

Capítulo 6

Marco cronoestratigráfico y tasas de sedimentación en el Lago de Sanabria

Contenido:

- 14. Datación mediante radiocarbono (C-14)*
- 15. Datación mediante Pb-210 y Cs-137*
- 16. Tasas de sedimentación en el Lago de Sanabria*

Subcapítulo 14. DATACIÓN MEDIANTE RADIOCARBONO (^{14}C).

Se han efectuado dataciones absolutas mediante el método del carbono-14 (^{14}C), utilizando la técnica del AMS (Accelerator Mass Spectrometry). Las muestras de sedimento fueron analizadas por el laboratorio Beta Analytic Inc. (Miami, Florida). Se han realizado diversas dataciones en los diferentes testigos sedimentarios: 1 datación en SAN135E, 3 dataciones en SAN235E, 1 datación en SAN270W, 2 dataciones en SAN434, y 1 datación en SAN42.

Los datos analíticos son presentados como RCYBP (*radiocarbon years before present*; siendo el "presente" = 1950 AD). Por convenio internacional, la referencia moderna standard fue el 95% del contenido de ^{14}C del *National Bureau of Standard's Oxalic Acid*, y fue calculado utilizando el ^{14}C Libby (vida media = 5568 años). Los errores han sido presentados con una desviación standard de 2 sigma (95% probabilidad), y están basados en mediciones combinadas de la muestra, el *background*, y los standard de referencia modernos. Las relaciones de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ han sido calculadas con respecto al standard internacional PDB-1. Las edades RCYBP han sido normalizadas a -25 por mil, valor característico de la vegetación superior. El programa *Pretoria Calibration Procedure* ha sido utilizado para realizar la calibración de la edad radiocarbono a la edad calendario.

14.1. Dataciones y tasas de sedimentación en los testigos del Lago de Sanabria.

14.1.1. Resultados de las dataciones mediante ^{14}C .

Los resultados de las dataciones son presentados en la **Tabla 14.1**.

Testigo	Profundidad muestra (cm)	Laboratorio	Material datado	Tratamiento	Edad radiocarbono convencional	Resultado calibrado (2 sigma)	Edad (cal. años BP)	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (o/oo)
SAN135E	133-134	Beta-139809	Sedimento orgánico	Lavado ácido	1630+/-40 BP	1600-1415 BP (350-535 AD)	cal. 1510 BP (cal. 440 AD)	-26.0
SAN235E	79-80	Beta-149113	Sedimento orgánico	Lavado ácido	2410+/-50 BP	2720-2340 BP (770-390 BC)	cal. 2530 BP (cal. 580 BC)	-27.3
SAN235E	159-160	Beta-149114	Sedimento orgánico	Lavado ácido	2480+/-50 BP	2740-2360 BP (790-410 BC)	cal. 2550 BP (cal. 600 BC)	-27.2
SAN235E	234-235	Beta-139810	Sedimento orgánico	Lavado ácido	2360+/-40 BP	2465-2330 BP (515-380 BC)	cal. 2400 BP (cal. 450 BC)	-26.8
SAN270W	269-270	Beta-149115	Sedimento orgánico	Lavado ácido	1190+/-40 BP	1230-1210 BP (720-740 AD) 1190-990 BP (760-960 AD)	cal. 1100 BP (cal. 850 AD)	-26.8
SAN434	111-112	Beta-155934	Macrofósil (madera)	acid/alkali/acid	2460+/-40 BP	2730-2360 BP (780-410 BC)	cal. 2545 BP (cal. 595 BC)	-27.7
SAN434	244-245	Beta-152848	Sedimento orgánico	Lavado ácido	4610+/-80 BP	5580-5520 BP (3630-3570 BC) 5480-5040 BP (3540-3090 BC)	cal. 5280 BP (cal. 3330 BC)	-26.1
SAN42	41-42	Beta-124315	Sedimento orgánico	Lavado ácido	1290+/-50 BP	1295-1075 BP (655-875 AD)	cal. 1185 BP (cal. 765 AD)	-26.4

Tabla 14.1. Dataciones absolutas mediante ^{14}C obtenidas en las secuencias sedimentarias del Lago de Sanabria. Errores referenciados a 2 Sigma.

14.1.2. Tasas de sedimentación y modelos cronoestratigráficos.

Las dataciones absolutas han facilitado la deducción de las tasas de sedimentación en las secuencias sedimentarias, y la determinación de sus respectivos modelos cronoestratigráficos. En la descripción de las tasas obtenidas se especifica la potencia de sedimento considerada, así como el intervalo temporal representado. El límite superior de las secuencias está determinado por el contacto del evento catastrófico de 1959 AD. La tasa de sedimentación ha sido calculada, pues, considerando el intervalo temporal entre el resultado de la datación y este horizonte de 1959 AD.

14.1.2.1. Testigo SAN135E.

La base del testigo SAN135E (entre 133-134 cm) ha sido datada en cal. 1600-1415 BP (cal. 350-535 AD) (Beta-139809, 2 Sigma). Valor medio: cal. 1510 BP (cal. 440 AD). Potencia de sedimento: 108 cm. 1959 AD situado a: 26 cm de profundidad. Intervalo temporal: 1519 años. Tasa de sedimentación: 0.71 mm/año. La situación de la muestra se ilustra en la Fig. 14.1. El modelo cronoestratigráfico para la secuencia sedimentaria se muestra en la Fig. 14.2.

14.1.2.2. Testigo SAN235E.

Se han efectuado 3 dataciones de radiocarbono, distribuidas a lo largo de toda la secuencia sedimentaria. Los resultados han suministrado unas edades muy similares entre sí. Las muestras están distribuidas en las siguientes profundidades: 79-80 cm, 159-160 cm, y 234-235 cm. La Fig. 14.3 ilustra la situación de las muestras.

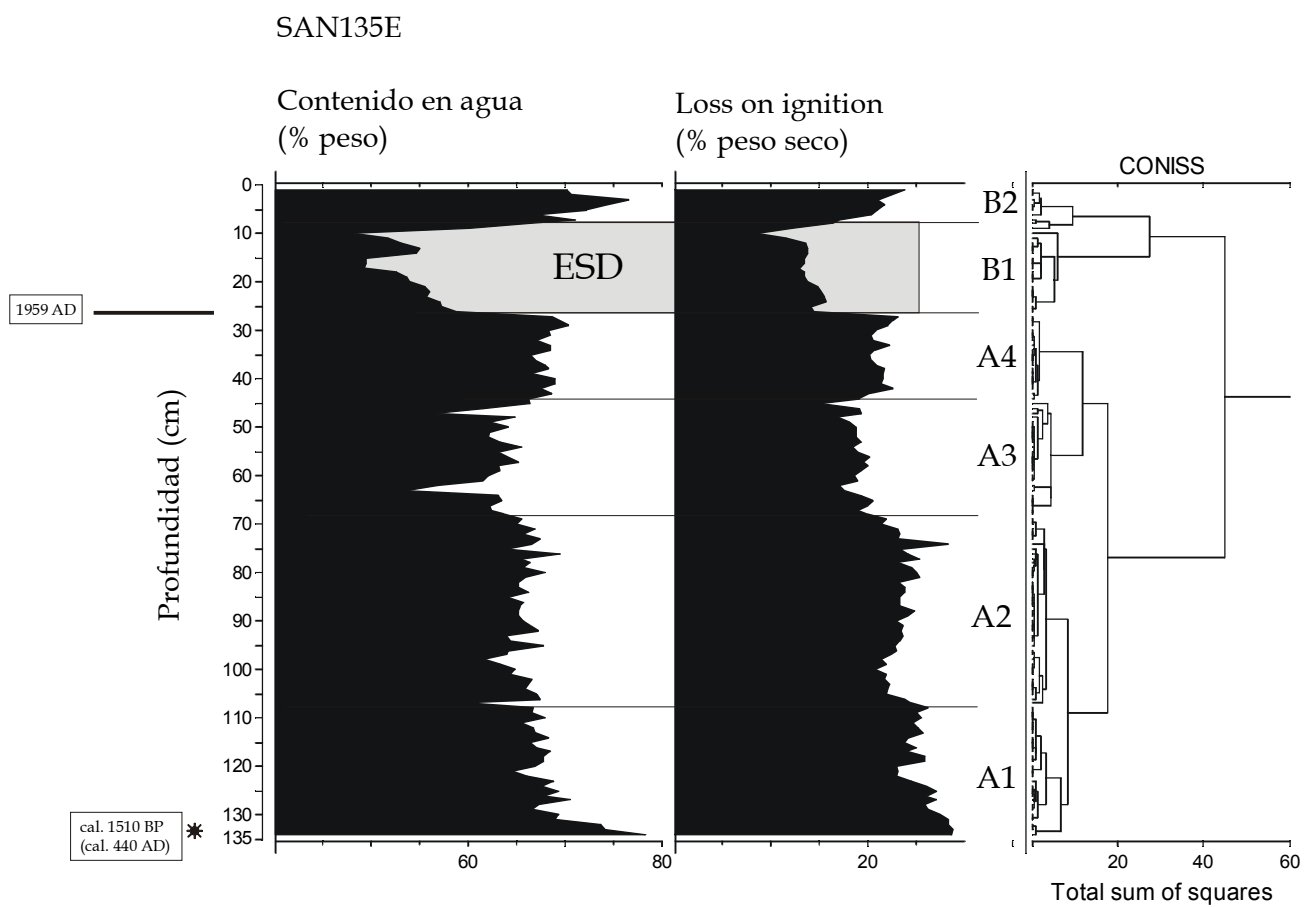


Fig. 14.1. Situación de la datación realizada mediante Carbono-14 en el testigo SAN135E. La base del Episodio Sedimentario Detrítico (ESD) constituye el 1959 AD (edad del evento catastrófico).

