

DISCUSIÓN

Discusión 1. EVENTOS DE ENFRIAMIENTO, ACONTECIDOS CADA 1.500 AÑOS, EN EL CLIMA DEL ATLÁNTICO NORTE: EVIDENCIAS PROCEDENTES DEL LAGO DE SANABRIA.

Los estudios paleoclimáticos realizados en el Atlántico Norte evidencian la existencia de episodios de enfriamiento acontecidos cada 1.500 años (Bond et al., 1997; Bond et al., 1999; Bond et al., 2001). Estos episodios de enfriamiento han sido identificados en los sedimentos del Atlántico Norte mediante la presencia de niveles de *Ice-Rafted Debris* (IRD)).

Dichos episodios también han sido identificados en el registro sedimentario del Lago de Sanabria. Así, el registro del LOI del testigo SAN434 (plataforma distal) evidencia la existencia de periodos asociados a un clima relativamente frío y seco, acontecidos cada 1.500 años.

1.1. Equivalencia entre los eventos de enfriamiento del sedimento del Atlántico Norte y del sedimento del Lago de Sanabria.

Los eventos de enfriamiento identificados en el sedimento del Atlántico Norte durante el Holoceno han sido definidos como IRD1, IRD2, IRD3, etc. (Bond et al., 1997). Por otra parte, en Bond et al. (2001), la nomenclatura utilizada ha sido Ciclo 0 (LIA), Ciclo 1, Ciclo 2, etc. En el presente trabajo, los episodios de enfriamiento detectados en el sedimento del Lago de Sanabria se denominan E-0 (LIA), E-1, E-2, E-3, etc. (E = enfriamiento). La **Fig. D.1.1** muestra las equivalencias establecidas entre las nomenclaturas utilizadas por los estudios paleoclimáticos de Bond et al. (1997) y Bond et al. (2001), y la nomenclatura utilizada en la presente Tesis Doctoral.

Sedimento del Atlántico Norte		Sedimento del Lago de Sanabria	
Bond et al. (1997)	Bond et al. (2001)	Tesis Luque (este trabajo)	Evento climático
	Ciclo 0	E-0	Enfriamiento
IRD1	Ciclo1	E-1	Enfriamiento
IRD2	Ciclo 2	E-2	Enfriamiento
IRD3		E-3	Enfriamiento
IRD4		E-4	Enfriamiento

Fig. D.1.1. Equivalencias entre las nomenclaturas que denominan los últimos eventos de enfriamiento acontecidos cada 1.500 años en el clima del Atlántico Norte: entre los sedimentos marinos (Bond et al. (1997) y Bond et al. (2001)) y entre el sedimento del Lago de Sanabria (presente estudio).

Discusión 2. EL REGISTRO CLIMÁTICO DEL LAGO DE SANABRIA DENTRO DEL MARCO CLIMÁTICO DEL ATLÁNTICO NORTE.

Las características paleoclimáticas detectadas en los testigos sedimentarios del Lago de Sanabria se encuentran estrechamente relacionadas a los principales eventos climáticos acontecidos en el Atlántico Norte. Así, los últimos 4 eventos de IRD identificados en el sedimento marino del Atlántico Norte (Bond et al., 1997; Bond et al., 2001) se correlacionan con las 4 fases principales de enfriamiento detectadas en los valores del LOI del testigo sedimentario SAN434 (plataforma distal) (fases E-0, E-1, E-2 y E-3).

La **Fig. D.2.1** muestra la situación del registro del Lago de Sanabria dentro del marco paleoclimático del Atlántico Norte en los últimos 30.000 años (periodo glacial y Holoceno). Los parámetros paleoclimáticos representados en los sedimentos marinos son: a) eventos IRD, b) petrología, y c) valores del $\delta^{13}\text{C}$ en *C. wuellerstorfi*. Los parámetros representados en el testigo de hielo GISP2 son: a) contenido en Ca, b) contenido en $\delta^{18}\text{O}$, y c) flujo de sal de K no marina. El registro sedimentario del Lago de Sanabria se encuentra situado en los últimos 6.000 años de la historia climática representada en la **Fig. D.2.1**. Así, el testigo SAN434 del Lago de Sanabria abarca los niveles IRD numerados desde el nivel 1 hasta el comienzo del nivel 4 (los equivalentes en el Lago de Sanabria son las fases de enfriamiento E-1, E-2, E-3 y E-4).

La **Fig. D.2.2** muestra la situación del registro del Lago de Sanabria dentro del marco paleoclimático del Atlántico Norte en los últimos 12.000 años (Holoceno). Los parámetros paleoclimáticos representados en los sedimentos marinos son: a) el registro de IRD, y b) los valores de $\delta^{18}\text{O}$ en *N. pachyderma*. Los eventos IRD, numerados desde 0 hasta 8, constituyen las oscilaciones climáticas de escala milenaria del Atlántico Norte, reconocidas en numerosos estudios como el ciclo de 1.500 años. El ciclo 0 (de Bond et al. (2001)) representa el último evento de IRD (*Little Ice Age*), y se encuentra bien identificado en el registro sedimentario del Lago de Sanabria (**Fig. D.2.2**). En el registro del lago, el MWP (*Medieval Warm Period*) se encuentra situado entre E-0 y E-1 (ciclo 0 y ciclo 1 de Bond et al. (2001)).

La **Fig. D.2.3** muestra la situación del registro del Lago de Sanabria dentro del marco paleoclimático del Atlántico Norte en los últimos 3.000 años (Holoceno terminal). Los parámetros paleoclimáticos representados son: a) eventos de IRD, b) registro de *N. pachyderma*, c) registro instrumental de la temperatura en Inglaterra Central (CET), d) evento de enfriamiento en Holanda, e) registro de temperatura en el Mar Sargasso, y f) temperatura del aire de Summit (Groenlandia). El ciclo 0 (de Bond et al. (2001)) representa el último evento de IRD (*Little Ice Age*). Los 3 últimos eventos de IRD son claramente identificados en el registro del LOI del testigo SAN434 del Lago de Sanabria mediante disminuciones muy importantes en el contenido en materia orgánica del sedimento. Estas disminuciones (denominadas E-0, E-1 y E-2) presentan una periodicidad aproximada de 1.500 años. El registro paleoclimático del Lago de Sanabria permite visualizar la situación del MWP y el LIA dentro del último ciclo climático de 1.500 años (**Fig. D.2.3**).

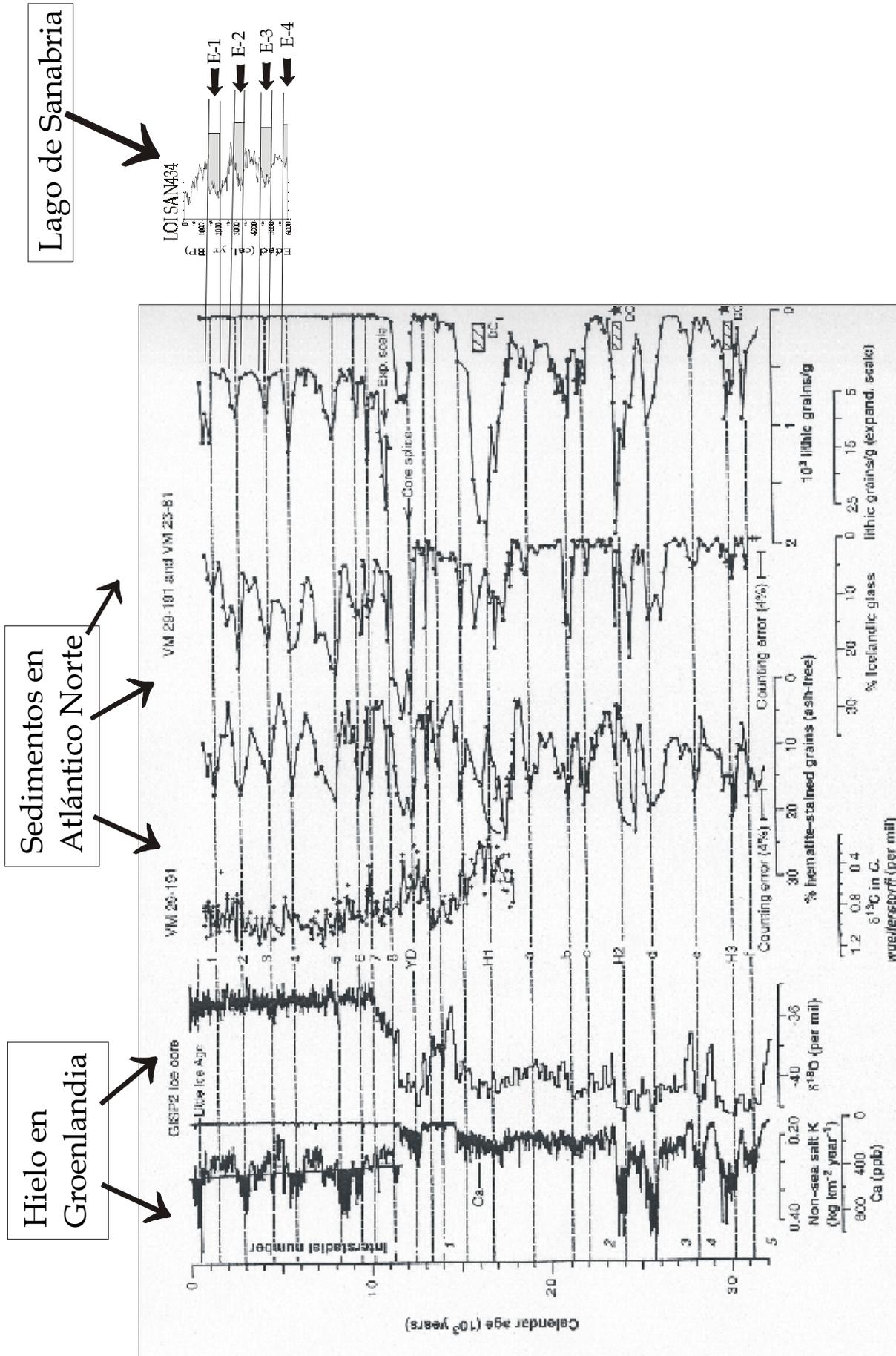
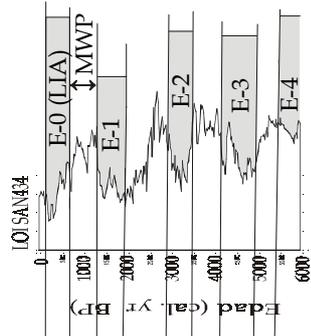


Fig. D.2.1. Situación del registro del Lago de Sanabria (LOI del testigo situado en la plataforma distal) dentro del marco paleoclimático del Atlántico Norte en los últimos 30.000 años (periodo glacial y Holoceno). El gráfico de los sedimentos del Atlántico Norte y del testigo GISP2 ha sido extraído de Bond et al. (1997).

Lago de Sanabria



Sedimentos en Atlántico Norte

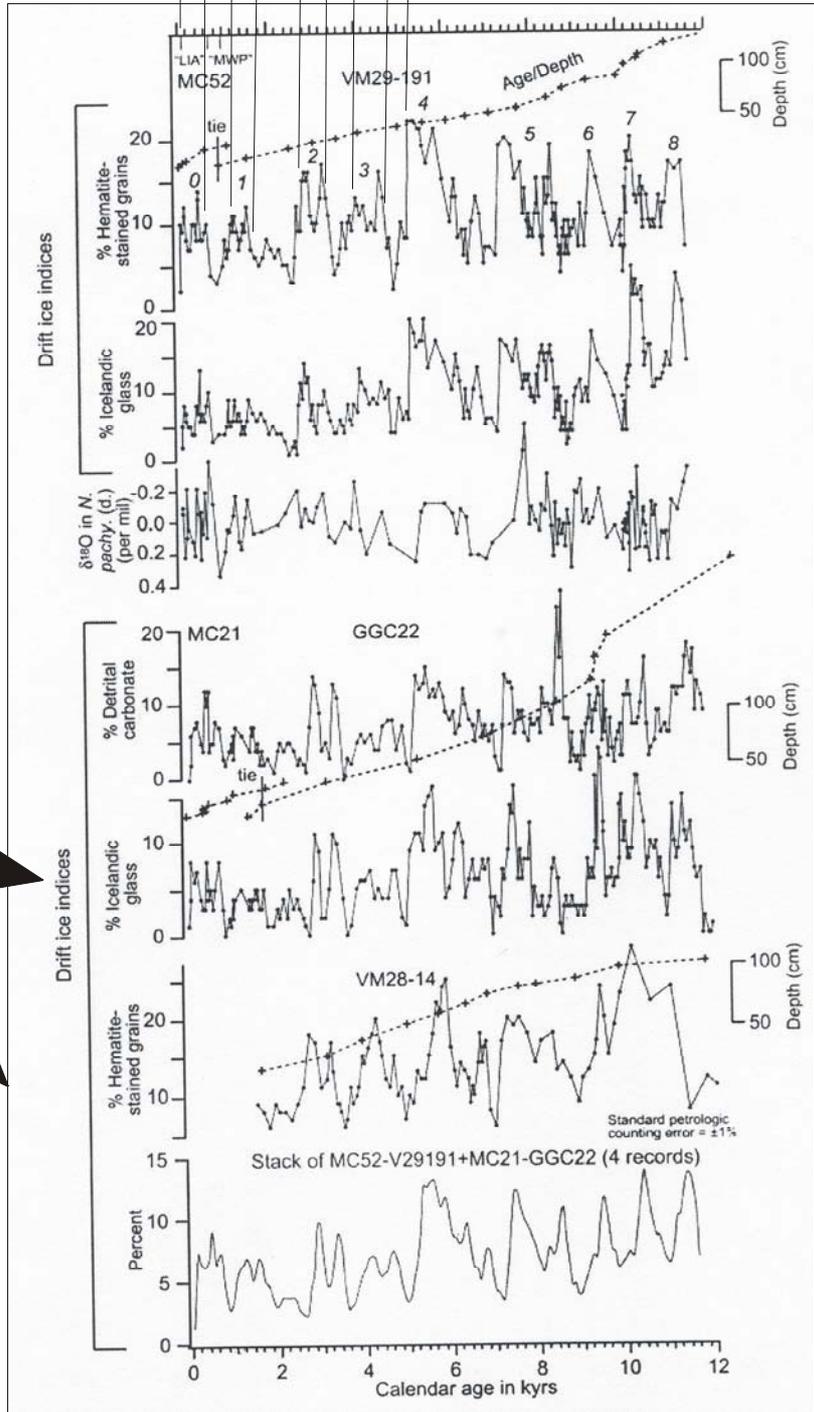


Fig. D.2.2. Situación del registro del Lago de Sanabria (LOI del testigo situado en la plataforma distal dentro del marco paleoclimático del Atlántico Norte en los últimos 12.000 años (Holoceno). El gráfico de los sedimentos del Atlántico Norte ha sido extraído de Bond et al. (2001).

