toda la ayuda recibida con la espectrometría gamma, y por facilitarme las escasas desconexiones en castellano. Gracias por prestarme tu bicicleta!*
- *A Aidan Cronin, por alojarme en su casa en Belfast (Irlanda del Norte). A Giant's Causeway!*
- *Al Dr. Manel Leira (Trinity College Dublin), por su ayuda en cuestiones científicas, por su ayuda y amabilidad en la búsqueda de información bibliográfica en la biblioteca del campus universitario.*

*De mi estancia en Valencia, quiero expresar mi agradecimiento a las siguientes personas:*

- *A la Dra. Maria Rosa Miracle y al Dr. Eduardo Vicente, por permitir mi incorporación en el 'Departament de Microbiologia i Ecologia' (Universitat de Valencia) y enseñarme la metodología en los estudios limnológicos.*
- *A Carmen Ferriol y Teresa Bosque, por hacerme sentir como en casa en el 'Laboratorio Siberia', por enseñarme Valencia, y por su hospitalidad. Mis agradecimientos a Carmen por enseñarme las diferentes metodologías analíticas utilizadas en limnología.*
- *A todos los integrantes del 'Laboratorio Siberia', por el calor recibido: Dr. Antoni Camacho, Carmen Ferriol, Teresa Bosque, David Sánchez, Juan Rueda, Loles Boronat, María José Villena, Mari Loli Sendra.*
- *A la Dra. Susana Romo, Raquel Ortells y Sara Lapesa, por su hospitalidad.*
- *A David Caso, por facilitarme desde Barcelona el alojamiento en Valencia.*

*A la Biblioteca de Geología de la Universitat de Barcelona, por ayudarme sobre cuestiones bibliográficas: en especial a Miguel Ángel Plaza y a María José.*

*Al lector*

*Y, finalmente;*

*A mis amigos Justo Tarancón, Juan Manuel Luque, David Caso, y Jordi Serra, por compartir tantos kilómetros de senda, por respirar aire puro en tantas excursiones montañosas (por los conglomerados de Montserrat, por el Tagamanent, por la Vall de Núria, por la ruta de los Cátaros, por 'la ruta dels bons homes'...), por compartir tantas*

*partidas al 'snooker' y al billar. Mis agradecimientos a Laura Lluís, por acordarse de mí y avisarme; muchas gracias!!*

*A mis padres, a mi hermano Juan Manuel, a mi hermana Ana María, por todo el apoyo recibido en estos últimos años.*

U.S. 2015/01/01

Y a tí, Anna,  
por tu mirada,  
por tu apoyo,  
por tu sonrisa



*Formerly the earth produced all sorts  
of fruit, plants and roots.  
But now almost nothing grows...*

*Then the floods, the lakes and the blue waves  
brought abundant fish.  
But now hardly one can be seen.  
The misery increases more.  
The same applies to other goods...*

*Frost and cold torment people.  
The good years are rare.  
If everything should be put in a verse  
only a few take care of the miserables...*

*La Pequeña Edad del Hielo descrita por Olafur Einarsson,  
un pastor islandés (en Bryson, 1977)*

*Our years are turned upside down  
Our summers are no summers  
Our harvests are no harvests*

*La Pequeña Edad del Hielo descrita por John King, 1595*

*Aquí clavo mi estación,  
aquí salga un gargallón;  
aquí clavo mi espada,  
aquí salga un gargallón de agua.*

*Leyenda sobre el origen del Lago de Sanabria*

*Tú te vas, Verdosa,  
yo me quedo, Bamba,  
y hasta el fin del mundo  
no seré sacada.*

*Leyenda sobre las campanas de Villaverde,  
sumergidas en el Lago de Sanabria*

*Si las conquistas útiles a la humanidad impresionan vuestro corazón; si estáis emocionados ante los efectos sorprendentes de la telegrafía eléctrica, del daguerrotipo, de la anestesia y de tantos otros descubrimientos admirables; si estáis celosos de la parte que vuestro país puede reivindicar en el agotamiento de las maravillas, interesaos, os lo encarezco, por estas moradas sagradas que se conocen con el expresivo nombre de laboratorios. Pedid que los multipliquen y los adornen. Son los templos del futuro, de la riqueza y del bienestar. Allí será donde la humanidad se engrandezca, se fortifique y se convierta en mejor. Allí aprenderá a leer en las obras de la naturaleza, obras de progreso y de armonía universal...*