SAN135E

Tasa de sedimentación= 0.71 mm/año

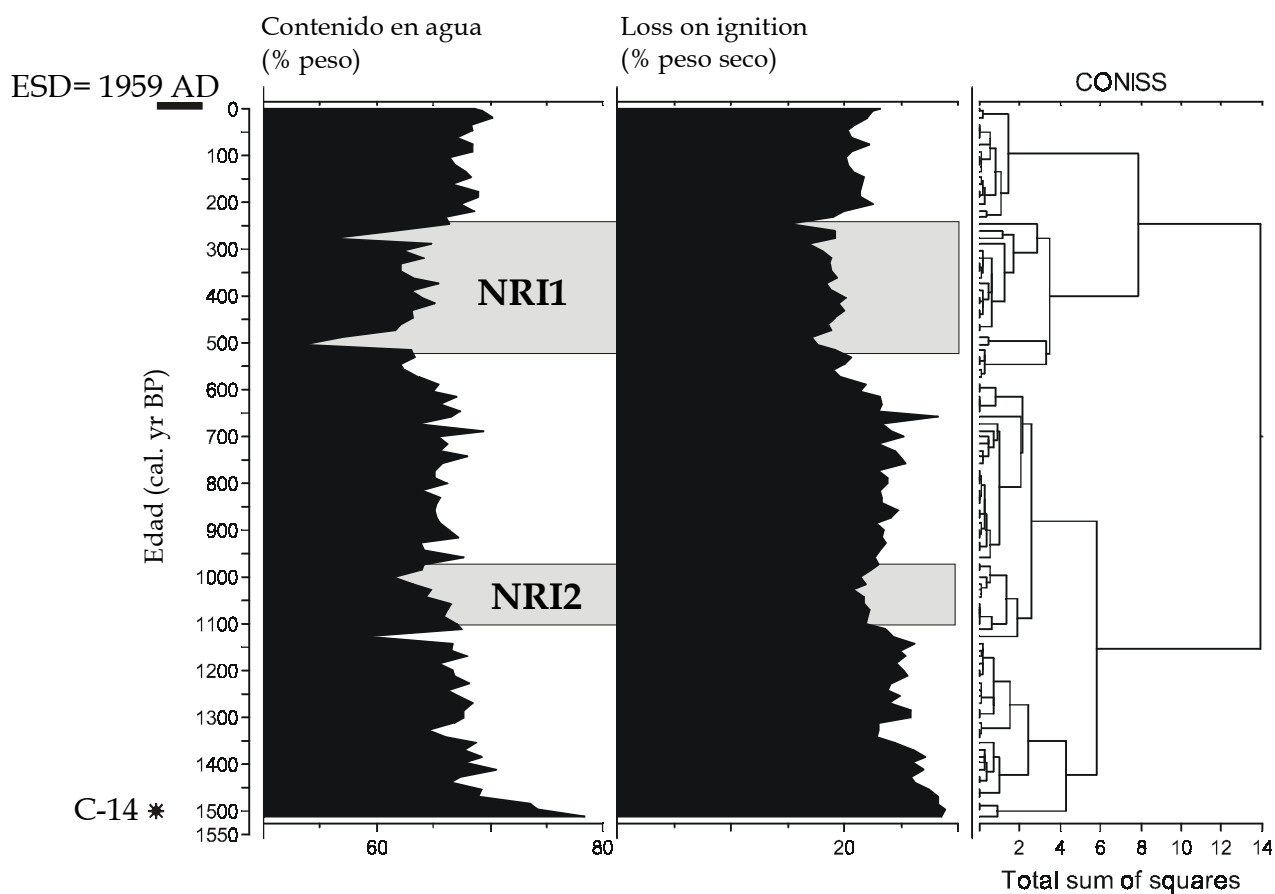


Fig. 14.2. Modelo cronoestratigráfico del testigo SAN135E (Cubeta E). El límite superior está representado por el Episodio Sedimentario Detrítico (ESD), correspondiente a 1959 AD.

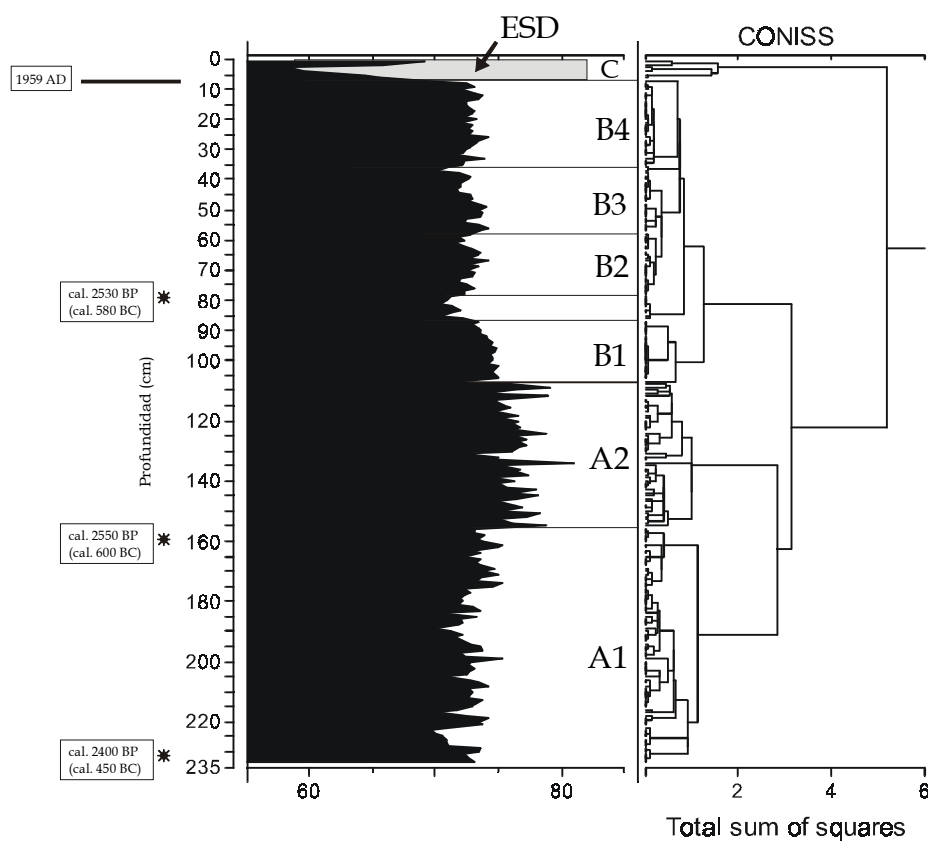


Fig. 14.3. Situación de las dataciones realizadas mediante Carbono-14 en el testigo SAN235E (Cubeta E). La base del Episodio Sedimentario Detrítico (ESD) constituye el 1959 AD (edad del evento catastrófico).

Muestra 79-80. Ha sido datada en cal. 2720-2340 BP (cal. 770-390 BC) (Beta-149113, 2 Sigma). Valor medio: cal. 2530 BP (cal. 580 BC). Potencia de sedimento: 73 cm. 1959 AD situado a: 7 cm de profundidad. Intervalo temporal: 2539 años. Tasa de sedimentación: 0.29 mm/año.

Muestra 159-160. Ha sido datada en cal. 2740-2360 BP (cal. 790-410 BC) (Beta-149114, 2 Sigma). Valor medio: cal. 2550 BP (cal. 600 BC). Potencia de sedimento: 153 cm. 1959 AD situado a: 7 cm de profundidad. Intervalo temporal: 2559 años. Tasa de sedimentación: 0.60 mm/año.

Muestra 234-235. Ha sido datada en cal. 2465-2330 BP (cal. 515-380 BC) (Beta-139810, 2 Sigma). Valor medio: cal. 2400 BP (cal. 450 BC). Potencia de sedimento: 228 cm. 1959 AD situado: 7 cm de profundidad. Intervalo temporal: 2409 años. Tasa de sedimentación: 0.95 mm/año.