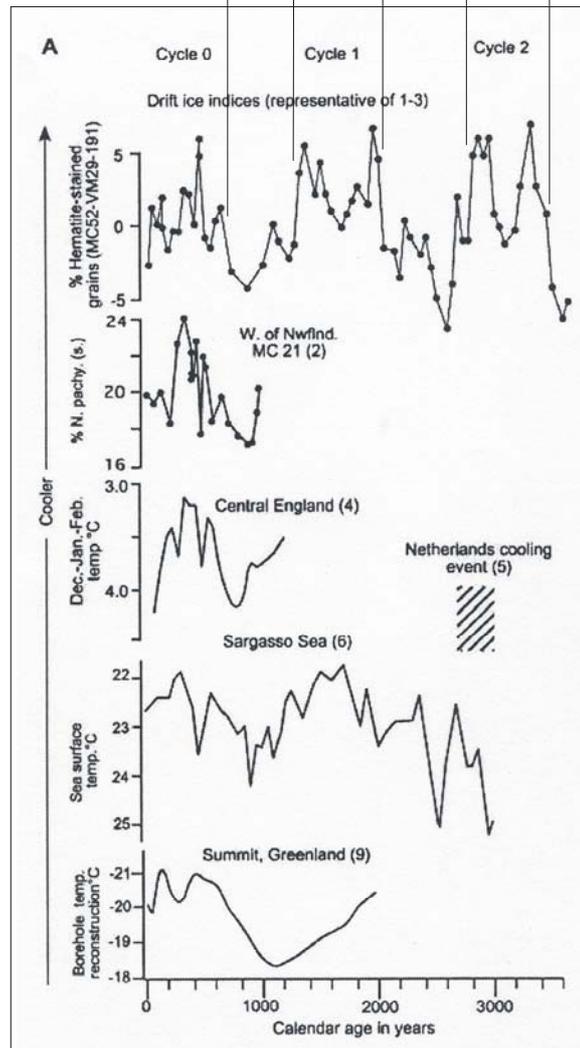
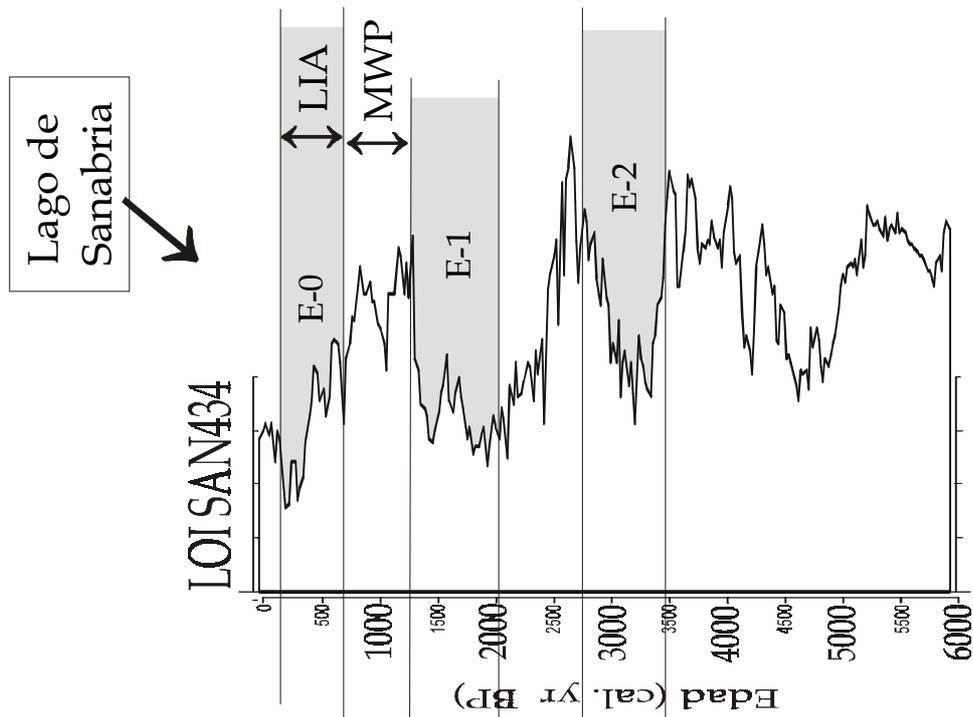


Fig. D.2.3. Situación del registro del Lago de Sanabria (LOI del testigo situado en la plataforma distal) dentro del marco paleoclimático del Atlántico Norte en los últimos 3.000 años (Holoceno terminal). El gráfico de los sedimentos del Atlántico Norte ha sido extraído de Bond et al. (2001).

Discusión 3. EL REGISTRO CLIMÁTICO DEL LAGO DE SANABRIA DENTRO DEL MARCO CLIMÁTICO DE OTRAS REGIONES.

Los registros paleoclimáticos efectuados en otras regiones del planeta Tierra también evidencian la existencia de variaciones climáticas de escala milenaria. Estudios paleoclimáticos desarrollados en África occidental y en el Atlántico Subtropical han determinado las temperaturas superficiales marinas (SST) durante el periodo glacial y Holoceno (deMenocal et al., 2000). Los registros sedimentarios marinos del Atlántico Subtropical presentan un conjunto de eventos de enfriamiento (de 2-4°C) de escala milenaria, que son correlacionados con los eventos IRD detectados por Bond et al. (1997) en los registros sedimentarios marinos del Atlántico Norte (**Fig. D.3.1**). Estas oscilaciones de escala milenaria, detectadas en los valores del SST, estuvieron sobrepuestas en un cambio en el clima africano monzónico entre cal. 14.8 kyr y cal. 5.5 kyr BP (deMenocal et al., 2000). Durante este periodo, denominado el Periodo Húmedo Africano, las concentraciones de terrígenos de origen eólico fueron relativamente bajas, reflejando la elevada humedad de las áreas fuente africanas de polvo atmosférico (**Fig. D.3.1**). Entre cal. 14.8-5.5 kyr BP (Periodo Húmedo Africano) África occidental se encontraba casi completamente cubierta de vegetación (deMenocal et al., 2000).

La situación del registro sedimentario del Lago de Sanabria, dentro del marco paleoclimático del clima de África occidental y del Atlántico Norte, se muestra en la **Fig. D.3.1**. El registro sedimentario del Lago de Sanabria se correlaciona con los últimos 6.000 años de las secuencias paleoclimáticas ilustradas. Así, el sedimento más antiguo estudiado en el registro del lago se correlaciona con la fase terminal del Periodo Húmedo Africano. Asimismo, los eventos de IRD y los eventos fríos (SST bajos) se correlacionan con contenidos bajos en materia orgánica en el registro sedimentario del Lago de Sanabria (E-0, E-1, E-2, E-3 y E-4). Estos eventos fríos presentan una periodicidad de 1.500 años. El E-0 representa la Pequeña Edad del Hielo (LIA).

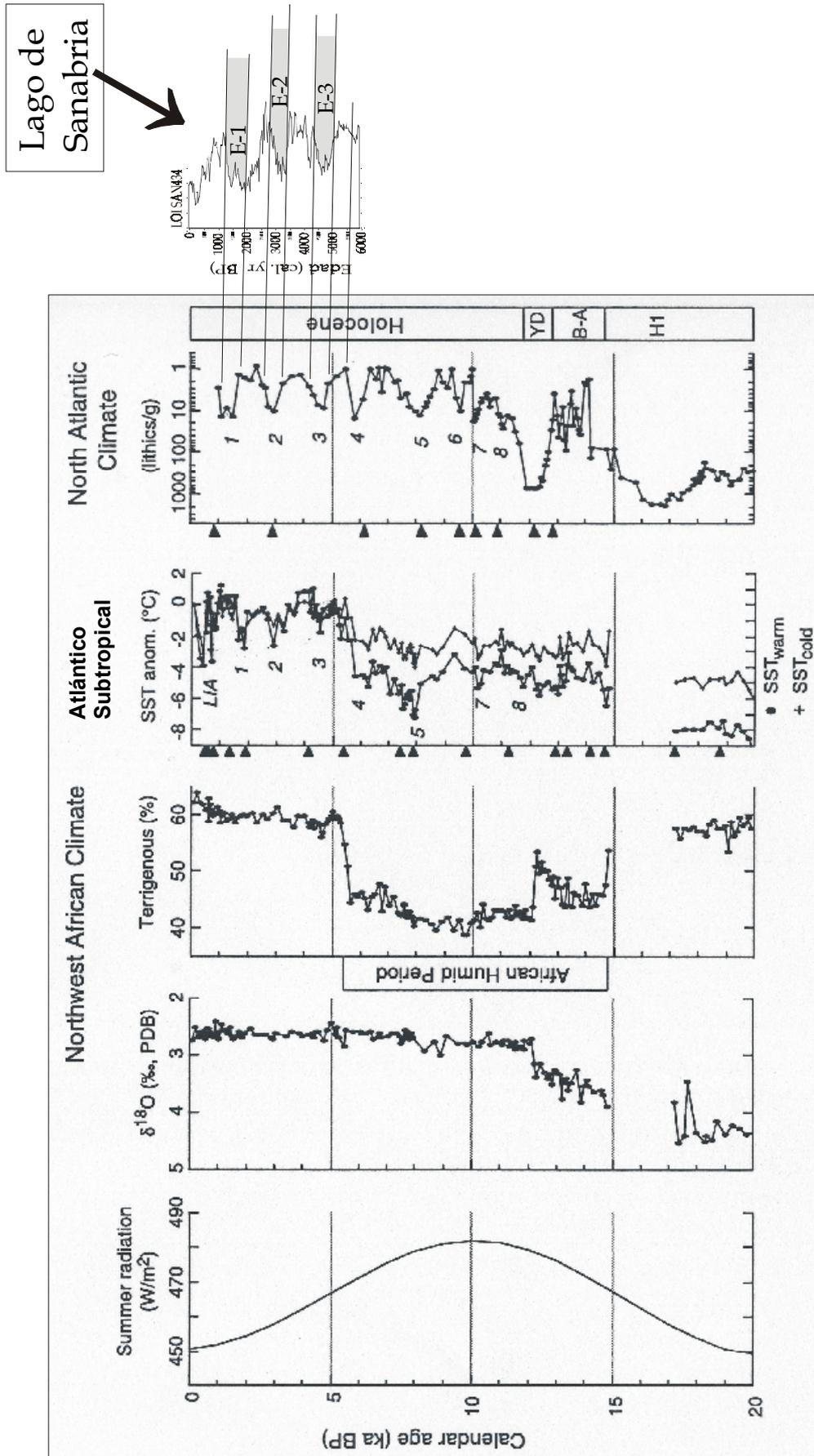


Fig. D.3.1. Registro paleoclimático de África occidental y del Atlántico Subtropical comparado con el registro de los eventos de IRD en el clima del Atlántico Norte. Registro paleoclimático del Lago de Sanabria (valores del LOI) dentro del marco paleoclimático de todas estas regiones. El gráfico de la información paleoclimática de África occidental, del Atlántico Subtropical y del clima del Atlántico Norte ha sido extraído de deMenocal et al. (2000).

Discusión 4. EL ÚLTIMO CICLO DE BOND EN EL SEDIMENTO DEL LAGO DE SANABRIA.

El análisis del contenido en materia orgánica del registro sedimentario del Lago de Sanabria (testigo SAN434, plataforma distal), efectuado para los últimos 6.000 años de la historia sedimentaria del lago, ha evidenciado la existencia de 4 oscilaciones de gran escala en los valores del LOI (**Fig. D.4.1**). Cada una de estas oscilaciones se encuentra asociada al ciclo climático de 1.500 años identificado en numerosos estudios paleoclimáticos del clima del Atlántico Norte. La interpretación paleoclimática del registro del LOI en el Lago de Sanabria sugiere la existencia de 4 grandes eventos de enfriamiento (denominados E-0 (LIA), E-1, E-2, y E-3), acontecidos con una periodicidad aproximada de 1.500 años.

Los 4 ciclos de materia orgánica del registro sedimentario del Lago de Sanabria presentan unos valores del LOI paulatinamente más bajos conforme avanza el tiempo. Así, cada uno de los sucesivos mínimos en el contenido en materia orgánica (E-3, E-2, E-1, y E-0 (LIA)) presentan valores del LOI cada vez menores con respecto al anterior (**Fig. D.4.1**). Los mínimos valores de toda la secuencia de 6.000 años se alcanzan en el último enfriamiento (E-0), es decir, en el *Little Ice Age* (LIA). La interpretación paleoclimática sugiere, por lo tanto, la existencia de un enfriamiento gradual de gran escala, que abarca los últimos 4 ciclos climáticos de 1.500 años del Atlántico Norte. Estas características evidencian el patrón general que caracteriza un ciclo de Bond (**Fig. D.4.1**).

Los estudios paleoclimáticos realizados en registros paleoambientales del último periodo glacial han evidenciado la existencia de ciclos de Bond. Un ciclo de Bond está constituido por varios ciclos de Dansgaard/Oeschger (ciclos de 1.500 años), caracterizados, éstos últimos, por manifestar una tendencia paulatina hacia condiciones climáticas cada vez más frías. Un ciclo de Bond comienza y finaliza con eventos máximos de enfriamiento, es decir, con eventos Heinrich. El registro de materia orgánica del Lago de Sanabria evidencia este patrón climático, pero con la importancia añadida de pertenecer a una secuencia sedimentaria del Holoceno terminal (últimos 6.000 años).