*Pasteur*

*... Acaso podamos preparar una cantidad mayor de esta difícil substancia. Para ello es necesario mineral y dinero. Ahora tenemos dinero, pero hasta el presente nos ha sido imposible obtener el mineral. En este momento nos anuncian que acaso podamos obtenerlo y probablemente podremos comprar la provisión que nos es necesaria y que nos negaban. La fabricación se desarrollará, pues. ¡Si supieran cuánto tiempo, paciencia y dinero se necesita para extraer de algunas toneladas de materias esta minúscula cantidad de radium!*

*Carta de Marie Curie a Józef Skłodowski,  
23 de diciembre de 1903 (La vida heroica de Marie Curie)*

*A mi familia*

*A Anna*



# Índice

---

<b>Introducción y objetivos</b> .....	1
---------------------------------------	---

## **Capítulo 0: Características paleoclimáticas del Atlántico Norte**

<b>0.0. El clima del Atlántico Norte: la NAO.</b> .....	4
0.0.1. El North Atlantic Oscillation (NAO). .....	4
0.0.1.1. ¿Qué es la NAO? .....	4
0.0.1.2. El índice de la NAO. ....	4
0.0.1.3. Modelos propuestos sobre el origen de la NAO. ....	6
<b>0.1. Periodicidades de fenómenos que afectan el clima de la región del Atlántico Norte.</b> .....	8
0.1.1. Periodicidades de subdecenas y decenas de años. ....	8
0.1.2. Periodicidades centenarias. ....	11
0.1.3. Periodicidades milenarias. ....	11
<b>0.2. Oscilaciones milenarias en el sistema climático.</b> .....	14
0.2.1. Oscilaciones milenarias durante los periodos glaciales. ....	14
0.2.1.1. Oscilaciones detectadas en los registros de hielo de Groenlandia. ....	14
0.2.1.2. Oscilaciones detectadas en los sedimentos marinos del Atlántico Norte. ....	17
0.2.1.3. Evidencia de un ciclo climático de 1.500 años en el Atlántico Norte. ....	20
0.2.1.4. Otras evidencias procedentes del Hemisferio Norte. ....	21
0.2.1.5. Evidencias procedentes del Hemisferio Sur. ....	22
0.2.2. Oscilaciones milenarias durante los últimos 8.000 años (periodo interglacial). ....	22
0.2.2.1. Registros de Groenlandia y del Atlántico Norte. ....	23
0.2.2.2. Otros cambios de escala milenaria durante las interglaciaciones. ....	24
<b>0.3. El ciclo climático de 1.500 años del Atlántico Norte.</b> .....	25
0.3.1. Relación de los eventos Heinrich con el ciclo climático de 1.500 años. ....	27
0.3.2. Relación de los ciclos Dansgaard/Oeschger con el ciclo climático de 1.500 años. ....	28
0.3.3. Relación de la Pequeña Edad del Hielo con el ciclo climático de 1.500 años. ....	30
<b>0.4. Causas de las oscilaciones climáticas de escala milenaria.</b> .....	32
0.4.1. Causa externa al sistema climático de la Tierra: la variabilidad solar. ....	32
0.4.2. Circulación oceánica profunda. ....	33
0.4.3. Otras causas: procesos internos de los casquetes glaciales (criosfera). ....	33
<b>0.5. La circulación termohalina y el NADW.</b> .....	34
0.5.1. El oscilador salino. ....	34
0.5.2. Circulación oceánica durante los eventos Dansgaard/Oeschger y eventos Heinrich. ....	34

## **Capítulo 1: Contexto geográfico, climático y geológico del Lago de Sanabria**

<b>1. Situación geográfica y contexto climático.</b> .....	36
1.1. Situación geográfica. ....	36
1.2. Características climáticas de la región de Sanabria. ....	38
1.3. El índice de la NAO y la precipitación en el Lago de Sanabria. ....	39
<b>2. Situación geológica.</b> .....	43
2.1. Situación general. ....	43
2.2. Estratigrafía general de la región de Sanabria. ....	45
2.3. Formación Olló de Sapo. ....	47

2.3.1. Gneis macroglandular: facies de megacristales. . . . .	47
2.3.2. Gneis microglandular: facies de grano fino. . . . .	47
2.4. Rocas plutónicas. . . . .	48
2.4.1. Dioritas y cuarzodioritas de Ribadelago. . . . .	49
2.4.2. Granodioritas de Ribadelago y Quintana: granodioritas precoces. . . . .	49
2.4.3. Granito de Calabor: granito deformado de dos micas. . . . .	49
2.5. Las rocas migmatíticas. . . . .	49
2.6. Geología estructural. . . . .	50
2.7. El origen glacial del Lago de Sanabria. . . . .	51