Resulta difícil establecer un modelo cronoestratigráfico del testigo SAN235E en base a los tres resultados obtenidos. Por una parte, las dataciones llegan a evidenciar presuntos cambios muy bruscos en la tasa de sedimentación, como se deduce de los resultados de las muestras situadas a 79-80 y 159-160 cm de profundidad. Así, entre la muestra 79-80 y el horizonte de 1959 AD se deduce una tasa de sedimentación muy baja (0.29 mm/año), mientras que entre las muestras 79-80 y 159-160 las edades obtenidas son prácticamente contemporáneas. Por otra parte, se evidencia una inversión cronológica: las muestras 79-80 y 159-160 son ligeramente más antiguas que la muestra basal (234-235 cm).

Teniendo en cuenta los criterios de correlación entre SAN235E y el resto de testigos de la cuenca (ya sea mediante criterios estratigráficos como cronológicos), se ha establecido un modelo cronoestratigráfico considerando únicamente la datación de la muestra basal (Beta-139810), por aportar la opción más compatible con el resto de resultados (**Fig. 14.4**). Las muestras 79-80 y 159-160 han podido sufrir algún tipo de contaminación que ha causado un ‘envejecimiento’ de la edad.

14.1.2.3. Testigo SAN270W.

La base del testigo SAN270W (entre 269-270 cm) ha sido datada en cal. 1230-1210 BP y cal. 1190-990 BP (cal. 720-740 AD y cal. 760-960 AD) (Beta-149115, 2 Sigma). Valor medio: cal. 1100 BP (cal. 850 AD). Potencia de sedimento: 223 cm. 1959 AD situado a: 47 cm de profundidad. Intervalo temporal: 1109 años. Tasa de sedimentación: 2.01 mm/año. La situación de la muestra se representa en la **Fig. 14.5**. El modelo cronoestratigráfico para la secuencia sedimentaria se muestra en la **Fig. 14.6**.

14.1.2.4. Testigo SAN434.

Se han efectuado 2 dataciones, distribuidas en las siguientes profundidades: 111-112 cm, y 244-245 cm. La muestra 111-112 ha sido analizada sobre restos de microfósiles, concretamente fragmentos de madera de tamaño centimétrico.

Muestra 111-112. Ha sido datada en cal. 2730-2360 BP (cal. 780-410 BC) (Beta-155934, 2 Sigma). Valor medio: cal. 2545 BP (cal. 595 BC). Potencia de sedimento: 105 cm. 1959 AD situado a: 5 cm de profundidad. Intervalo temporal: 2554 años. Tasa de sedimentación: 0.41 mm/año.

SAN235E

Tasa de sedimentación= 0.95 mm/año

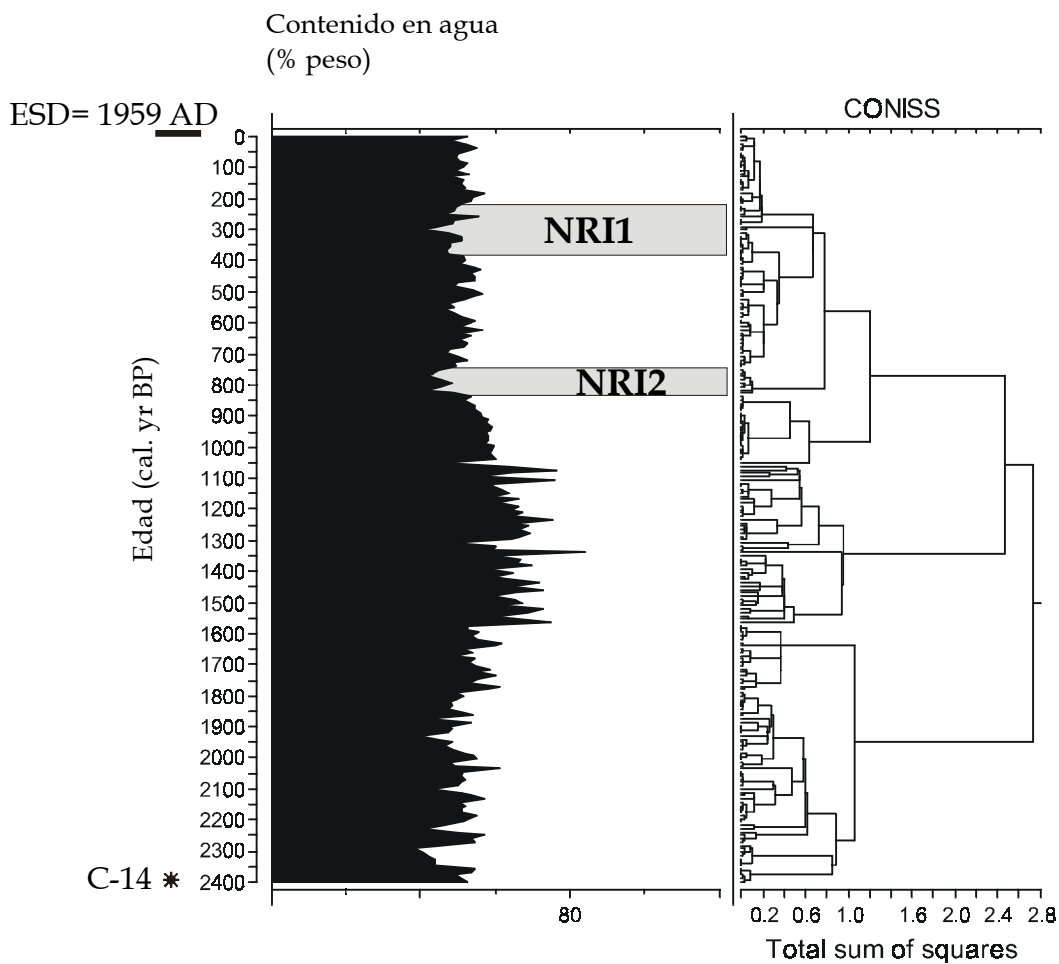


Fig. 14.4. Modelo cronoestratigráfico del testigo SAN235E (Cubeta E). El límite superior está representado por el Episodio Sedimentario Detrítico (ESD), correspondiente a 1959 AD.

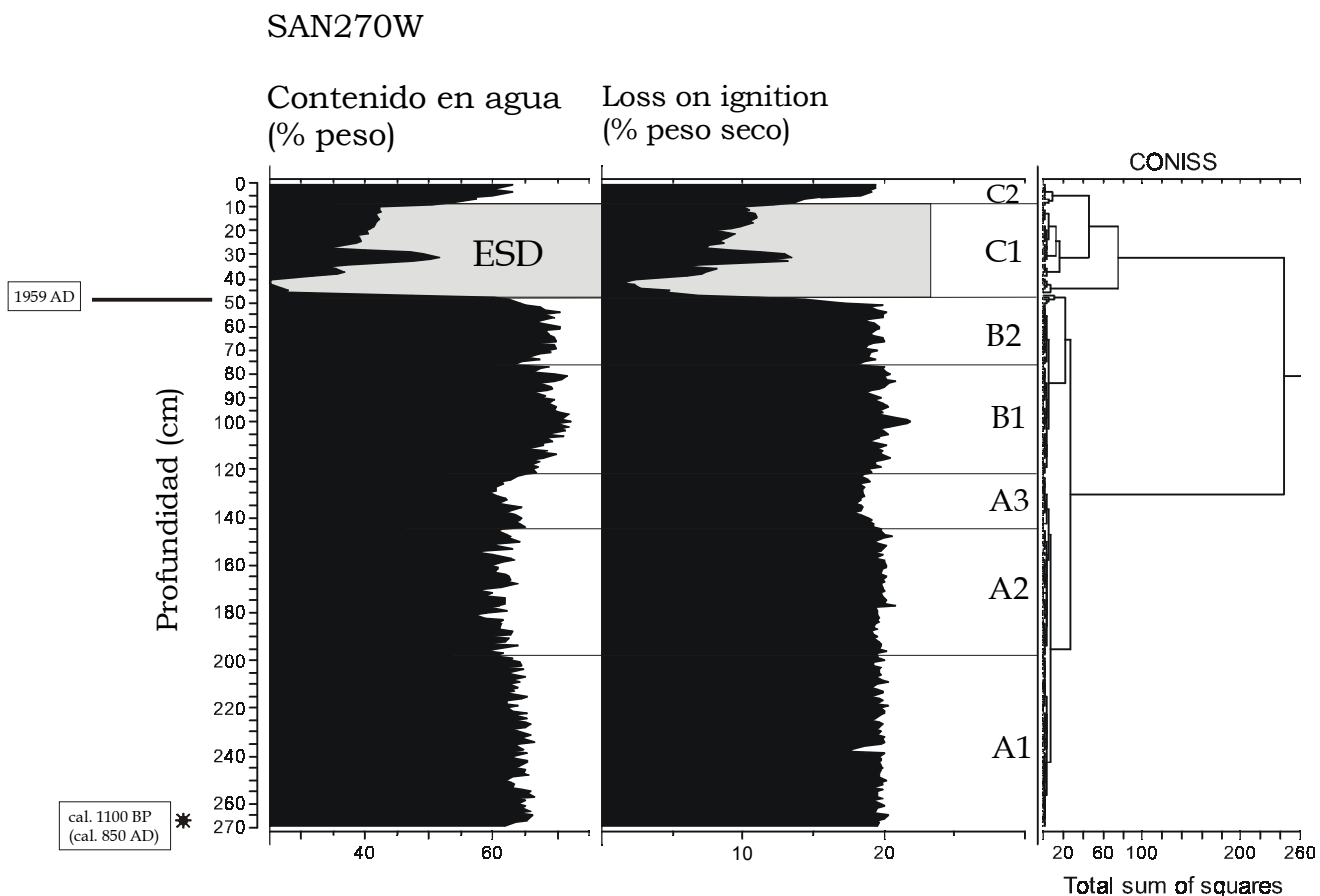


Fig. 14.5. Situación de la datación realizada mediante Carbono-14 en el testigo SAN270W (Cubeta W). La base del Episodio Sedimentario Detrítico (ESD) constituye el 1959 AD (edad del evento catastrófico).