En el registro sedimentario del Lago de Sanabria, el ciclo de Bond ha sido bien determinado en su parte final, debido a la clara identificación del periodo asociado a la LIA (equivalente al último evento Heinrich; es el enfriamiento E-0 en el testigo SAN434) (**Fig. D.4.1**). No obstante, el ciclo de Bond no ha podido ser bien determinado en su parte inicial, debido a la limitación impuesta por la longitud del testigo sedimentario; así, cabría esperar el penúltimo evento Heinrich con anterioridad a cal. 6000 yr BP, para definir con exactitud el comienzo del ciclo de Bond.

En conclusión, el registro sedimentario obtenido en el Lago de Sanabria (testigo SAN434, plataforma distal) ha registrado las 4 últimas oscilaciones climáticas de 1.500 años del clima del Atlántico Norte, pertenecientes, todas ellas, al último ciclo de Bond (**Fig. D.4.1**). El enfriamiento E-0 (LIA) constituiría el límite superior del ciclo de Bond, alcanzándose el enfriamiento más intenso de los últimos 6.000 años (como mínimo).

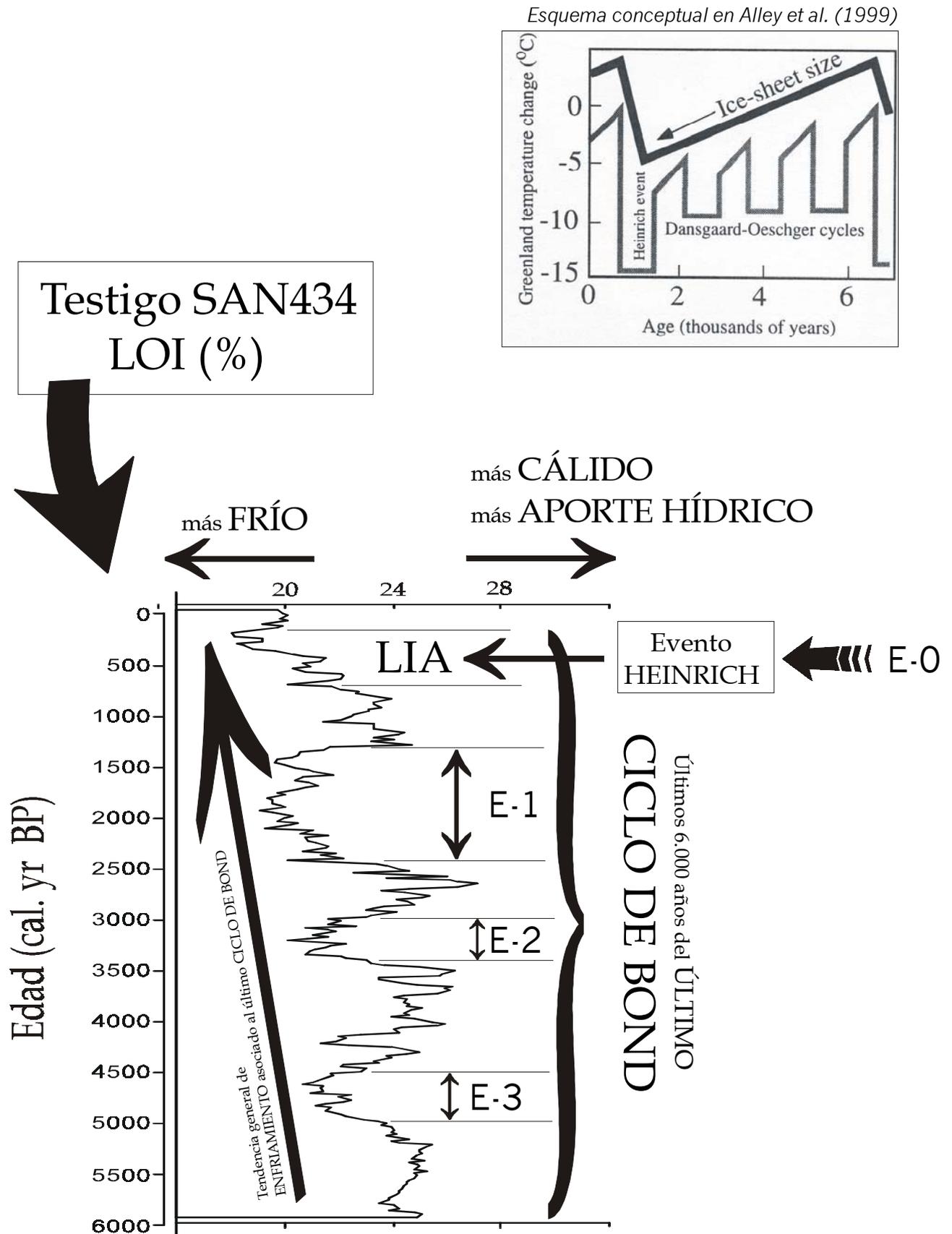


Fig. D.4.1. Últimos 6.000 años del último ciclo de Bond en el registro sedimentario del Lago de Sanabria. El registro del LOI evidencia una tendencia general de enfriamiento asociado al ciclo de Bond.

Discusión 5. EL REGISTRO CLIMÁTICO DEL LAGO DE SANABRIA Y EL ÚLTIMO CICLO CLIMÁTICO DE 1.500 AÑOS: EL INTERVALO MWP-LIA.

Los diversos eventos de enfriamiento que ocurrieron cada 1.500 años durante el Holoceno, denominados desde 0 hasta 8 en el sedimento del Atlántico Norte y en el Atlántico subtropical, han sido registrados claramente en el sedimento del Lago de Sanabria para los últimos 6.000 años (**Fig. D.2.1, D.2.2, D.2.3 y D.3.1**). El último de estos eventos de enfriamiento fue la Pequeña Edad del Hielo (LIA), siendo evidenciada en el registro paleoclimático de los testigos sedimentarios estudiados (SAN434, SAN270W, SAN135E, SAN235E y SAN38E).

Los estudios paleoclimáticos han observado que las características del último ciclo climático de 1.500 años se encuentran principalmente constituidas por el intervalo MWP-LIA (*Medieval Warm Period - Little Ice Age*) (Bond et al., 1999; deMenocal et al., 2000). El MWP fue un periodo histórico relativamente cálido que ocurrió entre 800 AD y 1300 AD, mientras que la LIA representó un periodo histórico frío que ocurrió entre 1300 AD y 1850 AD (deMenocal et al., 2000).

La situación del MWP y del LIA, en el último ciclo de 1.500 años de materia orgánica del registro del LOI del Lago de Sanabria, se muestra en la **Fig. D.5.1**. Asimismo, el registro del LOI del Lago de Sanabria ha sido correlacionado con los siguientes parámetros paleoclimáticos: a) las temperaturas superficiales de Groenlandia, b) los valores de SST del Bermuda Rise (Atlántico Norte occidental), y c) anomalías de los valores de SST en el Atlántico Subtropical.

3.1. Características del intervalo MWP-LIA.

La **Fig. D.5.1** muestra las características paleoclimáticas asociadas al intervalo MWP-LIA. Los resultados del registro del LOI del testigo SAN434 (Lago de Sanabria) evidencian un comportamiento paralelo a los resultados paleoclimáticos de Groenlandia, del Atlántico Norte occidental y del Atlántico Subtropical. Así, todos los registros muestran dos eventos discretos de enfriamiento durante la LIA, precedidos por el MWP (**Fig. D.5.1**):

- 1) El registro de la temperatura superficial de Groenlandia registra la existencia de dos eventos discretos de enfriamiento, centrados en 1500 AD y 1870 AD.
- 2) El análisis del Oxígeno isotópico, realizado sobre foraminíferos planctónicos en el Atlántico Norte occidental (Bermuda Rise), también evidencia dos eventos discretos de enfriamiento, que fueron precedidos por el MWP.
- 3) En el registro del Atlántico Subtropical también se registran dos eventos discretos de enfriamiento de 3-4°C de amplitud, situados entre 1300 AD y 1850 AD.
- 4) En el registro del LOI del Lago de Sanabria se evidencian los dos eventos discretos de enfriamiento detectados en los anteriores registros. Estos eventos están constituidos por los horizontes sedimentarios NRI1 (cal. 450-250 yr BP) y NRI2 (cal. 800-700 yr BP).

Por lo tanto, en el registro sedimentario del Lago de Sanabria, la LIA se encuentra determinada por dos eventos discretos de enfriamiento, constituidos por los horizontes NRI1 y NRI2 (Fig. D.5.1). Estos resultados son corroborados por la existencia de este mismo patrón en otros registros paleoclimáticos del planeta Tierra (como Groenlandia, el Atlántico Norte occidental y el Atlántico Subtropical).

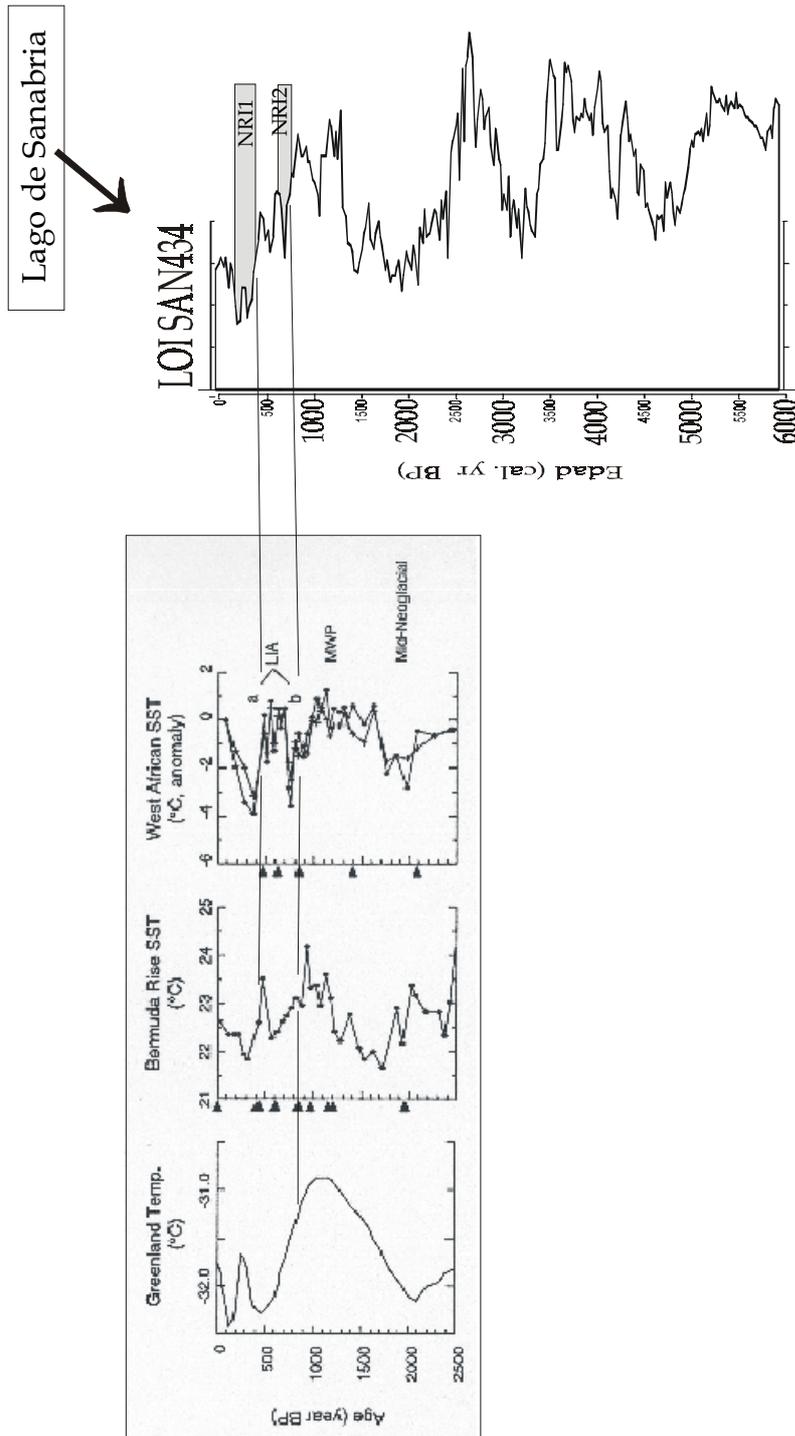


Fig. D.5.1. Características paleoclimáticas asociadas al intervalo MWP-LIA en Groenlandia, en el Atlántico Norte occidental (Bermuda Rise) y en África W. Dentro del marco paleoclimático de todas estas regiones, se muestra el registro paleoclimático del Lago de Sanabria (valores del LOI). El gráfico de la información paleoclimática de Groenlandia, del Atlántico Norte occidental y de África W ha sido extraído de deMenocal et al. (2000).

Discusión 6. EL MWP-LIA EN EL SEDIMENTO DEL LAGO DE SANABRIA.

El análisis paleolimnológico del sedimento del Lago de Sanabria ha permitido detectar la oscilación climática perteneciente al periodo *Medieval Warm Period* (MWP)- *Little Ice Age* (LIA) (Fig. D.6.1). Así, los diferentes testigos sedimentarios estudiados permiten establecer una correlación estratigráfica del periodo MWP-LIA en el registro sedimentario del lago. Los horizontes sedimentarios NRI2 y NRI1 se encuentran asociados al comienzo y final del periodo LIA, respectivamente, constituyendo dos fases discretas de enfriamiento. Estas dos fases discretas de enfriamiento se detectan en otros estudios paleoclimáticos realizados en sedimentos del Atlántico Norte y en Groenlandia (deMenocal et al., 2000).

El periodo MWP se encuentra evidenciado en el sedimento del Lago de Sanabria mediante un aumento significativo, y brusco, del contenido en materia orgánica, sugiriendo la implantación de unas óptimas condiciones cálidas y húmedas. Asimismo, el análisis polínico evidencia un aumento significativo del Polen Arbóreo (AP), sugiriendo la existencia de una masa forestal relativamente importante (Fig. D.6.2). Estas características paleolimnológicas confirman el carácter relativamente cálido y húmedo del MWP en la región del Lago de Sanabria.