## **Capítulo 2: Limnología del Lago de Sanabria. Trampas de sedimentación**

<b>3. Factores ambientales que determinan el comportamiento limnológico del Lago de Sanabria. La importancia de la tasa de renovación del agua. . . . .</b>	<b>53</b>
<b>4. Caracterización físico-química del Lago de Sanabria. . . . .</b>	<b>56</b>
4.1. Comportamiento térmico. . . . .	56
4.1.1. Mezcla invernal y estratificación estival. . . . .	56
4.1.2. Estratificación térmica. . . . .	56
4.1.3. Balance térmico. . . . .	58
4.1.4. Comportamiento térmico y fitoplancton. . . . .	59
4.2. Tiempo de residencia del agua. . . . .	59
4.3. Transparencia del agua: Disco de Secchi. . . . .	60
4.4. Conductividad eléctrica. . . . .	60
4.5. pH y alcalinidad. . . . .	61
4.6. Oxígeno disuelto. . . . .	63
4.7. Fosfatos. . . . .	65
4.8. Compuestos de N. . . . .	67
4.9. Relación C/N. . . . .	69
4.10. Sílice . . . . .	69
<b>5. Caracterización biológica del Lago de Sanabria. . . . .</b>	<b>71</b>
5.1. El fitoplancton en el Lago de Sanabria. . . . .	71
5.2. Caracterización cuantitativa del fitoplancton. . . . .	71
5.2.1. Clorofila. Índice de Margalef. . . . .	71
5.2.1.1. Clorofila. . . . .	71
5.2.1.2. Índice de Margalef: D430/D665. . . . .	72
5.2.2. Densidad total del fitoplancton. . . . .	73
5.3. Caracterización cualitativa del fitoplancton. . . . .	75
5.3.1. Cianofíceas. . . . .	75
5.3.2. Clorofíceas. . . . .	75
5.3.3. Desmidiáceas. . . . .	75
5.3.4. Crisofíceas. . . . .	75
5.3.5. Diatomeas. . . . .	75
5.3.6. Dinoflagelados. . . . .	76
5.3.7. Criptofíceas. . . . .	76
5.4. El zooplancton del Lago de Sanabria. . . . .	76
<b>6. Trampas de sedimentación en el Lago de Sanabria. . . . .</b>	<b>78</b>
6.1. El sedimento. Tasa de sedimentación. . . . .	79
6.2. Balance hídrico y tasa de sedimentación. . . . .	79
6.3. Factores de control que determinan el nivel actual del Lago de Sanabria. . . . .	79
6.4. Sedimentación y transparencia del lago. . . . .	85
6.5. Sedimentación y color del agua. . . . .	87
6.6. Análisis mineralógico de la fracción inorgánica. . . . .	88
6.6.1. Mineralogía. . . . .	88
6.6.2. Mineralogía y balance hídrico. . . . .	89

## **Capítulo 3: Los testigos sedimentarios extraídos en el Lago de Sanabria**

<b>7. Testigos sedimentarios extraídos en el Lago de Sanabria.</b> . . . . .	96
7.1. Testigos sedimentarios: situación en el lago. . . . .	96
7.2. Testigos sedimentarios: características en el proceso de extracción. . . . .	96
7.3. Parámetros paleolimnológicos analizados en los diferentes testigos. . . . .	100
7.3.1. Testigos obtenidos mediante ‘piston coring’. . . . .	100
7.3.2. Testigos obtenidos mediante ‘gravity coring’. . . . .	100
7.4. Estrategia en la elección de los testigos sedimentarios a extraer. . . . .	100
<b>8. Extracción de los testigos sedimentarios mediante la técnica de pistón (piston coring).</b> . . . . .	103
8.1. Equipo de extracción. . . . .	103
8.1.1. Plataforma flotante. . . . .	103
8.1.2. Sistema de extracción: componentes del equipo. . . . .	105
8.2. Proceso de extracción del sedimento. . . . .	106