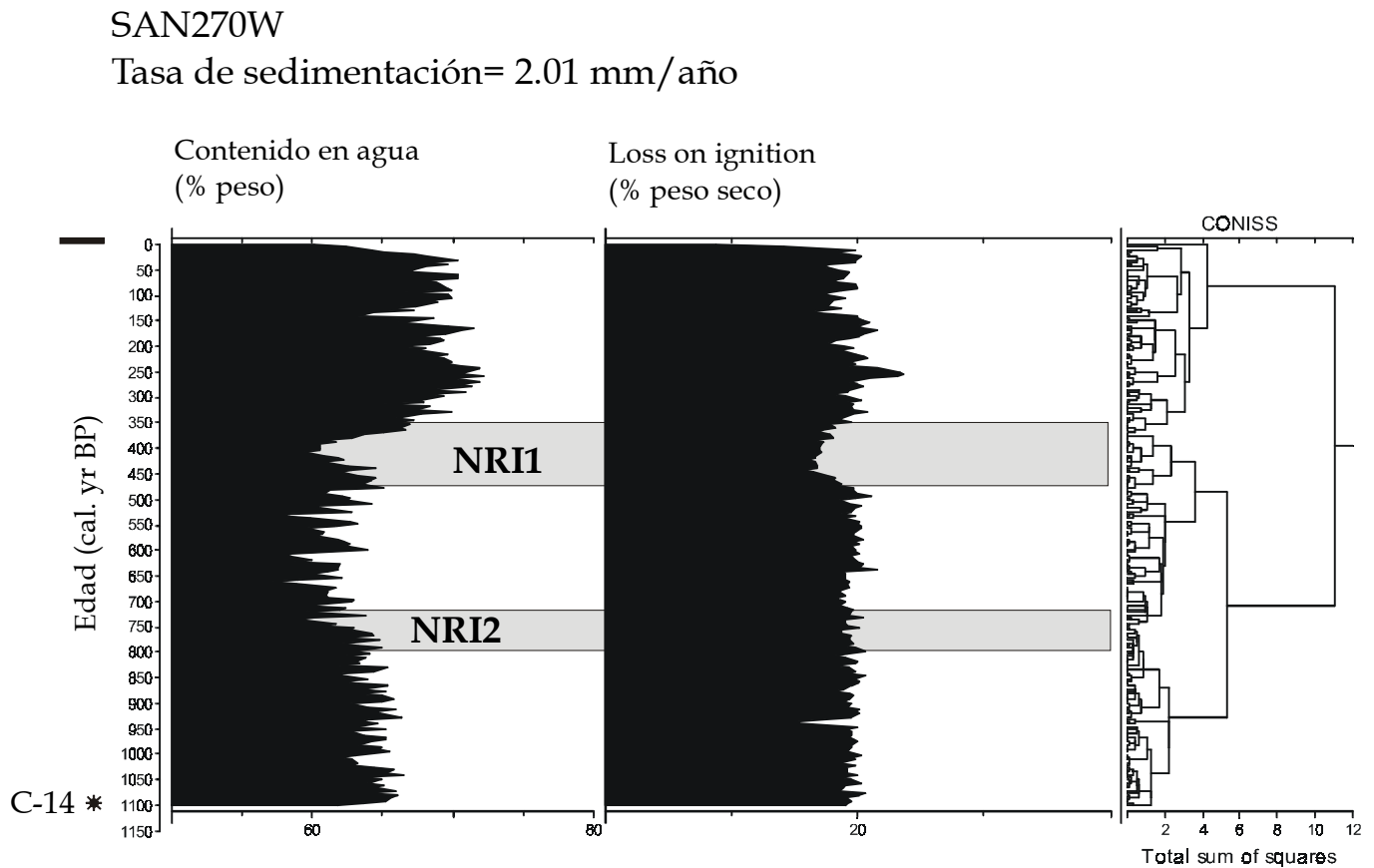


Fig. 14.6. Modelo cronoestratigráfico del testigo SAN270W (Cubeta W). El límite superior está representado por el Episodio Sedimentario Detrítico (ESD), correspondiente a 1959 AD.

Muestra 244-245. Ha sido datada en cal. 5580-5520 BP y cal. 5480-5040 BP (cal. 3630-3570 BC y cal. 3540-3090 BC) (Beta-152848, 2 Sigma). Valor medio: cal. 5280 BP (cal. 3330 BC). Potencia de sedimento: 240 cm. 1959 AD situado a: 5 cm de profundidad. Intervalo temporal: 5289 años. Tasa de sedimentación: 0.45 mm/año. La Fig. 14.7 muestra la situación de las dataciones. El modelo cronoestratigráfico se representa en la Fig. 14.8. De estos datos se deduce una tasa de sedimentación de 0.48 mm/año para el intervalo considerado entre el nivel de fragmentos de madera y la muestra 244-245.

En el modelo se ha suprimido el intervalo sedimentario constituido por fragmentos de madera, situado entre 110-115 cm de profundidad, por considerarse un intervalo acumulado de forma instantánea por procesos tractivos. Estos procesos han aportado material detrítico alóctono procedente de la cuenca.

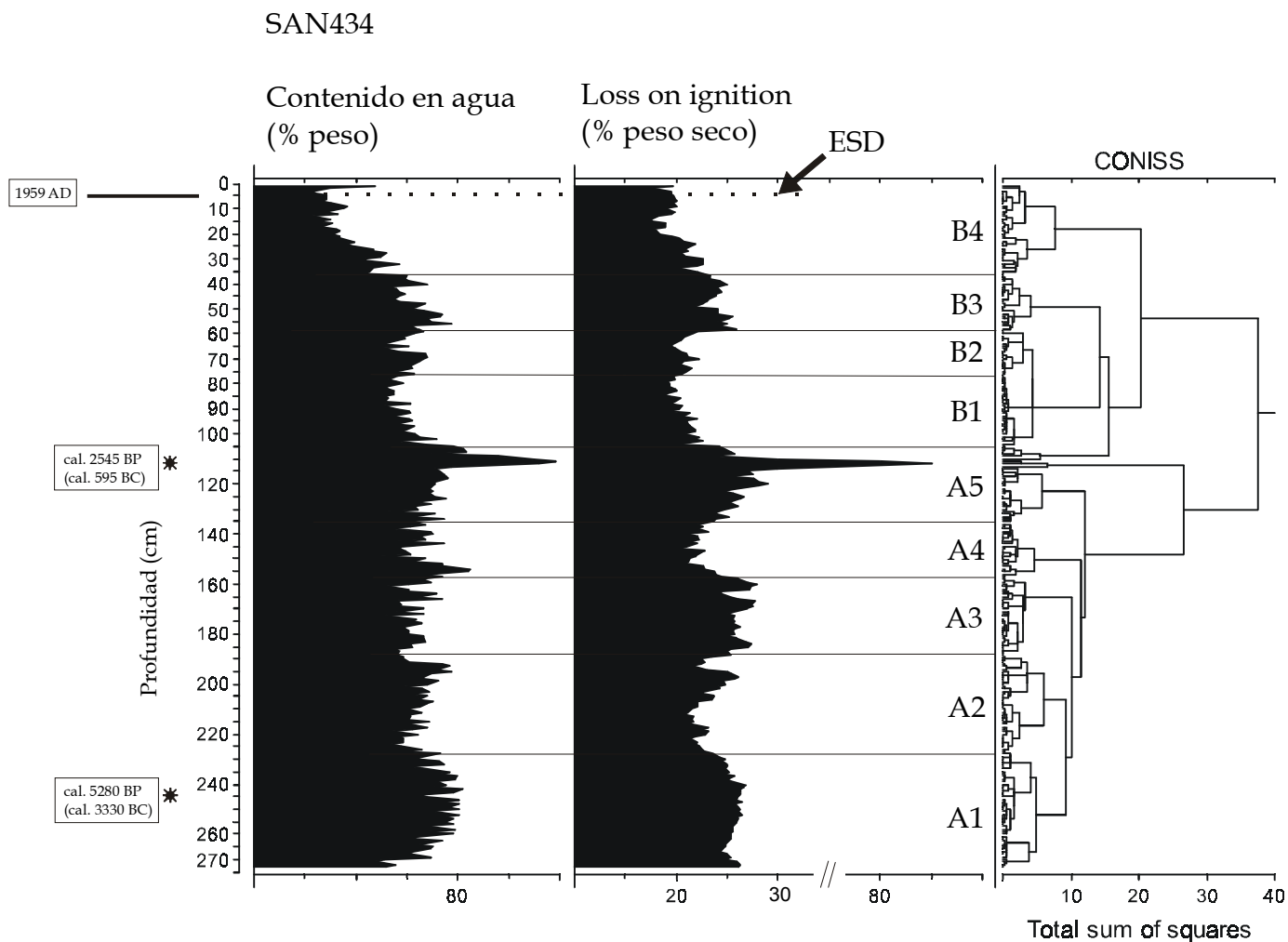


Fig. 14.7. Situación de las dataciones mediante Carbono-14 en el testigo SAN434. En 5 cm de profundidad se encuentra la base del Episodio Sedimentario Detrítico (ESD), representando el 1959 AD.