El periodo LIA se encuentra evidenciado en el sedimento del lago mediante una disminución muy importante en el contenido en materia orgánica, producida de forma gradual (y mediante diversas oscilaciones de mayor frecuencia), sugiriendo la implantación de unas óptimas condiciones frías y áridas. Asimismo, el análisis de diatomeas evidencia una disminución significativa del contenido en diatomeas del sedimento, sugiriendo la implantación de unas condiciones climáticas frías (Fig. D.6.3). Los horizontes NRI2 y NRI1 se encuentran asociados al comienzo y final del periodo LIA, respectivamente, constituyendo dos fases discretas de enfriamiento; asimismo, las características paleolimnológicas evidencian unas condiciones de frío más intenso asociado al nivel NRI1 con respecto al nivel NRI2. Estas características paleolimnológicas confirman el carácter relativamente frío y seco de la LIA en la región del Lago de Sanabria.

El aumento brusco en el contenido en materia orgánica (MWP), y el posterior descenso paulatino de dicho parámetro (LIA), recuerda el patrón generalizado que caracteriza las oscilaciones climáticas milenarias acontecidas durante el último periodo glacial, es decir, las denominadas oscilaciones Dansgaard/Oeschger. Estas oscilaciones climáticas milenarias constituyen el ciclo climático de 1.500 años, detectado en numerosos estudios paleoclimáticos realizados en sedimentos del Atlántico Norte y en registros de hielo de Groenlandia. Así, el sedimento del Lago de Sanabria evidencia que la LIA representa la fase más fría del último ciclo de 1.500 años en el clima del Atlántico Norte, tal como ha sido propuesto en Bond et al. (1999).

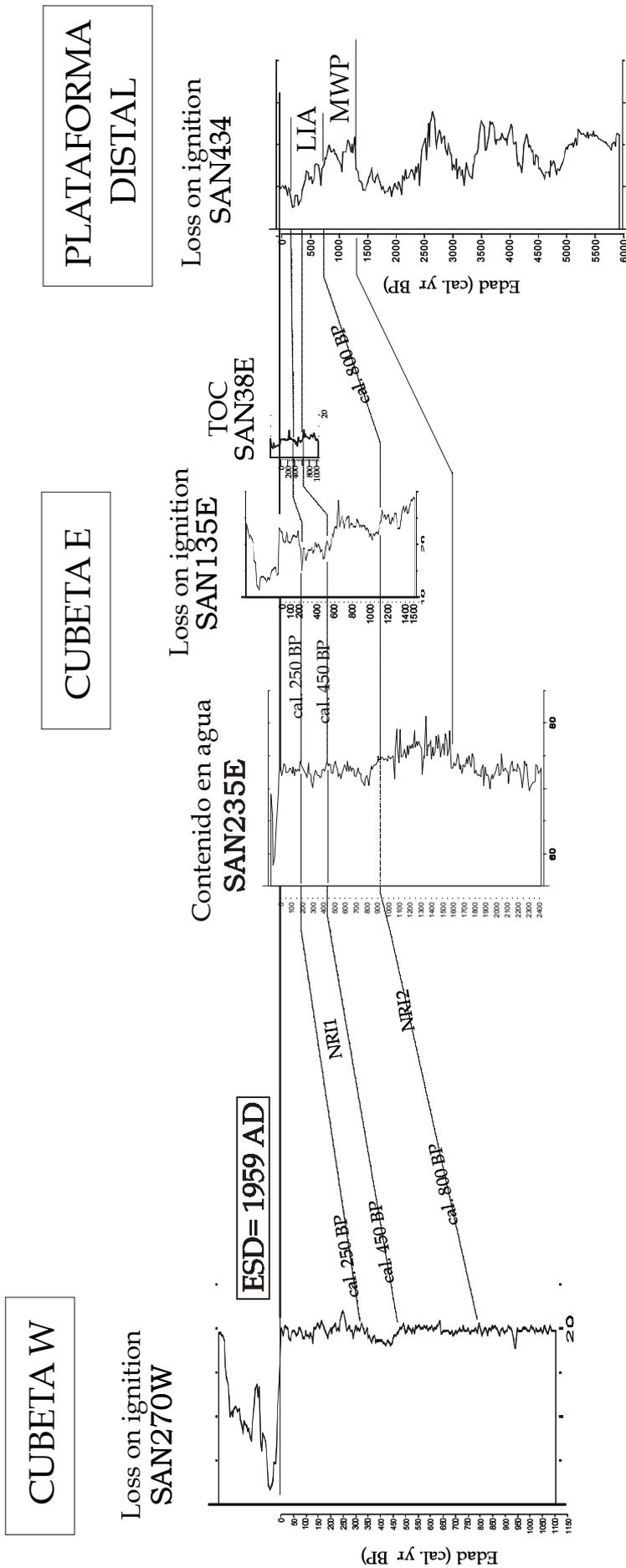
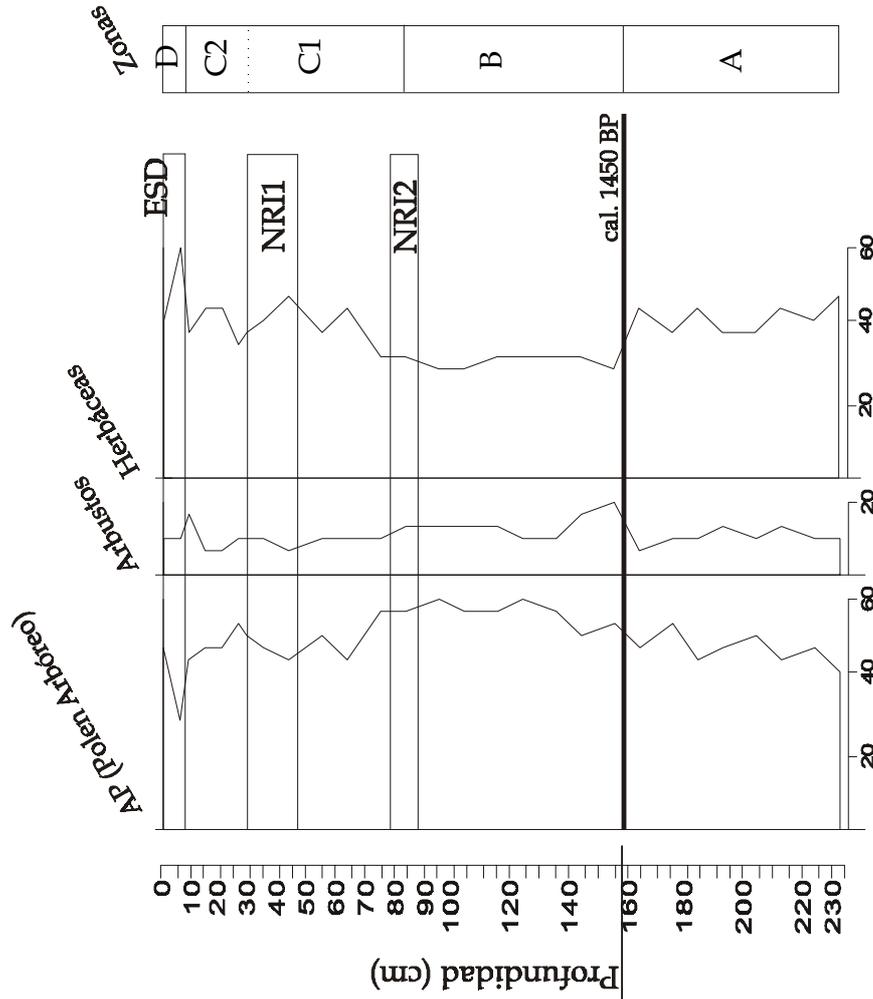


Fig. D.6.1. El periodo Medieval Warm Period (MWP) - Little Ice Age (LIA) en el registro sedimentario del Lago de Sanabria. Los niveles sedimentarios NRI2 y NRI1 representan dos eventos discretos de enfriamiento, situados al inicio y final del periodo LIA, respectivamente. ESD = Episodio Sedimentario Detrítico (sedimento asociado a la rotura de la presa Vega de Tera, 1959 AD).

Contenido polínico
Testigo SAN235E



Contenido en agua
Testigo SAN235E

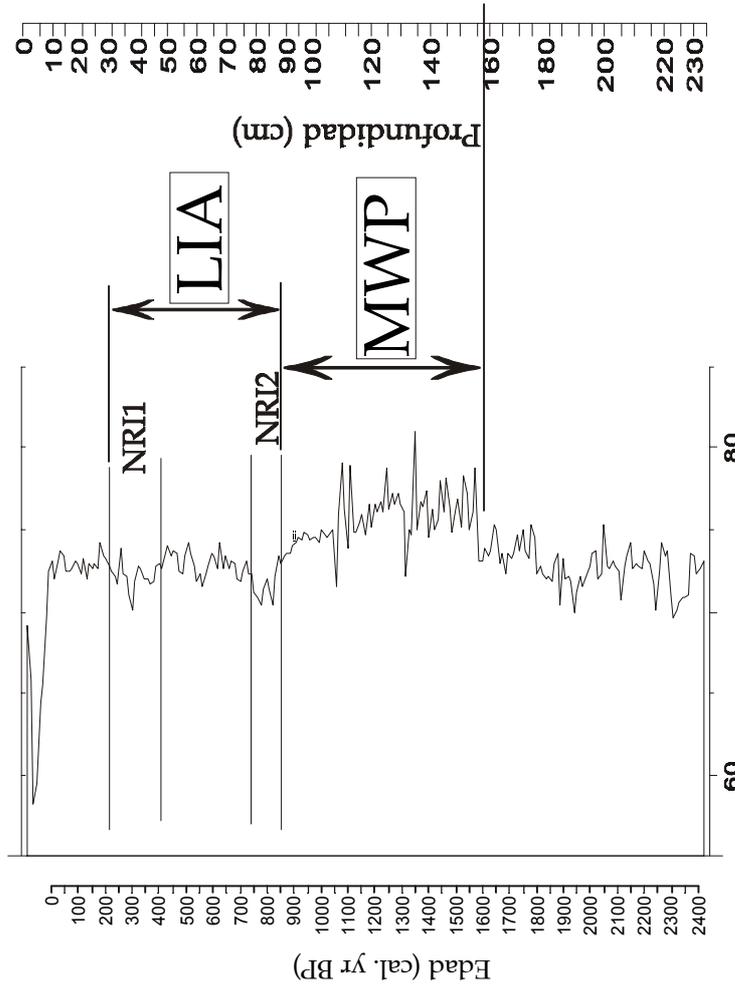


Fig. D.6.2. El análisis polínico, realizado en el sedimento del Lago de Sanabria, evidencia un aumento significativo del Polen Arbóreo (AP) durante el periodo MWP (zona B), sugiriendo la existencia del desarrollo de una masa forestal relativamente importante.

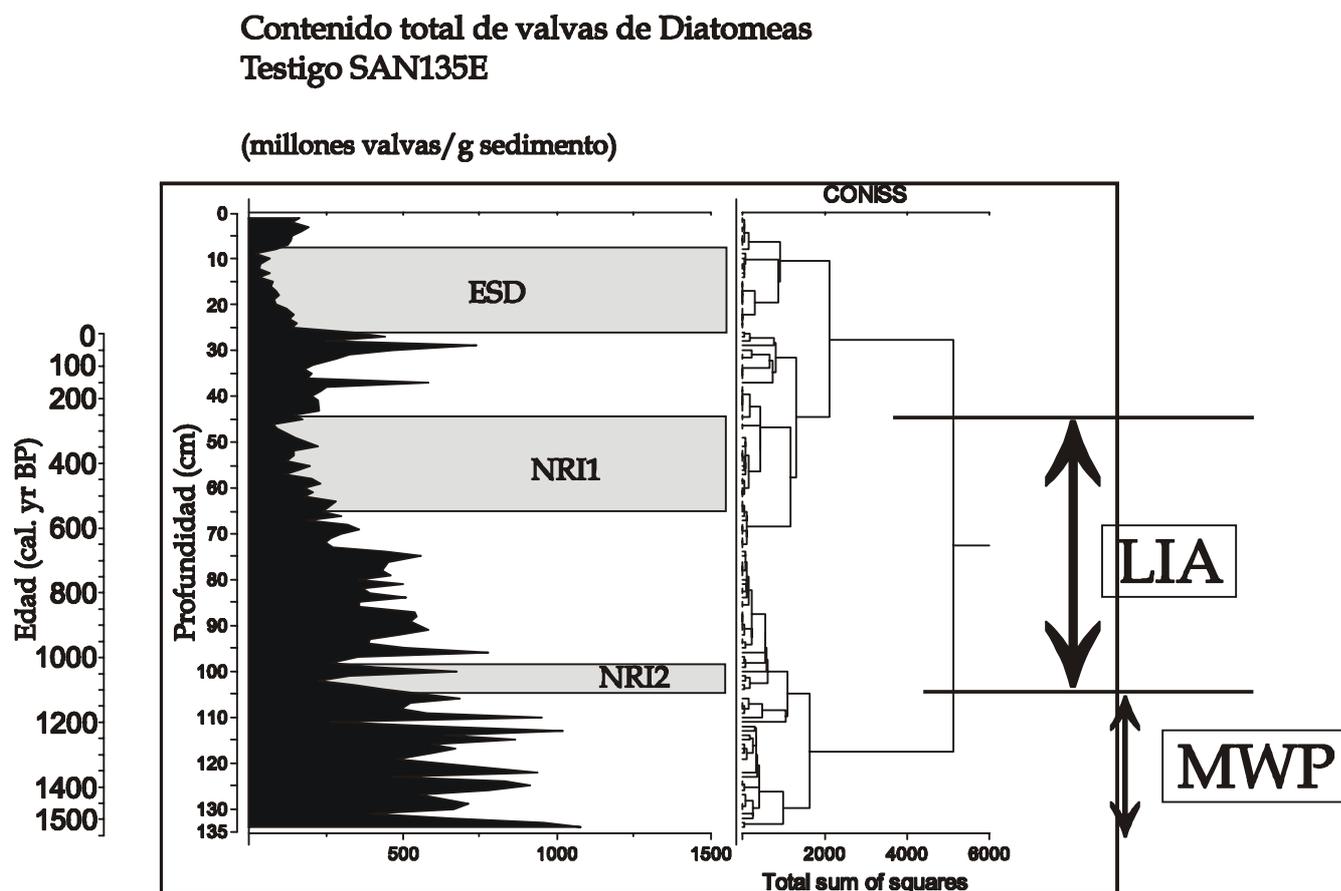


Fig. D.6.3. El análisis de diatomeas, realizado en el sedimento del Lago de Sanabria, evidencia una disminución significativa en el contenido en diatomeas durante el periodo LIA, sugiriendo la implantación de unas condiciones climáticas frías. Los niveles NRI2 y NRI1 constituyen dos eventos discretos de enfriamiento situados al inicio y final del LIA, respectivamente. El horizonte sedimentario NRI1 se encuentra asociado a un enfriamiento más intenso que el asociado a NRI2.