## **Capítulo 4: Descripción del sedimento del Lago de Sanabria**

<b>9. El sedimento lacustre del Lago de Sanabria.</b> . . . . .	108
9.1. Características generales. . . . .	108
9.2. Tramo sedimentario detrítico. . . . .	108
<b>10. El Episodio Sedimentario Detrítico (ESD): el sedimento de la rotura de la presa Vega de Tera. .</b>	
10.1. Características generales. . . . .	109
10.2. Significado estratigráfico. . . . .	109
10.3. El evento catastrófico de 1959. . . . .	109
10.3.1. ¿Qué ocurrió? . . . . .	109
10.3.2. El evento catastrófico de 1959 en el sedimento del Lago de Sanabria. . . . .	112
10.3.3. Paleoavenidas identificadas en el registro sedimentario del Lago de Sanabria. . . . .	114
10.3.3.1. Procesos de ‘Flash floods’ originados por eventos sísmicos en la región de Sanabria. . . . .	118
<b>11. Descripción de los testigos sedimentarios del Lago de Sanabria.</b> . . . . .	121
11.1. Testigo SAN270W. . . . .	121
11.2. Testigo SAN135E. . . . .	122
11.3. Testigo SAN235E. . . . .	123
11.4. Testigo SAN434. . . . .	123
<b>12. El sedimento del Lago de Sanabria: descripción mediante lámina delgada e imágenes SEM (Scanning Electron Microscope).</b> . . . . .	143
12.1. Lámina delgada. . . . .	143
12.2. Imágenes SEM. . . . .	143
12.3. Características litológicas y texturales del sedimento. . . . .	144
12.3.1. Limo orgánico ( <i>gytja</i> ). . . . .	144
12.3.1.1. Fracción inorgánica. . . . .	144
12.3.1.2. Fracción orgánica. . . . .	144
12.3.2. Episodio Sedimentario Detrítico (ESD). . . . .	145
12.3.3. Horizonte sedimentario NRI1. . . . .	145

## **Capítulo 5: Niveles de Ruptura Inorgánica (NRI) en el sedimento del Lago de Sanabria**

<b>13. Definición de los niveles NRI.</b> . . . . .	161
13.1. Niveles de Ruptura Inorgánica en los testigos sedimentarios. . . . .	161
13.1.1. NRI1 y NRI2 en las secuencias sedimentarias de las cubetas. . . . .	161

13.1.2. NRI1 y NRI2 en la secuencia sedimentaria de la plataforma distal. . . . .	171
13.1.3. NRIa y NRIb en la secuencia sedimentaria de la plataforma distal. . . . .	171
13.2. Correlación general de los testigos sedimentarios del Lago de Sanabria. . . . .	175

## **Capítulo 6: Marco cronoestratigráfico y tasas de sedimentación en el Lago de Sanabria**

<b>14. Datación mediante radiocarbono (C-14) . . . . .</b>	<b>179</b>
14.1. Dataciones y tasas de sedimentación en los testigos del Lago de Sanabria. . . . .	179
14.1.1. Resultados de las dataciones mediante <sup>14</sup> C. . . . .	179
14.1.2. Tasas de sedimentación y modelos cronoestratigráficos. . . . .	180
14.1.2.1. Testigo SAN135E. . . . .	180
14.1.2.2. Testigo SAN235E. . . . .	180
14.1.2.3. Testigo SAN270W. . . . .	184
14.1.2.4. Testigo SAN434. . . . .	184
14.1.2.5. Testigo SAN42. . . . .	190
14.2. Correlación general de los testigos sedimentarios del Lago de Sanabria. . . . .	192
14.2.1. Marco cronológico de NRI1 y NRI2. . . . .	193
14.2.1.1. Horizonte NRI1. . . . .	193
14.2.1.2. Horizonte NRI2. . . . .	193
14.2.2. Marco cronológico general de los testigos sedimentarios. . . . .	193
14.2.2.1. Plataforma distal (testigo SAN434). . . . .	193
14.2.2.2. Cubetas occidental y oriental. . . . .	196
14.3. Definición de los ciclos de 1.500 años en el LOI. . . . .	197
<b>15. Datación radiométrica del sedimento del Lago de Sanabria mediante Pb-210 y Cs-137. . . . .</b>	<b>199</b>
15.1. Datación del sedimento actual mediante Pb-210 y Cs-137. . . . .	199
15.1.1. Datación radiométrica mediante Pb-210. . . . .	199
15.1.2. Datación radiométrica mediante Cs-137. . . . .	202
15.1.3. Posibles procesos de movilización del Pb-210 y Cs-137 en el sedimento lacustre. . . . .	202
15.2. Técnica analítica: espectrometría gamma. . . . .	202
15.2.1. Detectores en espectrometría gamma. . . . .	203
15.2.2. El sistema electrónico general. . . . .	204
15.3. Datación radiométrica mediante Pb-210. . . . .	204
15.4. Análisis radiométrico del sedimento del Lago de Sanabria. . . . .	206
15.4.1. El espectro analizado. . . . .	206
15.5. Resultados de los perfiles de Pb-210 y Cs-137 en el sedimento. . . . .	207
15.5.1. Resultados generales: tasas de sedimentación. . . . .	207
15.5.2. Situación cronoestratigráfica del Episodio Sedimentario Detrítico (ESD). . . . .	213
<b>16. Tasas de sedimentación en el Lago de Sanabria. . . . .</b>	<b>217</b>
16.1. Tasas de sedimentación según los diferentes criterios utilizados. . . . .	217

## **Capítulo 7: Aproximación paleolimnológica I: granulometría, mineralogía, geoquímica, contenido en diatomeas y contenido polínico del sedimento del Lago de Sanabria**