SAN434

Tasa de sedimentación= 0.45 mm/año

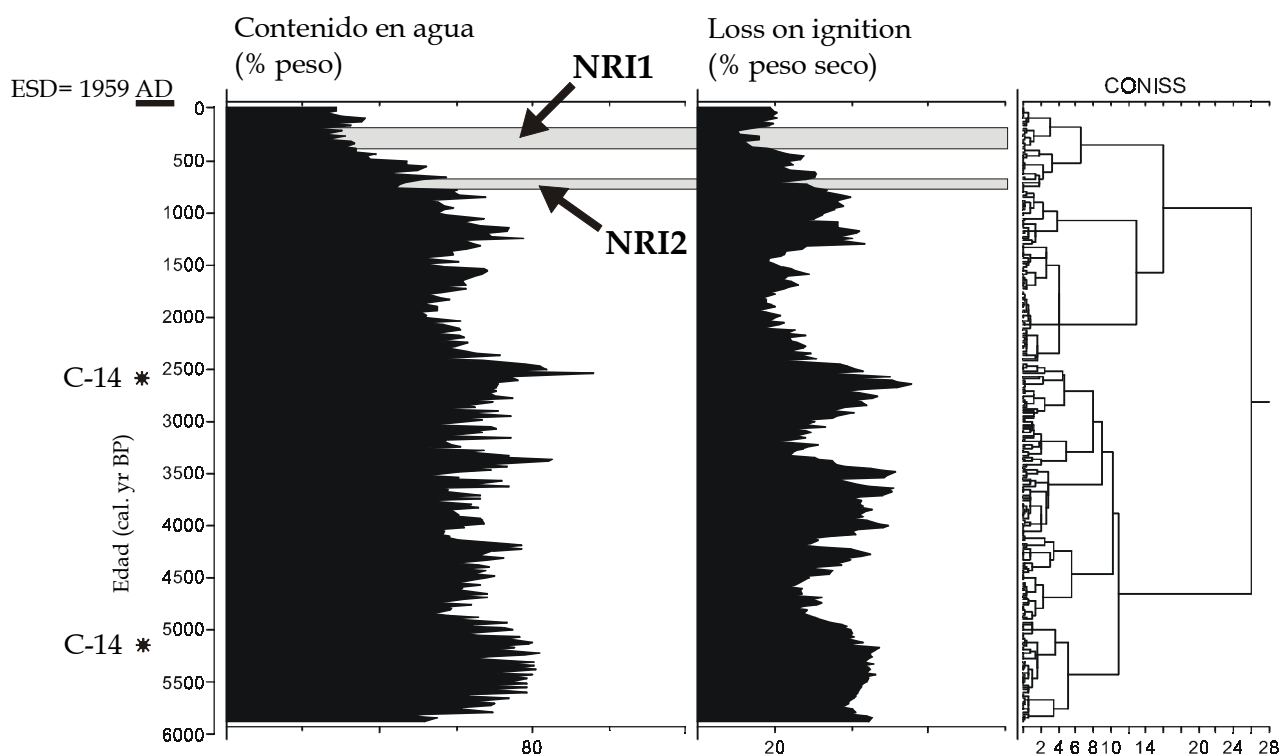


Fig. 14.8. Modelo cronoestratigráfico del testigo SAN434 (plataforma distal). El límite superior está representado por el sedimento contemporáneo y posterior al Episodio Sedimentario Detrítico (ESD), correspondiente a 1959 AD. El nivel sedimentario constituido por fragmentos de madera, situado entre 110-115 cm, ha sido suprimido.

14.1.2.5. Testigo SAN42.

La base del testigo SAN42 (entre 41-42 cm) ha sido datada en cal. 1295-1075 BP (cal. 655-875 AD) (Beta-124315, 2 Sigma). Valor medio: cal. 1185 BP (cal. 765 AD). Potencia de sedimento: 34.5 cm. 1959 AD situado a: 7.5 cm. Intervalo temporal: 1194 años. Tasa de sedimentación: 0.29 mm/año. Las **Fig. 14.9** y **14.10** muestran los modelos cronoestratigráficos de la secuencia sedimentaria.

El testigo SAN42 ha sido utilizado para datar las secuencias sedimentarias obtenidas mediante la técnica de gravedad (*gravity coring*). De esta forma, el modelo cronoestratigráfico del testigo SAN38E, extraído mediante la técnica de gravedad, ha sido determinado extrapolando los datos cronológicos de SAN42. Ambos testigos han sido extraídos en la misma cubeta sedimentaria (Cubeta E) y prácticamente en la misma localización geográfica. El modelo cronoestratigráfico de SAN38E puede ser deducido asumiendo cambios paralelos en la tasa de sedimentación de ambos testigos. SAN42 y SAN38E están bien correlacionados por la presencia de un horizonte milimétrico de tonalidad clara detectado en ambas secuencias.

La baja tasa de sedimentación (0.29 mm/año) deducida para la cubeta oriental, mediante los testigos SAN38E y SAN42, debe justificarse al efecto de acortamiento de la secuencia sedimentaria provocado durante el proceso de extracción por la técnica de gravedad (*gravity coring*). Este acortamiento queda patente en la reducción de potencia experimentada por el Episodio Sedimentario Detrítico (ESD): en SAN135E presenta una potencia de 19 cm, mientras que en SAN38E es de tan sólo 7 cm.

La **Tabla 14.2** muestra las tasas de sedimentación deducidas a partir de las dataciones de Carbono-14, así como las relaciones entre tasas de sedimentación de cada uno de los ambientes lacustres.

	Cubeta Occidental SAN270W	Cubeta Oriental SAN135E	Cubeta Oriental SAN235E	Plataforma distal SAN434
Tasa de sedimentación (mm/año)	2.0	0.7	0.9	0.45
CW/CE	2.5			
CW/PD	4.4			
CE/PD	1.8			

Tabla 14.2. Tasas de sedimentación de los diferentes testigos, deducidas a partir de las dataciones de ^{14}C . Se muestran los cocientes de tasas de sedimentación entre cada uno de los ambientes lacustres (CW/CE, CW/PD, y CE/PD). CW/CE: cociente de tasas de sedimentación entre la Cubeta W y la Cubeta E. CW/PD: cociente de tasas de sedimentación entre la Cubeta W y la Plataforma Distal. CE/PD: cociente de tasas de sedimentación entre la Cubeta E y la Plataforma Distal.

En la cubeta occidental (SAN270W), situada en un ambiente proximal, la tasa de sedimentación ha sido establecida en 2 mm/año. La acumulación de sedimento en la cubeta occidental es 2.5 veces mayor respecto la cubeta oriental, y 4.4 veces mayor respecto la plataforma distal (**Tabla 14.2**). En la cubeta oriental (SAN135E y SAN235E),

la tasa de sedimentación ha sido establecida entre 0.7-0.9 mm/año, con lo que la acumulación de sedimento es de aproximadamente 1.8 veces mayor que en la plataforma distal. La tasa de sedimentación en la plataforma distal es de 0.45 mm/año.