Discusión 7. EL REGISTRO DEL CONTENIDO EN MATERIA ORGÁNICA DEL SEDIMENTO DEL LAGO DE SANABRIA: RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD SOLAR.

Como ha sido señalado en el subcapítulo 29, numerosos estudios han destacado la importancia de la influencia de la actividad solar sobre el sistema climático de la Tierra. La evidencia proviene a partir de la existencia de una estrecha correlación entre cambios inferidos en la tasa de producción de los nucleidos cosmogénicos ^{14}C y ^{10}Be , y cambios detectados en parámetros paleoclimáticos de diversos registros paleoambientales (registros de hielo, sedimentos marinos, etc.).

De especial importancia constituye el estudio de los testigos marinos del Atlántico Norte. Los análisis paleoclimáticos han evidenciado oscilaciones de escala centenaria-milenaria del registro de IRD, manifestando una estrecha relación con el registro de los nucleidos ^{14}C y ^{10}Be (Bond et al., 2001). Por lo tanto, se infiere la existencia de un mecanismo de forzamiento solar que actúa en el ciclo climático de 1.500 años.

Para comprobar la posible influencia de la actividad solar en la dinámica sedimentaria del Lago de Sanabria, se ha comparado el registro del contenido en materia orgánica (LOI) del Lago de Sanabria con los registros relacionados con la actividad solar, es decir, con: a) registro del ^{14}C atmosférico, b) registro del ^{10}Be , y c) registro de Sunspots. La tasa de producción de los nucleidos cosmogénicos se encuentra relacionada con los vientos solares y la actividad solar: así, las mayores tasas de producción de ^{14}C y ^{10}Be suceden en periodos de vientos solares débiles y de radiación solar reducida (Bond et al., 2001). Por otra parte, los periodos con mayor número de *sunspots* están asociados a una mayor actividad solar.

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

La comparación de los registros del LOI del Lago de Sanabria con los indicadores de actividad solar se ha realizado bajo la admisión de las siguientes consideraciones:

- A. En ningún momento se pretende hacer coincidir todos los picos máximos y mínimos del registro del LOI con sus posibles respectivos 'homólogos' en el registro del C-14; es decir, se asume que no todas las fluctuaciones del LOI han de estar relacionadas con fluctuaciones en el ^{14}C atmosférico, ni todas las fluctuaciones del ^{14}C atmosférico han de estar relacionadas con fluctuaciones del LOI.
- B. La comparación entre el LOI y el ^{14}C atmosférico, para los últimos 6.000 años, permite destacar la importancia de ciertos eventos solares en la respuesta sedimentaria del Lago de Sanabria. Estos eventos se caracterizan por presentar disminuciones en la actividad solar (aumentos bruscos del ^{14}C atmosférico), y son marcados con una estrella (numerada) en la **Fig. D.7.1**. Así, en el registro general del ^{14}C atmosférico durante los últimos 6.000 años, se puede observar que ciertos eventos solares de enfriamiento se correlacionan cronoestratigráficamente con disminuciones bruscas y generales en el contenido en materia orgánica del Lago de Sanabria. Estas disminuciones del LOI están asociadas fundamentalmente al

comienzo de los grandes periodos de enfriamiento del registro del LOI del Lago de Sanabria (periodos E-3, E-2, E-1, y E-0) (**Fig. D.7.1**).

- C. La consideración A responde a la presencia, en el sistema climático, de múltiples factores ambientales que condicionan la respuesta climática final de un sistema lacustre. Se asume que las características de la combinación lineal de estos factores ambientales no es constante en el tiempo, debido a que el comportamiento de un factor ambiental puede encontrarse condicionado por el comportamiento del resto del sistema (ya sea de la combinación lineal del resto de factores y/o de la actuación de cada uno de ellos por separado). Por lo tanto, la relación causa-efecto tampoco ha de ser necesariamente constante en el tiempo (causa = combinación lineal de los factores ambientales; efecto = respuesta climática en el sedimento del Lago de Sanabria). Los eventos solares numerados y marcados con una estrella (**Fig. D.7.1**) son, en consecuencia, eventos solares que sucedieron en un periodo óptimo donde la combinación lineal de los diferentes factores ambientales ha permitido establecer una relación causa-efecto identificable mediante el registro del LOI.

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

La comparación establecida entre el registro del LOI del Lago de Sanabria y el registro de ^{14}C atmosférico se muestra en la **Fig. D.7.1**. El registro de materia orgánica está representado por el testigo SAN434 (plataforma distal), y abarca los últimos 6.000 años. El registro de ^{14}C atmosférico ha sido extraído de Magny (1993), y abarca los últimos 7.000 años.

La **Fig. D.7.2** muestra la comparación entre ambos parámetros para los últimos 2.000 años. El registro de materia orgánica está representado por el último ciclo de 1.500 años en el contenido en materia orgánica del registro sedimentario del Lago de Sanabria (testigo SAN434). Los datos de ^{14}C atmosférico han sido extraídos de la base de datos de NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) (1996).

Las fluctuaciones importantes observables en el registro de materia orgánica del Lago de Sanabria (p. ej., comienzo de las fases de enfriamiento E-3, E-2, E-1, y E-0) se encuentran asociadas cronoestratigráficamente con aumentos importantes en el contenido en ^{14}C atmosférico (**Fig. D.7.1 y D.7.2**). Así, podemos observar que:

- a) La Pequeña Edad del Hielo (*Little Ice Age - LIA*) se correlaciona con contenidos elevados de ^{14}C atmosférico, correspondientes a los mínimos solares de Maunder, Spörer y Wolf (**Fig. D.7.1 y D.7.2**). Las elevadas concentraciones de ^{14}C atmosférico asociadas a la LIA coinciden con los contenidos más bajos de materia orgánica (LOI) en el testigo SAN434 (plataforma distal).
- b) Los horizontes sedimentarios NRI (NRI1 y NRI2), detectados en el registro del Lago de Sanabria, determinan el límite inferior y superior del periodo LIA (E-0) (**Fig. D.7.2**). Así, el horizonte NRI2 (cal. 800-700 yr BP) y el horizonte NRI1 (cal. 450-250 yr BP) constituyen dos eventos discretos de enfriamiento asociados a la LIA. El horizonte NRI2 representa un enfriamiento asociado al mínimo solar de Wolf, mientras que el horizonte NRI1 representa un enfriamiento asociado fundamentalmente al mínimo solar de Maunder (**Fig. D.7.1 y D.7.2**).
- c) El periodo *Medieval Warm Period* (MWP) presenta un pequeño evento de enfriamiento, situado, aproximadamente, en cal. 1.000-900 yr BP. Este evento se caracteriza por una apreciable disminución en el contenido en materia orgánica,

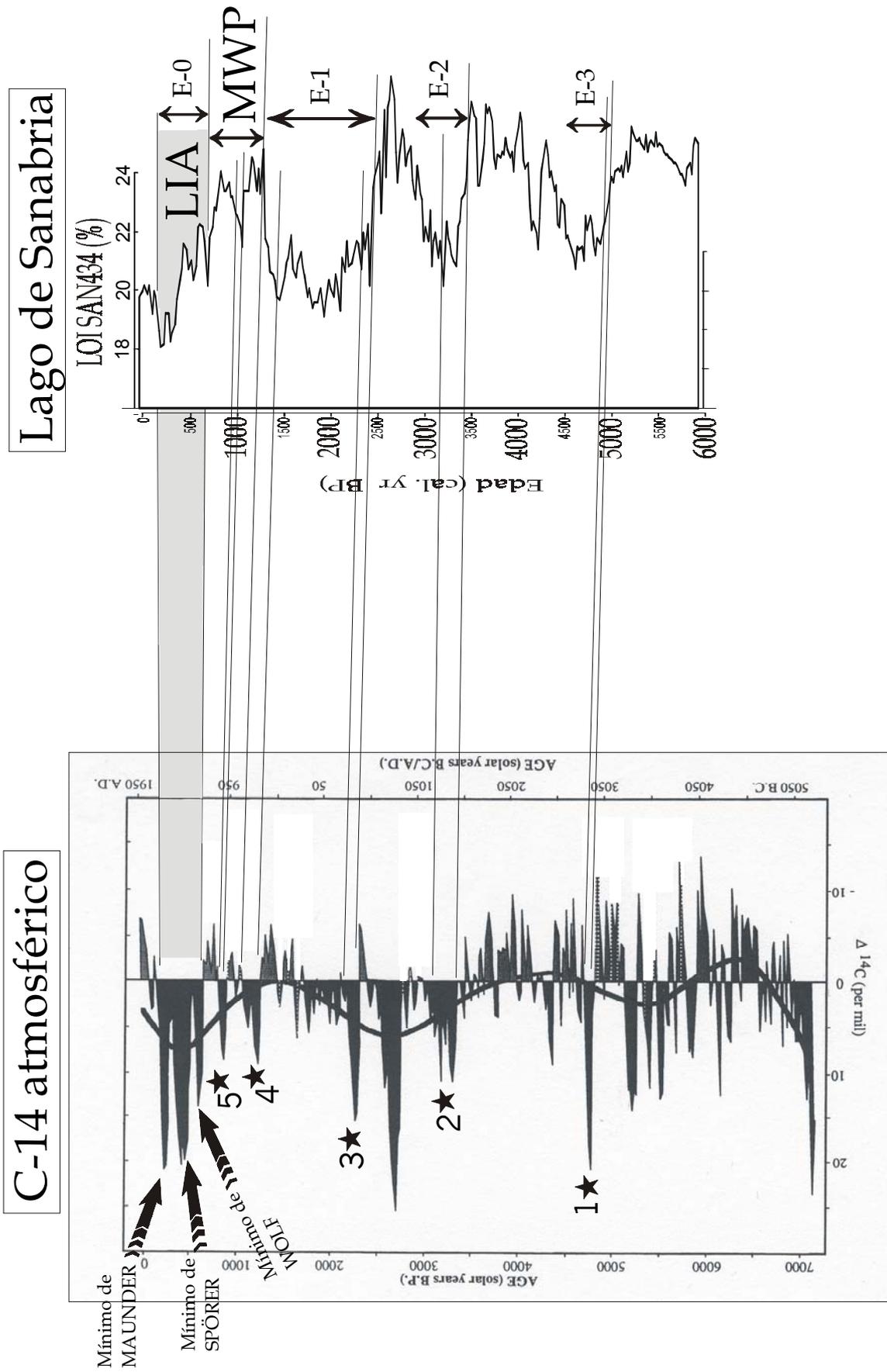


Fig. D.7.1. Comparación entre el registro del C-14 atmosférico y el registro del LOI en el Lago de Sanabria durante los últimos 6.000 años. Los comienzos de los episodios de enfriamiento en el registro de materia orgánica del lago (enfriamientos E-3, E-2, E-1 y E-0) se encuentran correlacionados cronoestratigráficamente con aumentos importantes en el contenido en C-14 atmosférico (marcados con una estrella). El gráfico del registro de C-14 atmosférico ha sido extraído de Magny (1993).

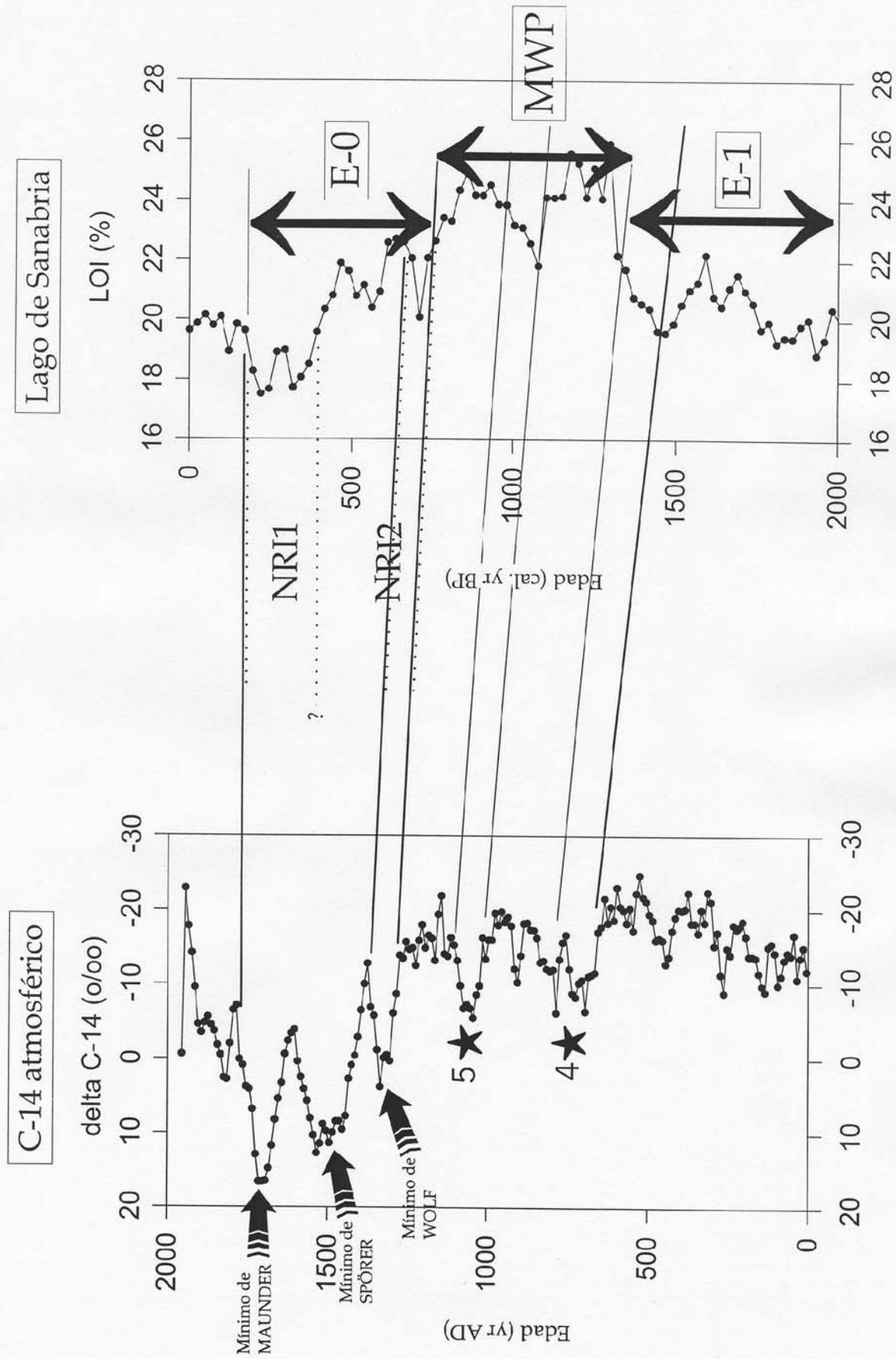


Fig. D.7.2. Comparación entre el registro del C-14 atmosférico y el registro de materia orgánica del Lago de Sanabria durante los últimos 2.000 años. Las principales fluctuaciones observables en el registro de materia orgánica del Lago de Sanabria se encuentran correlacionadas cronoestratigráficamente con aumentos importantes en el contenido en C-14 atmosférico. Los datos del C-14 atmosférico han sido extraídos de NOAA.