<b>17. Granulometría del sedimento del Lago de Sanabria. . . . .</b>	<b>223</b>
17.1. Perfiles granulométricos de las secuencias sedimentarias. . . . .	223
17.2. Curvas acumulativas y distribución del tamaño de grano. . . . .	226
<b>18. Mineralogía del sedimento del Lago de Sanabria. . . . .</b>	<b>229</b>
18.1. Caracterización cualitativa de la mineralogía del sedimento. . . . .	229
18.2. Caracterización cuantitativa de la mineralogía del sedimento. . . . .	230



<b>19. Geoquímica del sedimento del Lago de Sanabria.</b>	236
19.1 Elementos analizados.	236
19.2. Tratamiento analítico.	237
19.3. Resultados de los análisis geoquímicos.	237
19.3.1. Elementos mayoritarios.	237
19.3.1.1. Elementos de origen inorgánico.	237
19.3.1.2. Elementos de origen orgánico.	239
19.3.2. Elementos minoritarios.	239
19.4. Análisis factorial de los resultados geoquímicos.	241
19.5. Caracterización geoquímica del Episodio Sedimentario Detrítico (ESD).	251
19.6. Análisis Canónico del contenido en C, N y P.	251
19.7. Relaciones geoquímicas.	257
<b>20. Contenido en diatomeas del sedimento del Lago de Sanabria.</b>	262
20.1. Caracterización cualitativa de las diatomeas del sedimento.	262
20.2. Caracterización cuantitativa de las diatomeas del sedimento.	262
20.3. Relación entre el contenido de diatomeas y el contenido de C y P del sedimento.	266
<b>21. Análisis polínico del sedimento del Lago de Sanabria.</b>	269
21.1 Diagrama polínico.	269

## **Capítulo 8: Aproximación paleolimnológica II: el *Loss on ignition* y el contenido en materia orgánica en el sedimento del Lago de Sanabria**

<b>22. <i>Loss on ignition</i> en el sedimento del Lago de Sanabria.</b>	274
22.1. La metodología del LOI en sedimentos lacustres.	274
22.2. Factores de control en los resultados del LOI.	275
22.3. <i>Loss on ignition</i> en el sedimento del Lago de Sanabria.	277
22.3.1. Procedimiento en la determinación del LOI.	277
22.3.2. Condiciones de los factores de control del LOI.	278
<b>23. Análisis elemental de C y N en el sedimento del Lago de Sanabria.</b>	279
23.1. Carbono orgánico (Total Organic Carbon: TOC) y Nitrógeno orgánico (Total Nitrogen: TN).	279
23.2. Determinación de C y N en el sedimento del Lago de Sanabria mediante cromatografía de gases.	279
23.3. Relación entre el Total Organic Carbon (TOC) y el <i>Loss on ignition</i> (LOI).	280
23.4. Relaciones entre los parámetros paleolimnológicos asociados a la materia orgánica.	280
23.4.1. Correlación entre el TOC y el LOI en el sedimento del Lago de Sanabria.	280
23.4.2. Contenido en fósforo total (PT): correlación con el TOC y el LOI.	283
23.4.3. Relación C/N: aspectos generales.	286
23.4.3.1. Relación C/N en el sistema lacustre del Lago de Sanabria.	286
23.4.3.2. Resultados de C/N en el sedimento del Lago de Sanabria.	287
23.4.4. delta C-13.	288
<b>24. El significado del LOI en el sedimento del Lago de Sanabria.</b>	290
24.1. El LOI como medida del contenido en materia orgánica del sedimento.	290
24.2. La materia orgánica alóctona: componente importante en el sistema lacustre del lago de Sanabria.	290
24.3. Interpretación del LOI en el sedimento del Lago de Sanabria.	290

## **Capítulo 9: Análisis de los ciclos en el contenido en materia orgánica del sedimento del Lago de Sanabria**

<b>25. Análisis Wavelet: un nuevo método para análisis de señales.</b>	294
25.1. El análisis de Fourier.	294