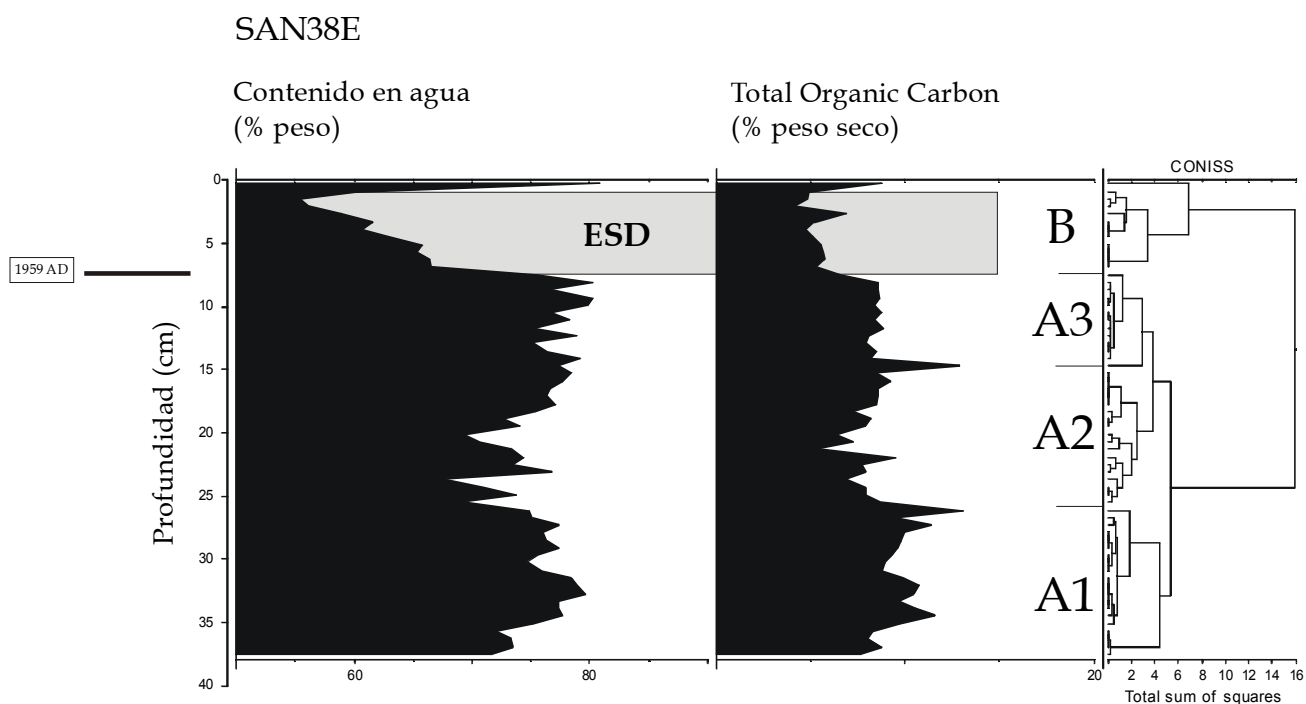


Fig. 14.9. Situación de la base del Episodio Sedimentario Detrítico (ESD), determinando el horizonte asociado a 1959 AD (edad del evento catastrófico).

SAN38E

Tasa de sedimentación: 0.29 mm/año

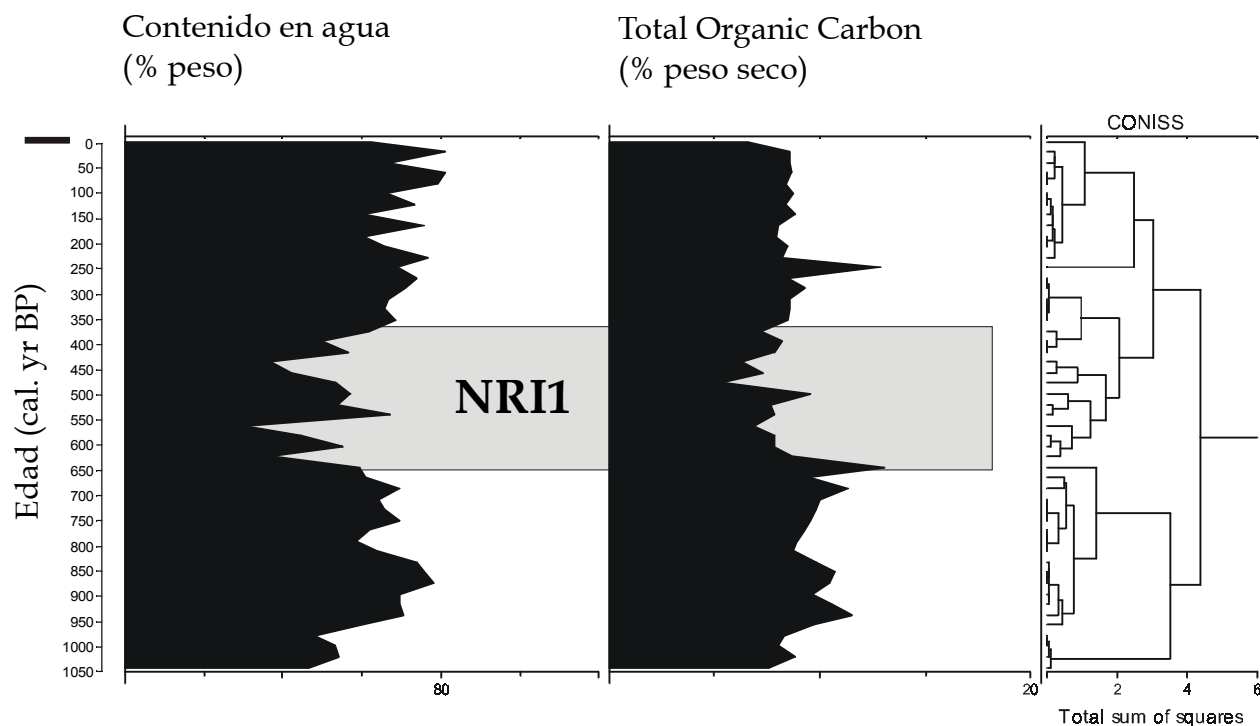


Fig. 14.10. Modelo cronoestratigráfico del testigo SAN38E (Cubeta E). El límite superior está representado por el Episodio Sedimentario Detrítico (ESD), correspondiente a 1959 AD. El modelo de SAN38E ha sido establecido extrapolando los datos cronológicos de C-14 del testigo SAN42. SAN38E y SAN42 han sido extraídos mediante la técnica de gravedad ('gravity coring').

14.2. Correlación general de los testigos sedimentarios del Lago de Sanabria.

Las dataciones mediante ^{14}C han permitido determinar un modelo cronoestratigráfico para los testigos sedimentarios del Lago de Sanabria. De esta forma, se ha establecido una correlación estratigráfica en función de las líneas isócronas de cada testigo (Fig. 14.11 y 14.12).

Los modelos y la correlación cronoestratigráfica evidencian la existencia de diferentes tasas de sedimentación en función del ambiente sedimentario del lago. El relleno de sedimento presenta potencias máximas en el depocentro cercano a la entrada del río Tera (testigo SAN270W). En ambientes más distales, situados en la cubeta oriental y plataforma distal, las tasas de sedimentación son más pequeñas, siendo más elevada en la cubeta oriental (testigos SAN135E y SAN235E) que en la plataforma distal (testigo SAN434).

El evento catastrófico de 1959 AD ha sido considerado, tal como se efectuó en el apartado anterior, como nivel de referencia para correlacionar los testigos sedimentarios. La correlación ha sido realizada en función de los modelos cronológicos de cada testigo, y en función de la presencia de los Niveles de Ruptura Inorgánica (NRI) descritos en el apartado anterior. La consideración de ambos criterios, el cronológico y el estratigráfico, ha permitido establecer la correlación cronoestratigráfica presentada en las Fig. 14.11 y 14.12. Los NRI detectados en la cuenca deposicional del lago (NRI1 y NRI2) marcan las principales líneas isócronas determinadas en el modelo cronoestratigráfico.

14.2.1. Marco cronológico de NRI1 y NRI2.

Los resultados obtenidos sitúan al horizonte NRI1 entre las isócronas cal. 450 BP (límite inferior) y cal. 250 BP (límite superior). El horizonte NRI2 está situado entre cal. 800 BP (límite inferior) y cal. 700 BP (límite superior) (Fig. 14.11 y 14.12).

14.2.1.1. Horizonte NRI1.

En todos los testigos sedimentarios este horizonte está asociado a las isócronas comprendidas entre cal. 450 BP y cal. 250 BP. A continuación, se describe brevemente las posiciones cronológicas del nivel NRI1 en cada una de las secuencias.

- SAN135E: situado entre cal. 500 BP y cal. 250 BP (Fig. 14.2).
- SAN235E: situado entre cal. 400 BP y cal. 200 BP (Fig. 14.4).
- SAN270W: situado entre cal. 450 BP y cal. 300 BP (Fig. 14.6).
- SAN434: situado entre cal. 450 BP y cal. 200 BP (Fig. 14.8).
- SAN38E: situado entre cal. 350 BP y cal. 650 BP (Fig. 14.10).

14.2.1.2. Horizonte NRI2.

El nivel NRI2 está asociado a las isócronas cal. 800 BP y cal. 700 BP. La secuencia SAN135E presenta pequeños problemas para ajustarse a estas isócronas. Las posiciones cronológicas de este nivel en cada testigo se describen a continuación.