- asociada a un aumento considerable en el contenido en ^{14}C atmosférico (corresponde al evento solar marcado como 5) (**Fig. D.7.1** y **D.7.2**).
- d) El periodo MWP se encuentra limitado por los 2 últimos eventos de enfriamiento; por el E-1 (límite inferior) y por el E-0 (límite superior; LIA) (**Fig. D.7.2**). Cada uno de estos eventos coincide con fuertes alteraciones en las concentraciones de ^{14}C atmosférico (corresponde al evento solar marcado como 4, y a los 3 mínimos solares de la LIA, respectivamente).
- e) Ciertos aumentos bruscos en el ^{14}C atmosférico se correlacionan con cambios muy significativos en el contenido en materia orgánica (relacionados con contenidos bajos en el LOI) (**Fig. D.7.1** y **D.7.2**). Los siguientes niveles cronoestratigráficos constituyen un ejemplo: cal. 5.000-4.700 yr BP (comienzo del enfriamiento E-3; corresponde al evento solar marcado como 1); cal. 3.500-3.200 yr BP (comienzo del enfriamiento E-2; corresponde al evento solar marcado como 2); cal. 2.400-2.300 yr BP (comienzo del enfriamiento E-1; corresponde al evento solar marcado como 3), cal. 1.300-1.200 yr BP (final del enfriamiento E-1; corresponde al evento solar marcado como 4), y cal. 700 yr BP (final del MWP, e inicio del LIA (E-0); corresponde al inicio del mínimo solar de Wolf).

Los resultados sugieren que las principales disminuciones importantes en el LOI del Lago de Sanabria (comienzo de las fases de enfriamiento E-3, E-2, E-1, y E-0) están relacionadas cronoestratigráficamente con aumentos bruscos del ^{14}C atmosférico, es decir, con disminuciones notables de la actividad solar. No todos los aumentos bruscos del ^{14}C atmosférico están asociados a una respuesta paleolimnológica en el registro del LOI del Lago de Sanabria (véase las consideraciones aportadas en el apartado 1.1.).

7.3. El contenido en materia orgánica en el Lago de Sanabria y el registro de ^{10}Be .

Las tasas de producción de los nucleidos cosmogénicos ^{14}C y ^{10}Be presentan una elevada correlación (Stuiver & Braziunas, 1993; Bond et al., 2001). Por lo tanto, existe una elevada probabilidad que la comparación entre el registro de ^{10}Be y el registro del LOI presenten resultados similares a los obtenidos mediante la comparación entre el registro de ^{14}C atmosférico y el registro del LOI. La comparación establecida entre el registro del LOI del Lago de Sanabria y el registro de ^{10}Be se muestra en la **Fig. D.7.3**.

La **Fig. D.7.3** muestra la comparación entre el registro de materia orgánica del testigo SAN434 (plataforma distal) y el registro de ^{10}Be para los últimos 3.000 años. La gráfica del registro del ^{10}Be ha sido extraída de Stuiver et al. (1991). Las principales fluctuaciones observables en el registro de materia orgánica del Lago de Sanabria se encuentran asociadas cronoestratigráficamente con aumentos importantes en el contenido en ^{10}Be (**Fig. D.7.3**). Los resultados de la correlación entre el registro del ^{10}Be y el LOI del Lago de Sanabria son muy parecidos a los resultados de la correlación entre el registro del ^{14}C atmosférico y el LOI del lago.

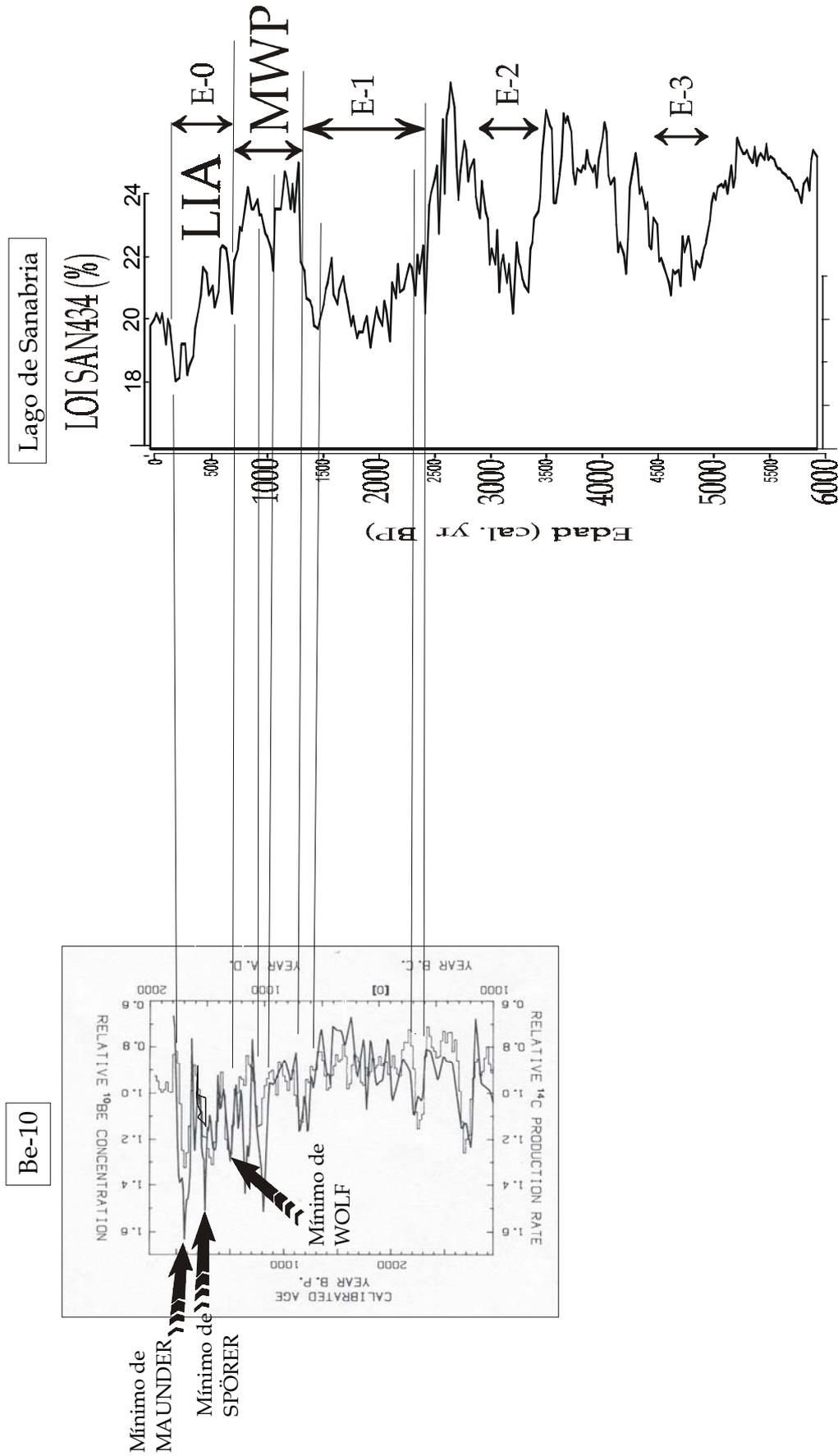


Fig. D.7.3. Comparación entre el registro del Be-10 y el registro del LOI en el Lago de Sanabria durante los últimos 3.000 años. Las principales fluctuaciones observables en el registro de materia orgánica del Lago de Sanabria se encuentran correlacionadas cronológicamente con aumentos importantes en el contenido en Be-10. El gráfico del registro de Be-10 ha sido extraído de Stuiver et al. (1991). El gráfico muestra las fluctuaciones del Be-10 (línea continua gruesa) y del C-14 (línea continua delgada).

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

La correlación establecida entre el registro del LOI del Lago de Sanabria y el registro del número de Sunspots se muestra en la **Fig. D.7.4**. El registro del número de Sunspots representa un registro anual documentado que abarca desde 1700 AD hasta 2001 AD. El registro de materia orgánica está representado por el testigo SAN135E (Cubeta E), y abarca los últimos 400 años.

Debido al corto espacio temporal asociado al registro de Sunspots, se ha escogido un testigo sedimentario que presente una tasa de sedimentación suficientemente elevada para satisfacer la resolución requerida; en este caso, el testigo SAN135E (Cubeta E). Asimismo, el testigo SAN135E no se encuentra fuertemente influenciado por la actuación de posibles factores de carácter local, como sería el caso del testigo situado cerca de la entrada del río Tera (testigo SAN270W, Cubeta W).

La serie del número de Sunspots ha sido extraída de la base de datos de NOAA. Con el fin de apreciar mejor las fluctuaciones de más baja frecuencia, se ha realizado un suavizado de la serie; de esta forma, la suavización de la ciclicidad de 11 años en el número de Sunspots permite observar con más claridad otras fluctuaciones más generales. La ciclicidad de más baja frecuencia observable después del suavizado es una ciclicidad de 94-100 años (**Fig. D.7.4**), asociada probablemente al ciclo solar de Gleissberg.

Las principales fluctuaciones observables en el registro de materia orgánica del Lago de Sanabria se encuentran correlacionadas con fluctuaciones importantes en la tendencia general suavizada del número de Sunspots (**Fig. D.7.4**). Así, el contenido en materia orgánica del sedimento del Lago de Sanabria aumenta en periodos donde la actividad solar es mayor (mayor número de Sunspots). Esta observación sugiere que el ciclo solar de Gleissberg ha influido de forma importante en la dinámica sedimentaria del lago.

En resumen, la comparación del registro del LOI con los registros del ^{14}C atmosférico, del ^{10}Be , y del número de *sunspots*, sugiere que la actividad solar ha condicionado de forma importante la sedimentación de materia orgánica en el sistema lacustre del Lago de Sanabria. Así, el conjunto de enfriamientos climáticos acontecidos cada 1.500 años, detectados en el Lago de Sanabria, se encuentra condicionado por la actividad solar. Recientes estudios paleoclimáticos han confirmado la influencia de la actividad solar en el control del clima del Atlántico Norte durante el Holoceno (Bond et al., 2001).

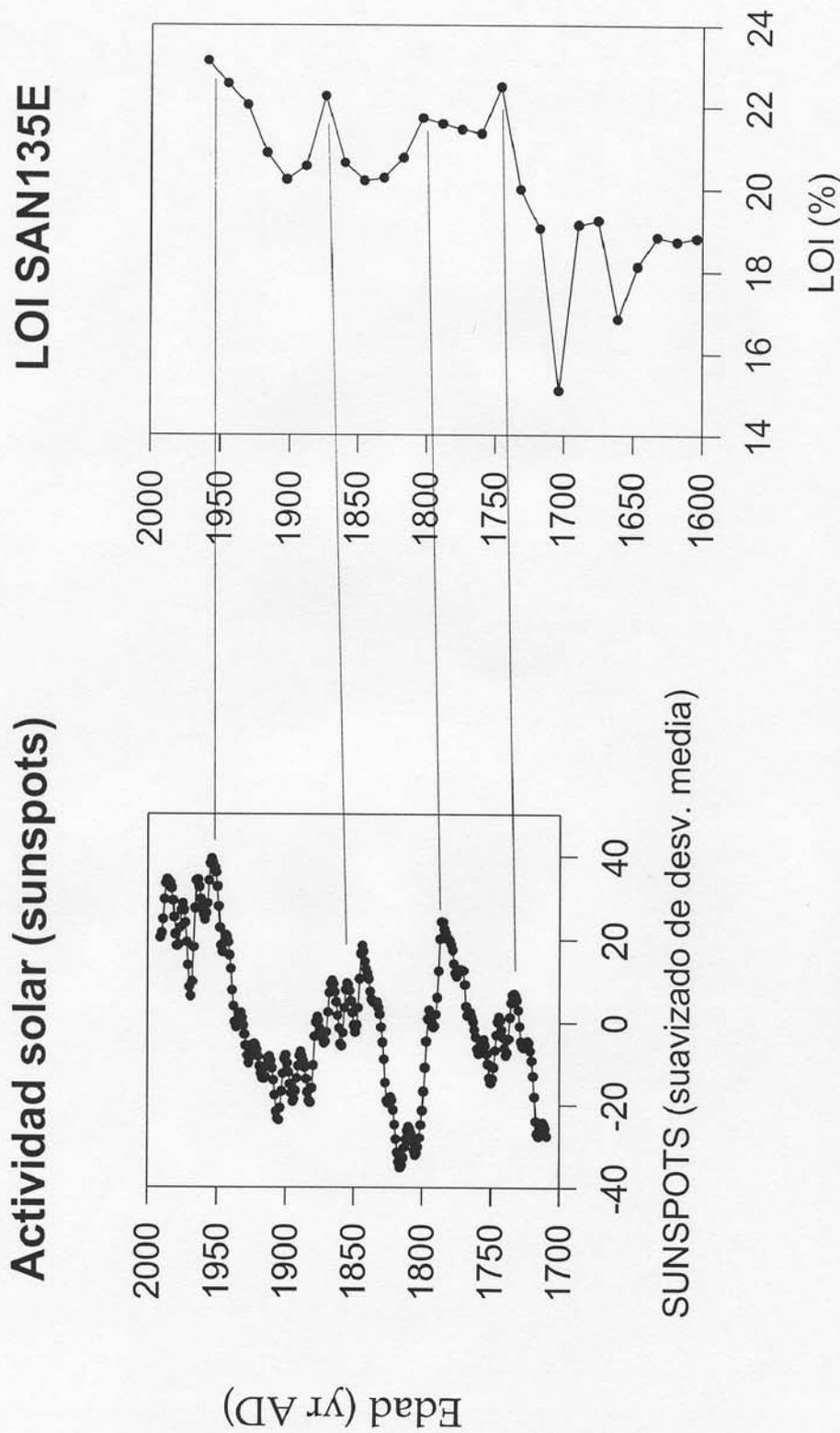


Fig. D.7.4. Comparación entre el registro de Sunspots y el registro de materia orgánica del Lago de Sanabria (últimos 300 años). Las principales fluctuaciones observables en el registro de materia orgánica del Lago de Sanabria se encuentran correlacionadas cronológicamente con fluctuaciones importantes en la tendencia general del número de Sunspots. Los datos del número de Sunspots han sido extraídos de NOAA.