25.2. El análisis de Fourier de corto tiempo. ....	295
25.3. El análisis Wavelet. ....	296
25.3.1. ¿Qué es el análisis Wavelet? ....	297
25.3.2. La transformación continua de Wavelet. ....	298
25.3.3. La transformación discreta de Wavelet. ....	300
25.3.3.1. Filtración: aproximaciones y detalles. ....	300
25.3.3.2. Descomposición en múltiples niveles. ....	301
25.3.4. Ejemplos y aplicaciones del análisis de señales mediante análisis Wavelet. ....	301
25.3.5. Tipos de Wavelets utilizados en el estudio del registro del LOI. ....	306
<b>26. Ciclicidades en el contenido en materia orgánica del sedimento del Lago de Sanabria (I): testigo SAN434. ....</b>	<b>307</b>
26.1 Periodograma. Periodicidad de los diferentes ciclos. ....	307
26.1.1. Test de significación. ....	311
26.2. El análisis de Fourier: el ciclo de 1.478 años. ....	313
26.3. El análisis Wavelet: los ciclos de 1.478 años, 456 años, y 311 años. ....	315
<b>27. Ciclicidades en el contenido en materia orgánica del sedimento del Lago de Sanabria (II): ciclicidades de más baja periodicidad (testigos SAN270W y SAN135E) ....</b>	<b>322</b>
27.1. Periodograma/Densidad espectral. Periodicidad de los diferentes ciclos. ....	322
27.2. Análisis Wavelet. ....	326
<b>28. Síntesis de las ciclicidades del LOI en el sedimento del Lago de Sanabria. ....</b>	<b>329</b>

## **Capítulo 10: Análisis de la señal de indicadores de la actividad solar: el <sup>14</sup>C atmosférico.**

<b>29. Ciclicidades en el contenido en C-14 atmosférico. ....</b>	<b>330</b>
29.1. Periodograma. Periodicidad de los diferentes ciclos. ....	330
29.2. Análisis Wavelet. ....	332

## **Discusión**

<b>Discusión 1.</b> Eventos de enfriamiento, acontecidos cada 1.500 años, en el clima del Atlántico Norte: evidencias procedentes del Lago de Sanabria. ....	335
1.1. Equivalencia entre los eventos de enfriamiento del sedimento del Atlántico Norte y del sedimento del Lago de Sanabria.	
<b>Discusión 2.</b> El registro paleoclimático del Lago de Sanabria dentro del marco paleoclimático del Atlántico Norte. ....	336
<b>Discusión 3.</b> El registro paleoclimático del Lago de Sanabria dentro del marco paleoclimático de otras regiones. ....	340
<b>Discusión 4.</b> El último ciclo de Bond en el sedimento del Lago de Sanabria. ....	342
<b>Discusión 5.</b> El registro paleoclimático del Lago de Sanabria y el último ciclo climático de 1.500 años: el intervalo MWP-LIA. ....	344
5.1. Características del intervalo MWP-LIA.	
<b>Discusión 6.</b> El MWP-LIA en el sedimento del Lago de Sanabria. ....	346
<b>Discusión 7.</b> El registro del contenido en materia orgánica del sedimento del Lago de Sanabria: relación con la actividad solar. ....	350

7.1. Consideraciones sobre la comparación del registro del LOI del Lago de Sanabria y los indicadores de actividad solar.

7.2. El contenido en materia orgánica en el Lago de Sanabria y el registro de C-14 atmosférico.

7.3. El contenido en materia orgánica en el Lago de Sanabria y el registro de Be-10.

7.4. El contenido en materia orgánica en el Lago de Sanabria y el registro de Sunspots.

**Discusión 8.** Ciclos en el LOI del sedimento del Lago de Sanabria y en los indicadores de la actividad solar. .... 358

**Conclusiones I** ..... 361

**Conclusiones II** ..... 366



### **Nota aclaratoria sobre la terminología inglesa utilizada.**

En la presente Tesis Doctoral se utilizan diversos términos científicos expresados fundamentalmente en inglés. En el texto no se ha procedido a la traducción continuada de estos términos por las siguientes razones:

- a) Son términos ampliamente utilizados, difundidos y aceptados por la comunidad científica internacional dentro de la temática científica tratada en la presente Tesis. Así, por ejemplo, las siglas LIA (de *Little Ice Age*) serían más reconocibles en la comunidad científica internacional y nacional que las siglas PEH (de *Pequeña Edad del Hielo*).
- b) Son términos que constituyen *palabras clave* en la búsqueda de trabajos científicos dentro de las bases de datos informáticos. Así, por ejemplo, las siglas LIA (de *Little Ice Age*) favorecerían una mayor difusión de un trabajo científico (ya sea a nivel nacional como internacional) que las siglas PEH (de *Pequeña Edad del Hielo*).

Como ejemplo, la traducción de importantes términos escritos en inglés es:

*Little Ice Age (LIA)* = Pequeña Edad del Hielo

*Medieval Warm Period (MWP)* = Periodo Cálido Medieval

*Loss on ignition (LOI)* = Pérdida por ignición

*Total Organic Carbon (TOC)* = Carbono Orgánico Total



## ESTRUCTURA DE LA TESIS

La presente Tesis Doctoral se encuentra estructurada como sigue:

Introducción y objetivos: se detalla brevemente la temática científica y los objetivos de la Tesis.