- SAN135E: situado entre cal. 1100 BP y cal. 950 BP (Fig. 14.2).
- SAN235E: situado entre cal. 850 BP y cal. 700 BP (Fig. 14.4).
- SAN270W: situado entre cal. 800 BP y cal. 700 BP (Fig. 14.6).
- SAN434: situado entre cal. 800 BP y cal. 700 BP (Fig. 14.8).
- SAN38E: este nivel no se detecta con claridad en SAN38E

14.2.2. Marco cronológico general de los testigos sedimentarios.

La correlación cronoestratigráfica ha determinado tasas de sedimentación muy diferentes en función del ambiente sedimentario lacustre, evidenciando tasas máximas en la cubeta occidental (2 mm/año) y tasas mínimas en la plataforma distal (0.45 mm/año).

14.2.2.1. Plataforma distal (testigo SAN434).

La secuencia temporal más larga obtenida en esta Tesis corresponde al testigo SAN434, cuya edad máxima alcanza prácticamente la edad de cal. 6000 BP (Fig. 14.8). La baja tasa de sedimentación existente en la plataforma distal facilita la obtención de un intervalo temporal más grande.

Contenido en agua

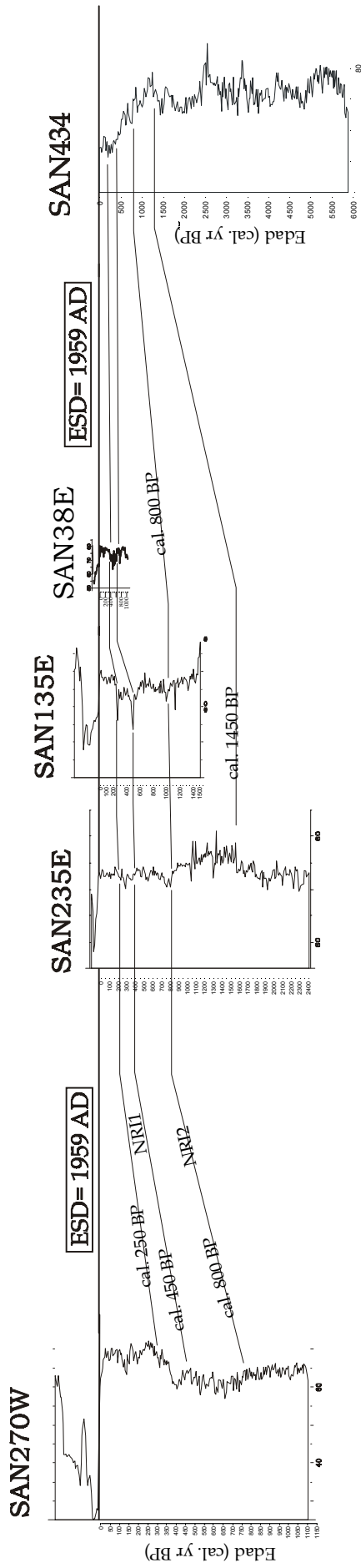


Fig. 14.11. Modelo cronoestratigráfico de los testigos sedimentarios del Lago de Sanabria: contenido en agua. ESD= Episodio Sedimentario Detrítico (perteneciente al evento catastrófico de 1959 AD).

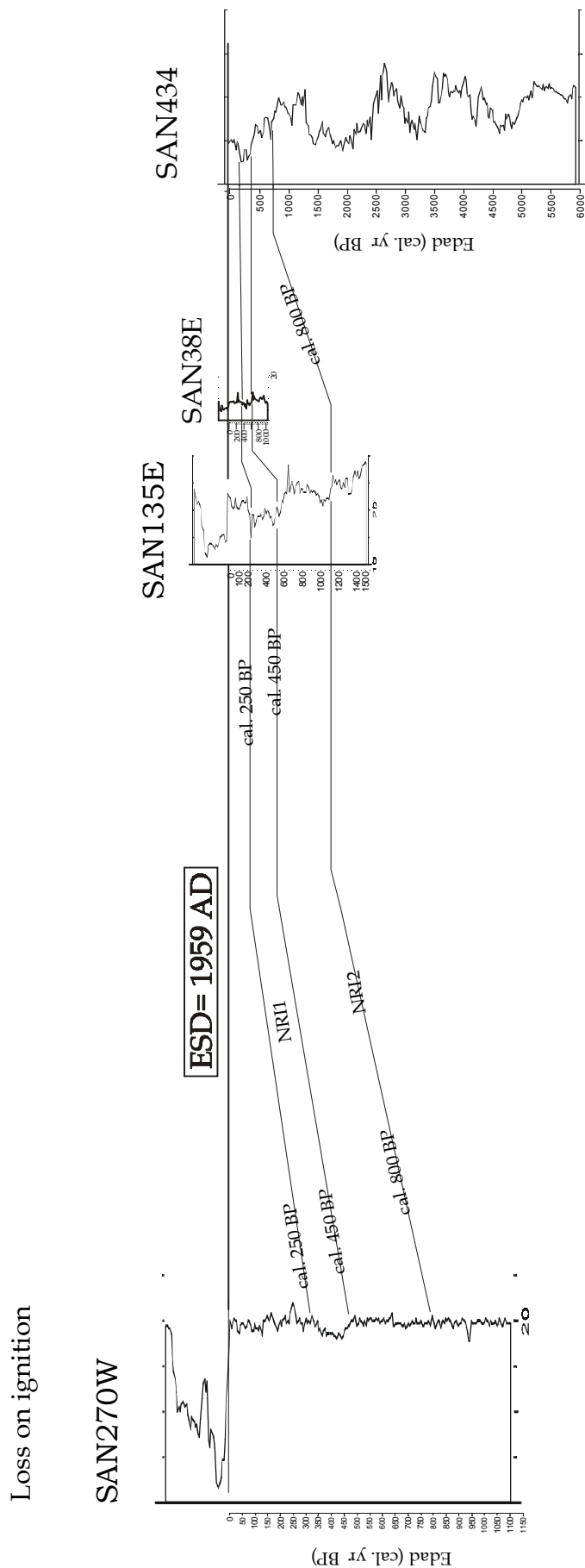


Fig. 14.12. Modelo cronestratigráfico de los testigos sedimentarios del Lago de Sanabria: Loss on ignition (a excepción de SAN38E, en la que ha sido representado el Total Organic Carbon). ESD= Episodio Sedimentario Detrítico (pertenece al evento catastrófico de 1959 AD).

El testigo SAN434 evidencia la existencia de 4 ciclos de orden mayor en los valores de materia orgánica, presentando una amplitud de, aproximadamente, 1500 años cada uno (**Fig. 14.8**). Estos ciclos están situados en las siguientes posiciones cronológicas:

- Ciclo 4: situado entre 273-212 cm (potencia: 61 cm). Tiene una edad de cal. 6000-4600 BP (duración: 1.400 años).
- Ciclo 3: situado entre 212-146 cm (potencia: 66 cm). Representa una edad de cal. 4600-3200 BP (duración: 1.400 años).
- Ciclo 2: situado entre 146-84 cm (potencia: 63 cm). Tiene una edad de cal. 3200-1900 BP (duración: 1.300 años).
- Ciclo 1: situado entre 84-15 cm (potencia: 69 cm). Representa una edad de cal. 1900-250 BP (duración: 1.650 años). La finalización de este ciclo está determinada por la existencia del horizonte NRI1, cuyas isócronas están establecidas en esta secuencia en cal. 450-200 BP (**Fig. 14.8, 14.11 y 14.12**). Además de NRI1, en este ciclo se detectan los horizontes NRI2, NRIa y NRIb (ver apartado anterior), los cuales determinan la presencia de unos ciclos de segundo orden de amplitud más corta (ciclos de 300 años).

La correlación cronoestratigráfica evidencia la presencia de buena parte del ciclo 1 (cal. 1900-250 BP) en los testigos de las cubetas occidental y oriental, registrándose completamente en la cubeta oriental (SAN235E) (**Fig. 14.11**). La mayor tasa de sedimentación existente en la cubeta occidental impide detectar completamente el ciclo 1 (SAN270W). El ciclo 2 (cal. 3200-1900 BP) está registrado parcialmente en la cubeta oriental (SAN235E). Los ciclos 3 y 4 no son alcanzados por ninguna de las secuencias sedimentarias de las cubetas (SAN135E, SAN235E, SAN270W, SAN38E) (**Fig. 14.11 y 14.12**).

El análisis Cluster muestra la existencia, en el testigo SAN434, de dos grandes grupos bien definidos: por una parte, un intervalo inferior comprendido entre cal. 6000 BP y cal. 2500 BP, y por otra, un intervalo superior comprendido entre cal. 2500 BP y cal. 0 BP (**Fig. 14.8**). Este intervalo superior (cal. 2500-0 BP), comienza con un tramo de facies bandeadas (facies FI). La base está delimitada por un nivel milimétrico de tonalidad clara, seguido por un conjunto de bandas claras repartidas en un tramo situado entre cal. 2500-2000 BP (104-86 cm de profundidad). El nivel de fragmentos de madera, situado entre 110-115 cm de profundidad, constituye aproximadamente el cambio de cal. 2500 BP (edad: cal. 2545 BP).