Discusión 8. CICLOS EN EL LOI DEL SEDIMENTO DEL LAGO DE SANABRIA Y EN LOS INDICADORES DE LA ACTIVIDAD SOLAR.

El análisis espectral de la señal del LOI del sedimento del Lago de Sanabria y el análisis espectral de los indicadores de la actividad solar (^{14}C atmosférico y *sunspots*) sugieren que la actividad solar constituye un factor muy importante en el proceso de sedimentación de la materia orgánica en el Lago de Sanabria (**Fig. D.8.1**). La comparación de ambas señales paleoclimáticas permite deducir que:

A) Existen ciclos que aparecen tanto en el registro del LOI del Lago de Sanabria como en el registro analizado de los indicadores de la actividad solar (^{14}C atmosférico y *sunspots*). Estos ciclos son (**Fig. D.8.1**):

- A.1. Ciclo de 58-60 años (aparece en el LOI y en el ^{14}C atmosférico).
- A.2. Ciclo de 96-98 años (aparece en el LOI y en el registro de *sunspots*) (marcado con asterisco). Este ciclo estaría asociado al ciclo solar de Gleissberg.
- A.3. Ciclo de 200-211 años (aparece en el LOI y en el ^{14}C atmosférico).
- A.4. Ciclo de 300-311 años (aparece en el LOI y en el ^{14}C atmosférico).

B) Además, existen ciclos que aparecen en el registro del LOI del Lago de Sanabria y coinciden con otros estudios previos (**Fig. D.8.2**): 1) tanto en otros registros paleoclimáticos del Atlántico Norte (registros de hielo y registros de sedimentos marinos), o 2) tanto en otros análisis espectrales del ^{14}C atmosférico. Estos ciclos detectados en el LOI del Lago de Sanabria son:

- B.1. Ciclo de 156 años (detectado también en el ^{14}C atmosférico y en el registro de hielo).
- B.2. Ciclo de 200-211 años (detectado también en el ^{14}C atmosférico y en el registro de hielo).
- B.3. Ciclo de 300-311 años (detectado también en el registro de hielo).
- B.4. Ciclo de 456 años (detectado también en el ^{14}C atmosférico y en el registro de hielo).
- B.5. Ciclo de 1.478 años; es el ciclo climático de 1.500 años detectado en numerosos estudios paleoclimáticos del Atlántico Norte (detectado en el registro de hielo, en sedimentos marinos, y en sedimentos lacustres).

Todas estas observaciones permiten deducir:

- 1) La presencia de ciclos muy similares en el registro del LOI del Lago de Sanabria y en el registro del ^{14}C atmosférico sugiere la existencia de una importante relación causa-efecto entre estos dos componentes del sistema natural. Por lo tanto, la actividad solar constituye un factor muy importante en el sistema deposicional de la materia orgánica en el Lago de Sanabria.
- 2) La presencia de ciclos muy similares en el registro del LOI del Lago de Sanabria y en el registro paleoclimático del Atlántico Norte (registros de hielo y registros de sedimentos marinos) sugiere que el registro del Lago de Sanabria pertenece al

conjunto de registros que responden a las características paleoclimáticas del Atlántico Norte.

- 3) Considerando en conjunto los puntos 1 y 2, se deduce la existencia de una importante influencia de la actividad solar en el clima del Atlántico Norte. Así ha sido sugerido por los resultados obtenidos en: a) la correlación cronoestratigráfica realizada entre el LOI del Lago de Sanabria y los indicadores de la actividad solar (^{14}C atmosférico, ^{10}Be , y número de *sunspots*), y b) los estudios paleoclimáticos desarrollados en registros de sedimento marino del Atlántico Norte (Bond et al., 2001).

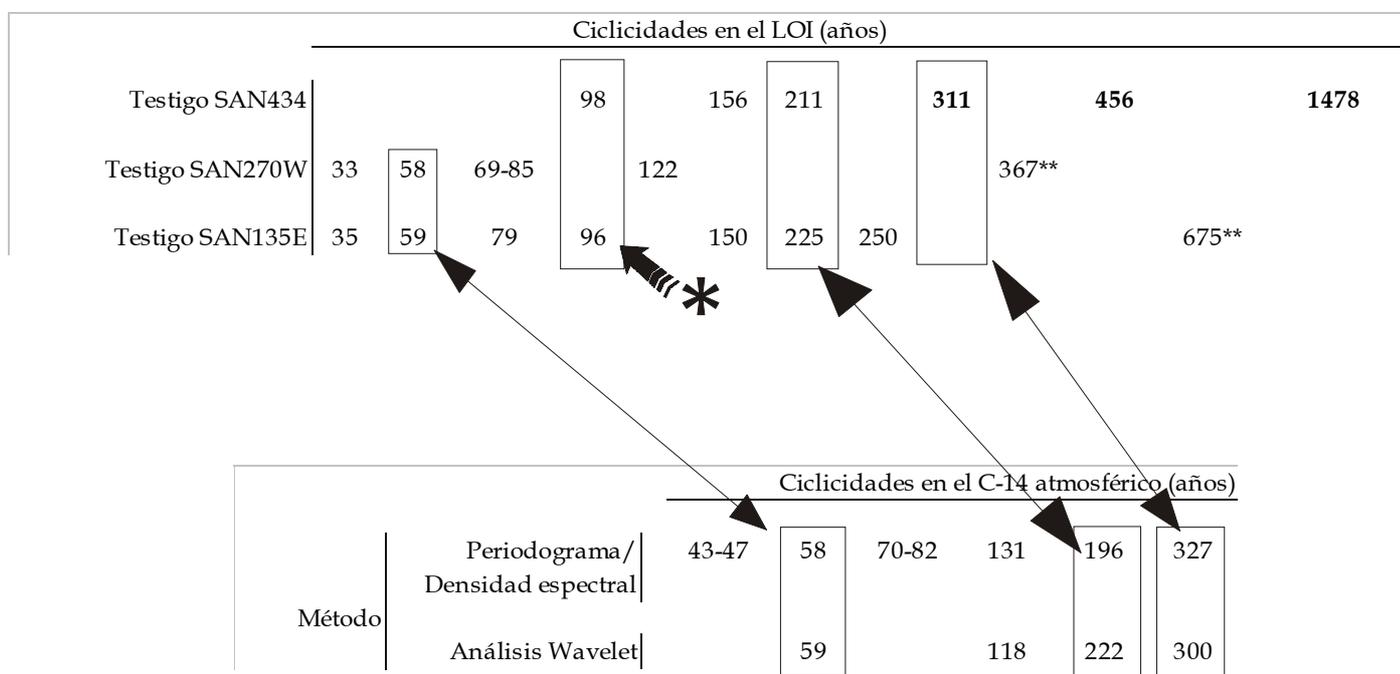


Fig. D.8.1. Periodicidad de los ciclos identificados en el registro del LOI del sedimento del Lago de Sanabria (arriba) y periodicidad de los ciclos identificados en el registro del C-14 atmosférico (abajo).

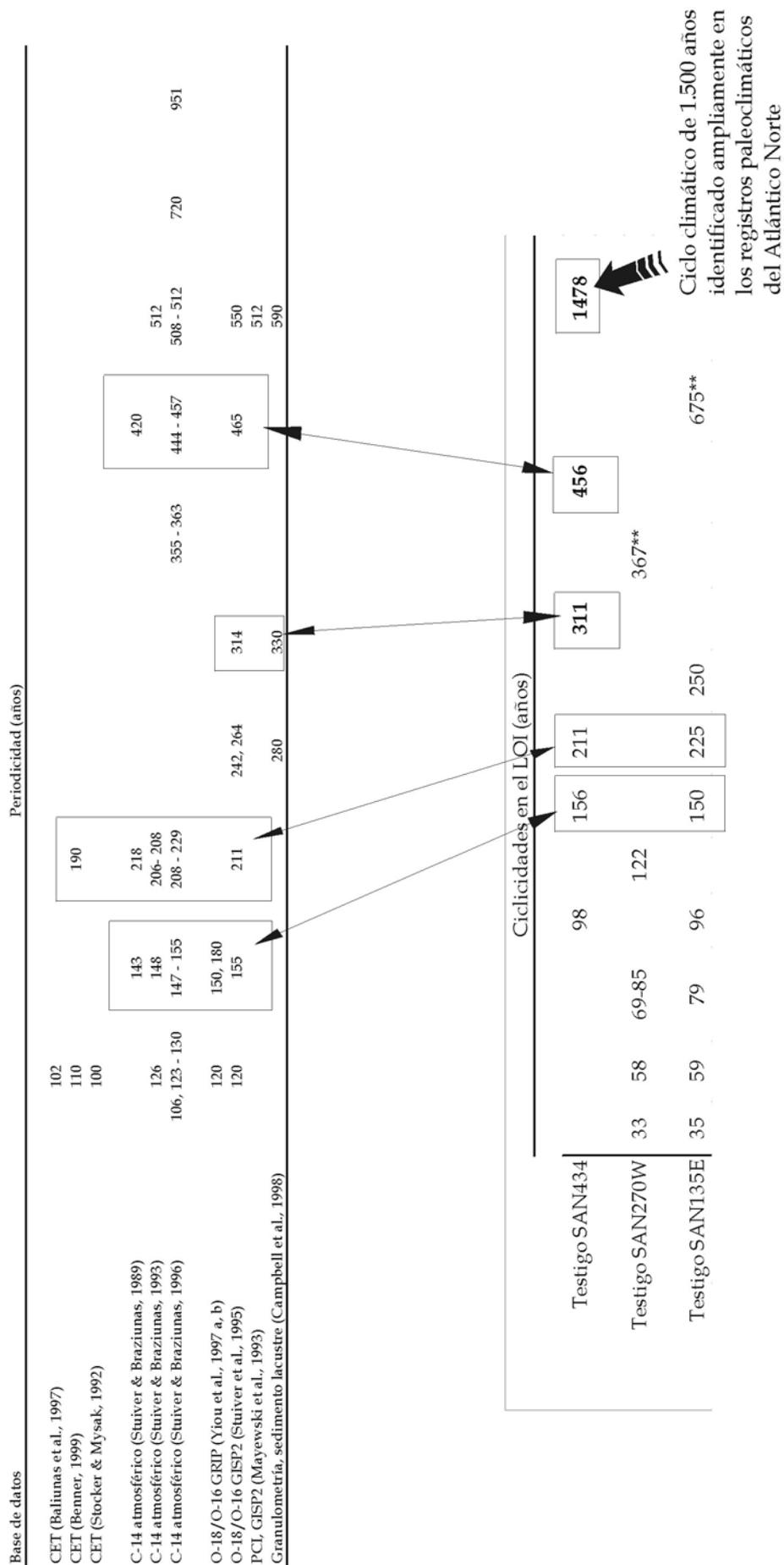


Fig. D.8.2. Periodicidad de escala centenaria de los ciclos identificados en los estudios paleoclimáticos de la región del Atlántico Norte (arriba) y periodicidad de los ciclos identificados en el registro del LOI del sedimento del Lago de Sanabria (abajo).

CONCLUSIONES

Conclusiones I

- 1) El Lago de Sanabria se encuentra situado en la vertiente Atlántica de la península Ibérica, región geográfica sometida al régimen climático de la NAO (*North Atlantic Oscillation*). Así, el régimen de precipitaciones en el lago se encuentra fuertemente condicionado por las fases negativas o positivas de esta oscilación climática del Atlántico Norte. La elevada tasa de renovación del agua del sistema limnológico del Lago de Sanabria determina que dicho lago sea muy SENSIBLE al RÉGIMEN DE PRECIPITACIONES de la región y, en consecuencia, a los CAMBIOS CLIMÁTICOS.
- 2) El Lago de Sanabria es un lago oligotrófico situado en una cuenca hidrográfica con substrato cristalino (rocas plutónicas y metamórficas). Estas características determinan la ausencia de Carbono (C) de origen inorgánico en el sistema deposicional del lago, es decir, todo el C presente en el sedimento se encuentra asociado a la materia orgánica. Así lo demuestra el estudio paleolimnológico realizado; los valores del *Loss on ignition* (LOI), determinados en el sedimento, presentan una elevada correlación positiva con los valores del *Total Organic Carbon* (TOC).
- 3) La elevada correlación positiva entre los parámetros paleolimnológicos LOI y TOC muestra la gran importancia que representa la determinación del LOI en el sedimento del Lago de Sanabria. Así, la determinación del LOI constituye una medida rápida, económica y fiable del contenido en MATERIA ORGÁNICA del sedimento en este tipo de sistemas lacustres oligotróficos. El funcionamiento limnológico del Lago de Sanabria confiere más importancia a este hecho, ya que la MATERIA ORGÁNICA ALÓCTONA constituye una componente muy importante en el aporte general de materia orgánica al sistema lacustre. Así, la determinación del LOI en el sedimento del Lago de Sanabria tiene un VALOR PALEOCLIMÁTICO muy importante, debido a que la materia orgánica alóctona es aportada por la erosión y el transporte hídrico en la cuenca del lago, procesos éstos controlados por el RÉGIMEN DE PRECIPITACIONES de la región. El estudio paleolimnológico demuestra que los valores del $\delta^{13}\text{C}$ del sedimento del Lago de Sanabria tienen valores situados entre -26 o/oo y -28 o/oo, es decir, valores propios de C procedente de plantas terrestres.
- 4) Los valores del LOI en el sedimento del Lago de Sanabria aportan una aproximación cualitativa de las características paleoclimáticas existentes en el momento de la deposición de la materia orgánica en el sistema lacustre. Así, VALORES ELEVADOS en el contenido en materia orgánica, en el sedimento del lago, corresponden a periodos climáticos relativamente CÁLIDOS y HÚMEDOS. Por otra parte, VALORES BAJOS en el contenido en materia orgánica corresponden a periodos climáticos relativamente FRÍOS y SECOS.