Capítulo 0: *state of the art* del conocimiento sobre las características paleoclimáticas del Atlántico Norte y los estudios realizados al respecto.

Capítulo 1: se describe el contexto geográfico, climático y geológico del sistema lacustre estudiado; el Lago de Sanabria.

Capítulo 2: se describe las características limnológicas del Lago de Sanabria (mediante los estudios ya existentes), así como los resultados obtenidos por las trampas de sedimentación (colocadas mensualmente por el equipo de limnología de la Universidad de Salamanca durante agosto '98-noviembre '99).

Capítulo 3: se detallan los testigos sedimentarios obtenidos en el Lago de Sanabria y se describe brevemente la técnica de extracción mediante '*piston coring*'.

Capítulo 4: se realiza la descripción y caracterización del sedimento del Lago de Sanabria según los testigos obtenidos.

Capítulo 5 y 6: correlación de los diferentes testigos sedimentarios mediante criterios estratigráficos y cronoestratigráficos. Se definen los niveles NRI (*Niveles de Ruptura Inorgánica*) y se presenta el marco cronoestratigráfico del relleno sedimentario. Se determinan las tasas de sedimentación obtenidas mediante C-14, Pb-210 y Cs-137.

Capítulo 7 y 8: caracterización paleolimnológica del relleno sedimentario mediante todo un conjunto de diversos criterios; granulometría, mineralogía, geoquímica, contenido en diatomeas, contenido polínico, *Loss on ignition* (LOI), y análisis elemental de C y N.

Capítulo 9: se analiza la señal del contenido en materia orgánica (*Loss on ignition* (LOI)) mediante el análisis de Fourier, el análisis Wavelet, y la densidad espectral. El Capítulo 10 analiza, mediante estos mismos procedimientos, la señal del C-14 atmosférico (indicador de la actividad solar).

Posteriormente a la exposición de estos capítulos, se presentan las Discusiones y Conclusiones derivadas del estudio paleoclimático y paleolimnológico del sedimento del Lago de Sanabria.





## A. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

### A.1. Introducción.

La presente Tesis Doctoral se encuentra enmarcada dentro de la investigación científica perteneciente a la *paleoclimatología* y la *paleolimnología*, y pretende contribuir a los esfuerzos que la comunidad científica internacional realiza en el ámbito de la modelización de la variabilidad climática para una mejor comprensión del sistema Hombre-Tierra.

La *paleoclimatología* es el estudio del clima anterior al periodo de medidas climáticas instrumentales. Los registros instrumentales abarcan sólo una fracción muy pequeña de la historia climática de la Tierra (últimos siglos), y aportan una perspectiva insuficiente a las variaciones climáticas globales. Una perspectiva más larga sobre las variabilidades climáticas puede ser obtenida mediante el estudio de depósitos sedimentarios (registros de hielo, registros sedimentarios marinos y lacustres), los cuales incorporan en su composición una medición de esta dependencia con el clima. Tales depósitos sedimentarios aportan un registro del clima del pasado, y constituyen la base de la paleoclimatología.

La *paleolimnología* es el estudio de las condiciones físicas, químicas y biológicas en la historia de un sistema lacustre. El conjunto de estas características es función de las condiciones ambientales existentes y, de entre ellas, de las condiciones climáticas, con lo que constituyen un registro paleoambiental y paleoclimático. Los depósitos sedimentarios lacustres representan el material primordial para inferir tales reconstrucciones. Numerosos estudios paleolimnológicos se han centrado en la historia más reciente de la Tierra (Holoceno y Pleistoceno).

#### A.1.1. El registro sedimentario lacustre como archivo paleoambiental.

En los recientes años, numerosos estudios procedentes de testigos marinos y testigos de hielo han permitido adquirir considerable conocimiento sobre las condiciones climáticas globales y ambientales de la Tierra. Los registros sedimentarios obtenidos en lagos y cuencas sedimentarias lacustres han contribuido también al conocimiento del clima de la Tierra y a su historia ambiental.

Desde finales del siglo XIX, los registros sedimentarios lacustres han constituido uno de los mejores archivos paleoclimáticos. Un ecosistema lacustre es relativamente fácil de modelizar, con una entrada relacionada con la radiación solar, unos nutrientes que controlan la cadena trófica, y un proceso de sedimentación y diagénesis que recicla parcialmente los nutrientes. Además, los registros sedimentarios lacustres poseen una de las propiedades más importantes en la elaboración de los modelos del cambio climático; su alta resolución temporal. Tanto es así, que constituyen hoy en día una de las bases cronológicas en el establecimiento de los eventos climáticos del pasado, de la misma precisión como puede ser la dendroclimatología.

Los sedimentos lacustres preservan una gran variedad de organismos procedentes de la cadena trófica del propio sistema lacustre, así como otros restos que aportan una información más regional. Es por ello que los registros sedimentarios lacustres son analizados por una multitud de disciplinas que estudian las diatomeas, el polen, los ostrácodos, los insectos, los quironómidos, etc. En general, todas estas disciplinas han abordado las reconstrucciones paleoclimáticas y han establecido sus funciones de transferencia.

Los registros lacustres pueden aportar, con frecuencia, la resolución temporal necesaria para detectar cambios paleoambientales en escalas temporales humanas. Debido a la alta tasa de sedimentación encontrada en muchos lagos, existen oportunidades para calibrar el registro sedimentario del pasado mediante registros históricos e instrumentales del cambio ambiental. Además, las altas tasas de sedimentación permiten cuantificar la tasa de cambios climáticos abruptos. Con frecuencia, los registros de alta resolución de los sedimentos lacustres muestran evidencias de comportamientos cíclicos con periodos situados desde pocos años hasta varios siglos. Estos resultados ofrecen el potencial para aportar nuevos datos sobre la importancia de procesos tales como el ENSO, la NAO o la variabilidad solar, en escalas temporales de inmediata importancia para la actividad humana. Además, los registros lacustres pueden aportar información sobre la variabilidad del pasado no solamente en el clima, sino también sobre los periodos de recurrencia de riesgos geológicos (tales como terremotos o volcanes).

#### A.1.2. En busca de un parámetro descriptivo.

Los parámetros descriptivos (vocablo que se considera equivalente al término inglés "proxy data") que la comunidad científica ha utilizado en las reconstrucciones paleoecológicas y paleoclimáticas han sido muy diversos, ya sean de carácter físico (contenido en agua, densidad, propiedades magnéticas, etc.), químico (composición química inorgánica, composición mineralógica, indicadores bioquímicos de paleoproduktividad, etc.), como biológico (diatomeas, polen, ostrácodos, quironómidos, insectos, diversidad biológica, etc.)

Hoy en día, las reconstrucciones paleoclimáticas a partir de los archivos sedimentarios lacustres abordan este detallado estudio multidisciplinar; pero este estudio requiere tiempo, tanto en la formación del especialista como en el análisis de alta resolución de los testigos sedimentarios. En una sociedad científica altamente tecnificada y ávida de resultados inmediatos, estas aproximaciones basadas en laboriosos métodos han sido cuestionadas parcialmente, planteándose nuevos métodos analíticos, más rápidos y económicos, que puedan suplir la información que aporta el registro lacustre.

En ese sentido, es muy interesante intentar hallar un parámetro económico y de fácil obtención que refleje la historia paleoambiental de un sistema lacustre. No obstante, esa búsqueda es compleja, ya que es necesario conocer en detalle el modelo lacustre del lago en cuestión (desde sus entradas y su estructura trófica, hasta su sistema de sedimentación y diagénesis temprana).

#### A.2. Objetivos.

La presente Tesis Doctoral estudia el registro sedimentario lacustre Holocénico del Lago de Sanabria (NW de la península Ibérica). Los objetivos de la Tesis se agrupan en

dos grandes apartados: *a)* en el aspecto metodológico, y *b)* en la contribución a la modelización climática del Atlántico Norte. Los objetivos son:

*a)* ASPECTO METODOLÓGICO

- 1) Encontrar un PARÁMETRO PALEOLIMNOLÓGICO descriptivo, ECONÓMICO y de FÁCIL OBTENCIÓN, que permita analizar secuencias sedimentarias en muy alta resolución. Este parámetro paleolimnológico ha de ser un indicador que permita RECONSTRUIR las CARACTERÍSTICAS PALEOAMBIENTALES.
- 2) Comprobar la SENSIBILIDAD del registro sedimentario del Lago de Sanabria frente a las VARIACIONES MEDIOAMBIENTALES. Para ello, se realiza un ESTUDIO PALEOLIMNOLÓGICO y PALEOCLIMÁTICO de su registro sedimentario.

*b)* CONTRIBUCIÓN A LA MODELIZACIÓN CLIMÁTICA DEL ATLÁNTICO NORTE

- 3) Contribuir al entendimiento del SISTEMA CLIMÁTICO y de la VARIABILIDAD CLIMÁTICA para una mejor comprensión del SISTEMA HOMBRE-TIERRA.
- 4) Contribuir a la MODELIZACIÓN de la VARIABILIDAD CLIMÁTICA PENINSULAR, en especial del RÉGIMEN CLIMÁTICO del ATLÁNTICO NORTE.