- 5) La determinación del LOI en el relleno sedimentario del Lago de Sanabria ha manifestado la señal paleoclimática del Atlántico Norte para los últimos 6.000 años del actual Holoceno. La determinación del LOI ha evidenciado la presencia de ciclos, de diversa periodicidad, en el contenido en materia orgánica del sedimento; el ciclo más representativo detectado es un ciclo de 1.500 años (identificado mediante el periodograma/densidad espectral, el análisis de Fourier, y el análisis Wavelet). Este ciclo de 1.500 años ha sido ampliamente evidenciado, mediante otros tipos de indicadores y registros, en numerosos estudios paleoclimáticos desarrollados en la región del Atlántico Norte.
- 6) El registro paleoclimático del Lago de Sanabria ha evidenciado, para los últimos 6.000 años de la historia climática de la región noroccidental de la península Ibérica, la presencia de grandes periodos de enfriamiento acontecidos cada 1.500 años. Cada uno de estos enfriamientos periódicos ha sido más frío con respecto al anterior, evidenciándose una tendencia general de enfriamiento. Esta tendencia ha sido detectada, también, en numerosos estudios paleoclimáticos de la región del Atlántico Norte, y forma parte de la tendencia climática de un ciclo de Bond.
- 7) El registro paleoclimático del Lago de Sanabria evidencia los últimos ciclos climáticos de 1.500 años pertenecientes al último ciclo de Bond. Así, la tendencia general de enfriamiento adquiere sus condiciones más frías en un nivel sedimentario que corresponde a la Pequeña Edad del Hielo (*Little Ice Age - LIA*).
- 8) La LIA ha sido identificada en el registro paleoclimático del Lago de Sanabria. La situación cronoestratigráfica de este periodo frío en el lago ha permitido comprender el contexto paleoclimático en el cual ha estado involucrado. Así, se evidencia que la LIA no ha representado un evento aislado y aleatorio en la historia climática, sino que se encuentra asociada al ciclo climático de 1.500 años del Atlántico Norte. Este periodo representa la fase más fría del último ciclo de Bond, y constituye el último periodo de enfriamiento de todo un conjunto de enfriamientos que ya acontecieron con anterioridad cada 1.500 años.
- 9) El periodo *Medieval Warm Period - Little Ice Age* (MWP-LIA) constituye gran parte del último ciclo climático de 1.500 años en el registro del LOI del Lago de Sanabria. El registro del LOI evidencia un calentamiento inicial brusco del ciclo climático de 1.500 años (correspondiente al MWP), seguido de un enfriamiento gradual del clima, que culmina con la LIA. La caracterización de esta secuencia climática (MWP seguido de la LIA) en el último ciclo climático de 1.500 años, sugiere la existencia de este mismo patrón para los ciclos climáticos de 1.500 años sucedidos con anterioridad en la región del Lago de Sanabria.
- 10) En el registro paleoclimático del Lago de Sanabria, el periodo LIA se encuentra caracterizado por dos episodios discretos de enfriamiento, situados en cal. 800-700 yr BP (límite inferior) y en cal. 450-250 yr BP (límite superior). Los dos episodios están bien reconocidos en el registro sedimentario del Lago de Sanabria mediante una apreciable disminución del contenido en materia orgánica; estos niveles de enfriamiento son denominados, en la presente Tesis Doctoral, *Niveles de Ruptura Inorgánica* (NRI).
- 11) El sedimento del Lago de Sanabria está constituido por un limo orgánico de color marrón oscuro (*gyttja*), muy homogéneo *a visu*. No obstante, el estudio

paleolimnológico evidencia que en el relleno deposicional del lago se identifican dos horizontes sedimentarios con características paleolimnológicas bien diferenciadas; estos horizontes son denominados *Niveles de Ruptura Inorgánica* (niveles NRI1 y NRI2). El horizonte NRI1 se encuentra situado cronoestratigráficamente en cal. 450-250 yr BP, mientras que el horizonte NRI2 está situado en cal. 800-700 yr BP. Así, los registros paleolimnológicos (contenido en agua, LOI, TOC, mineralogía, geoquímica, contenido en diatomeas, y contenido polínico) detectan claramente la existencia de estos dos horizontes. La aproximación paleolimnológica, obtenida por el conjunto de estos indicadores paleoambientales, sugiere la presencia de dos eventos discretos (NRI1 y NRI2) caracterizados por presentar condiciones climáticas relativamente frías y áridas.

- 12) El análisis geoquímico ha identificado con claridad la respuesta geoquímica del sedimento del Lago de Sanabria frente a los dos eventos discretos de enfriamiento (NRI1 y NRI2). Así, los niveles NRI1 y NRI2 representan condiciones máximas de aridez en la cuenca hidrográfica del Lago de Sanabria. Las respuestas geoquímicas del sedimento, debidas a la influencia del último ciclo climático de 1.500 años, no se limitan únicamente a los elementos geoquímicos mayoritarios: incluso el registro geoquímico de los Lantánidos (Tierras Raras) responde claramente a las modificaciones paleoambientales generadas por este ciclo climático de 1.500 años.
- 13) El registro sedimentario del Lago de Sanabria constituye, además de un buen archivo paleoambiental del clima del Atlántico Norte, un buen archivo paleoambiental de otros procesos naturales. Tales procesos son los fenómenos catastróficos sedimentarios, como las avenidas de agua y sedimento (*flash floods*). Así, el registro paleoambiental del Lago de Sanabria presenta un horizonte sedimentario asociado al sedimento aportado por la rotura de la presa Vega de Tera, avenida catastrófica acontecida en enero de 1959 en la cuenca hidrográfica del lago. Los registros paleolimnológicos (contenido en agua, LOI, TOC, granulometría, mineralogía, geoquímica, contenido en diatomeas, y contenido polínico) detectan claramente la existencia de este episodio catastrófico, denominado, en la presente Tesis Doctoral, *Episodio Sedimentario Detrítico* (ESD). En especial, el análisis geoquímico ha diferenciado claramente el horizonte ESD respecto otros episodios sedimentarios relativamente inorgánicos (horizontes NRI1 y NRI2).
- 14) El horizonte ESD (1959 AD) constituye un nivel inorgánico detrítico identificable en todo el Lago de Sanabria. El carácter sincrónico de este horizonte permite utilizarlo como un nivel guía para correlacionar diferentes testigos sedimentarios extraídos en el lago.
- 15) El horizonte ESD (1959 AD) ha sido caracterizado cronoestratigráficamente en el relleno sedimentario del Lago de Sanabria por datación radiométrica mediante ^{210}Pb y ^{137}Cs . Su situación cronoestratigráfica, así como sus características paleolimnológicas y sedimentológicas, permiten considerar este nivel como un ejemplo inmejorable para la aplicación del principio del actualismo.
- 16) A parte de un ciclo de 1.500 años detectado en el registro del LOI del Lago de Sanabria (asociado al ciclo climático de 1.500 años del Atlántico Norte), el análisis espectral de dicho registro ha permitido evidenciar la existencia de otros ciclos en el contenido en materia orgánica del sistema deposicional del lago. El análisis

espectral ha sido desarrollado mediante las siguientes aproximaciones: el análisis del periodograma/densidad espectral y el análisis Wavelet. Los ciclos identificados son de escala centenaria y de varias decenas de años.

- 17) Sin considerar el ciclo de 1.500 años, los ciclos más destacables identificados en el registro del LOI, son (identificados tanto por el periodograma/densidad espectral como por el análisis Wavelet): ciclo de 456 años y ciclo de 300-311 años. Ambos ciclos determinan las principales oscilaciones de orden menor en los valores del LOI. Su influencia es tal en el registro de materia orgánica, que determinan las principales características menores en la 'fisonomía' del registro del LOI del testigo SAN434 (plataforma distal).
- 18) Otros ciclos identificados en el registro del LOI son: ciclo de 200-211 años, ciclo de 156 años, ciclo de 96-98 años, ciclo de 58-60 años, y ciclo de 33-35 años.
- 19) Los ciclos identificados en el registro del LOI del Lago de Sanabria son muy similares a los ciclos identificados en los registros paleoclimáticos del Atlántico Norte. Estos ciclos son: ciclo de 1.478 años, ciclo de 456 años, ciclo de 300-311 años, ciclo de 200-211 años, ciclo de 156 años.
- 20) Los ciclos identificados en el registro del LOI del Lago de Sanabria son muy similares a los ciclos identificados en el registro del ^{14}C atmosférico. Estos ciclos son: ciclo de 456 años, ciclo de 300-311 años, ciclo de 200-211 años, ciclo de 156 años, y ciclo de 58-60 años. Asimismo, el ciclo de 96-98 años, identificado en el registro del LOI del Lago de Sanabria, es atribuible al ciclo solar de Gleissberg.
- 21) El registro del Lago de Sanabria pertenece al conjunto de registros que responden a las características paleoclimáticas del Atlántico Norte. Así lo sugiere: a) el estudio paleolimnológico realizado, y b) la presencia de ciclos muy similares tanto en el registro del LOI del Lago de Sanabria como en el registro paleoclimático del Atlántico Norte (registros de hielo y registros de sedimentos marinos).
- 22) La actividad solar constituye un factor muy importante en el sistema deposicional de la materia orgánica del Lago de Sanabria; existe una importante relación causa-efecto entre la actividad solar y el contenido en materia orgánica del sedimento del lago. Así lo sugiere: a) la presencia de ciclos muy similares en el registro del LOI del Lago de Sanabria y en el registro del ^{14}C atmosférico, y b) la correlación cronoestratigráfica realizada entre el LOI del Lago de Sanabria y los indicadores de la actividad solar (^{14}C atmosférico, ^{10}Be , y el número de *sunspots*). El estudio paleoclimático evidencia que los dos eventos discretos de enfriamiento (horizontes NRI), detectados en el registro sedimentario del Lago de Sanabria, se encuentran relacionados con mínimos solares; así, el evento de enfriamiento NRI1 se encuentra asociado al mínimo solar de Maunder, mientras que el enfriamiento NRI2 se encuentra asociado al mínimo solar de Wolf.
- 23) La consideración conjunta de los puntos 1, 21, y 22 sugiere que la oscilación climática de la NAO puede estar determinada de forma importante por la actividad solar.
- 24) El registro sedimentario del Lago de Sanabria constituye un ejemplo claro de un registro paleoclimático sensible al ciclo de 1.500 años del Atlántico Norte. Además,

mientras que los numerosos estudios paleoclimáticos previos se centran en el último periodo glacial, ya sea en sedimentos marinos o en registros de hielo, el Lago de Sanabria representa un modelo del ciclo climático de 1.500 años en un registro LACUSTRE del HOLOCENO.

- 25) El registro paleoclimático del Lago de Sanabria ha evidenciado la importancia de la existencia de marcadas oscilaciones climáticas en la vertiente occidental de la península Ibérica, asociadas al patrón general de las oscilaciones climáticas de 1.500 años del Atlántico Norte. El contexto cronoestratigráfico del registro del LOI del Lago de Sanabria sugiere que el actual calentamiento global de la Tierra puede haberse producido en gran parte sin la intervención del hombre; es decir, la acción antrópica no ha hecho más que acentuar una tendencia de calentamiento que ha comenzado a perfilarse de forma natural desde la finalización de la Pequeña Edad del Hielo (LIA). Si la acción antrópica no llega a perturbar suficientemente la dinámica natural del sistema climático, es de esperar un enfriamiento climático global hacia 2.800-3.200 AD (1.500 años después de la Pequeña Edad del Hielo). Además, también son de esperar eventos de enfriamiento, aunque de menor intensidad, asociados a ciclos climáticos de mayor frecuencia (p. ej., ciclo de 300-311 años); en consecuencia, es de esperar un enfriamiento climático importante hacia 2.100-2.150 AD (300 años después de la Pequeña Edad del Hielo).

Conclusiones II

- 1) El registro sedimentario del Lago de Sanabria es altamente sensible a las variaciones medioambientales. Así, el sistema lacustre del lago es un sensor de las variaciones medioambientales acontecidas tanto a escala regional (clima de la región del Atlántico Norte) como a escala local (fenómenos catastróficos acontecidos en su cuenca hidrográfica).
- 2) El *Loss on ignition* (LOI) constituye un parámetro paleolimnológico muy importante en el Lago de Sanabria. Por una parte, la determinación del LOI representa el contenido en materia orgánica en el sistema sedimentario del lago, constituyendo un buen indicador paleoclimático y paleoambiental. Por otra parte, el LOI reúne las siguientes características metodológicas: a) es económico, b) es rápido, y c) es fiable.
- 3) En el sistema sedimentario del Lago de Sanabria, el LOI muestra la presencia de oscilaciones en el contenido en materia orgánica. Estas oscilaciones están moduladas por la actividad solar; es decir, la actividad solar determina fuertemente la deposición de materia orgánica en el sistema lacustre del lago.
- 4) El registro sedimentario del Lago de Sanabria es sensible a importantes cambios medioambientales: a) al ciclo climático de 1.500 años ampliamente detectado en la región del Atlántico Norte, b) a la tendencia de enfriamiento general característica de un ciclo de Bond, c) detecta con detalle el periodo climático *Medieval Warm Period – Little Ice Age* (MWP-LIA), d) a ciclos climáticos de mayor frecuencia (p. ej., ciclos de 300-311 años y 456 años), e) al ciclo solar de Gleissberg, f) a los mínimos solares, g) a avenidas de agua y sedimento acontecidas en su cuenca hidrográfica (*flash floods*).