14.2.2.2. Cubetas occidental y oriental.

El ambiente sedimentario de las cubetas del lago implica una tasa de sedimentación relativamente elevada en comparación con la plataforma distal. En consecuencia, los testigos SAN270W, SAN135E, SAN235E y SAN38E representan una ventana temporal mucho más corta que la existente en el testigo SAN434 (**Fig. 14.11 y 14.12**). Los testigos de las cubetas, por tanto, registran unas condiciones paleoambientales mucho más recientes que las detectadas en la plataforma distal, de forma que pertenecen al intervalo temporal asociado al ciclo 1 de materia orgánica de SAN434.

La isócrona de cal. 1450 BP determina, aproximadamente, el comienzo de valores elevados en el contenido en agua y materia orgánica, tanto en la cubeta oriental (SAN235E) como en la plataforma distal (SAN434) (**Fig. 14.11**). A partir de esta isócrona, se establece un intervalo temporal, entre cal. 1450 BP y cal. 800 BP, donde se registran elevados contenidos en agua y materia orgánica. En todos los testigos

sedimentarios se registra, en cal. 800 BP, una disminución significativa del contenido en agua y materia orgánica, posición donde ha sido descrito el horizonte NRI2.

El ciclo 1 de materia orgánica finaliza con el horizonte NRI1 (cal. 450-250 BP). Este nivel evidencia disminuciones importantes en el contenido en materia orgánica, manifestadas claramente en la plataforma distal y en las cubetas occidental y oriental (**Fig. 14.11 y 14.12**).

14.3. Definición de los ciclos de 1.500 años en el LOI del sedimento del Lago de Sanabria.

La determinación del LOI en el sedimento del Lago de Sanabria (testigo SAN434; situado en la plataforma distal) ha evidenciado la existencia de grandes oscilaciones en el contenido en materia orgánica. Así, en los últimos 6.000 años del relleno sedimentario del lago, el contenido en materia orgánica presenta 4 grandes oscilaciones de amplitudes similares. Cada oscilación en el contenido en materia orgánica representa una ventana temporal de, aproximadamente, 1.500 años.

La **Fig. 14.13** muestra la definición de estas oscilaciones de 1.500 años. Cada oscilación ha sido denominada mediante el término 'Ciclo'. La ordenación de los ciclos ha sido realizada desde más moderno hasta más antiguo; así, el ciclo más moderno es el 1, y el más antiguo es el 4. Los límites de cada ciclo han sido establecidos considerando los puntos mínimos de los valores del LOI. Los límites de cada uno de los ciclos en materia orgánica son los siguientes: a) Ciclo 4: situado entre cal. 6000-4600 yr BP, b) Ciclo 3: situado entre cal. 4600-3200 yr BP, c) Ciclo 2: situado entre cal. 3200-1900 yr BP, y d) Ciclo 1: situado entre cal. 1900-250 yr BP.

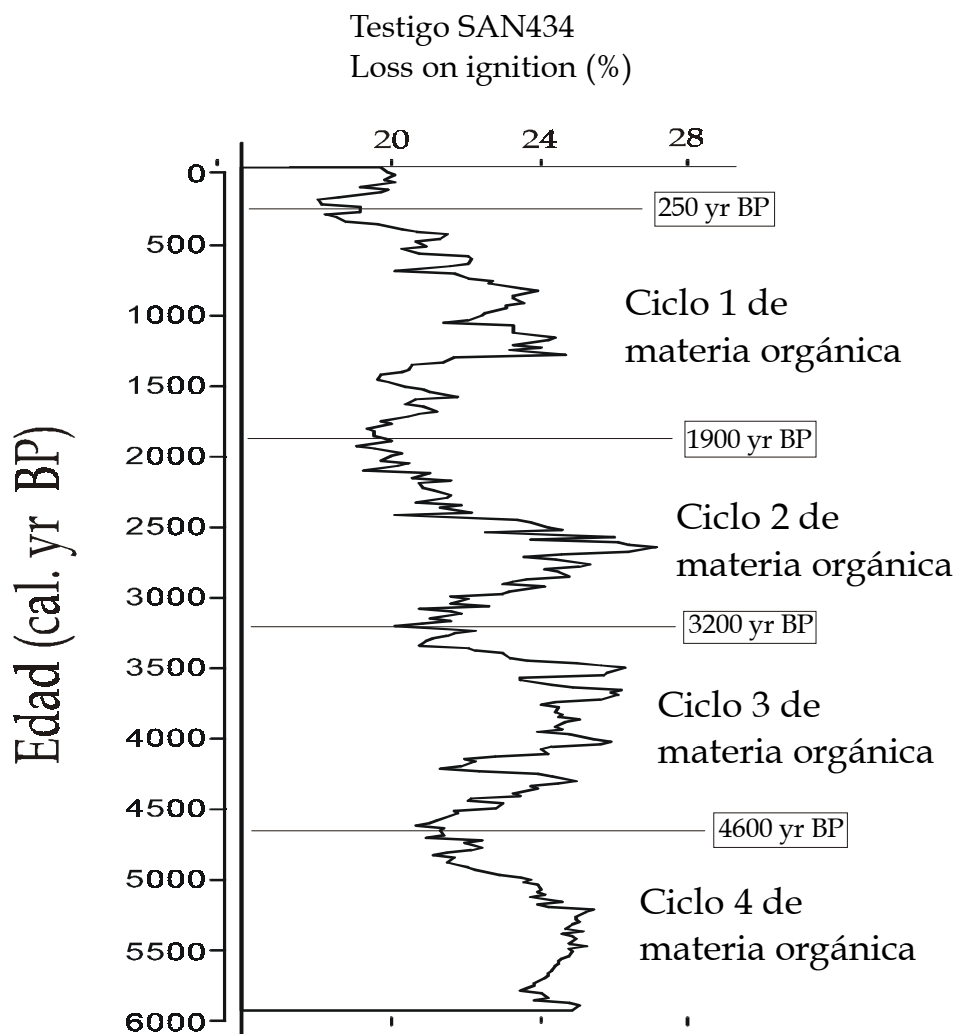


Fig. 14.13. Definición de los ciclos de 1.500 años en el LOI del sedimento del Lago de Sanabria.

Subcapítulo 15. DATACIÓN RADIOMÉTRICA DEL SEDIMENTO DEL LAGO DE SANABRIA MEDIANTE Pb-210 y Cs-137.

La datación de los sedimentos lacustres constituye la pieza clave de todo estudio paleolimnológico. Así, debe permitir ofrecer la edad absoluta y la tasa de sedimentación del sistema deposicional. Numerosos estudios en paleolimnología centran su objetivo en la caracterización paleoambiental del registro sedimentario depositado en los últimos centenares de años. El estudio paleolimnológico de estos sedimentos actuales permite determinar las tasas de sedimentación más recientes, y situar en el tiempo posibles impactos humanos sobre el ecosistema lacustre (Oldfield & Appleby, 1984).

15.1. Datación del sedimento actual mediante Pb-210 y Cs-137.

La técnica más utilizada para determinar un marco geocronológico en los sedimentos lacustres actuales es la utilización del radioisótopo natural Pb-210 y el radioisótopo artificial Cs-137 (Goldberg, 1963; Krishnaswami *et.al.*, 1971; Krishnaswami and Lal, 1978; Robbins, 1978; Appleby *et.al.*, 1979; Appleby and Oldfield, 1983; Oldfield and Appleby, 1984; Appleby and Oldfield, 1992).

15.1.1. Datación radiométrica mediante Pb-210.

El Pb-210 es un isótopo radiactivo perteneciente a la serie de desintegración radiactiva del U-238, cuyos productos de desintegración incluye el Ra-226, el Rn-222, el Pb-210, el Bi-210, y como producto final el isótopo estable Pb-206 (**Fig. 15.1**). El Pb-210 es un isótopo natural inestable con una vida media de 22.26 años. Esta vida media, relativamente corta, permite su utilización en la determinación de la edad absoluta de registros sedimentarios que abarcan, aproximadamente, los últimos 100-150 años.

Numerosos estudios se basan en la utilización del Pb-210 para establecer la historia sedimentaria reciente de ambientes lacustres, estuarinos y costeros (Koide *et.al.*, 1972; Koide *et.al.*, 1973; Pennington *et.al.*, 1973; Robbins and Edgington, 1975; Armentano and Woodwell, 1975; Bruland *et.al.*, 1975; Robbins *et.al.*, 1977; Robbins *et.al.*, 1978; Appleby *et.al.*, 1979; Nittrover *et al*, 1979; Evans *et.al.*, 1981; Battarbee *et.al.*, 1985). La vida media de este radioisótopo, así como su ciclo biogeoquímico en la naturaleza, ha demostrado la importancia del Pb-210 como un indicador cronológico y ambiental (Jaworowski, 1966; Appleby and Oldfield, 1978). Más recientemente, diversos estudios centran su atención en el aspecto metodológico de la utilización del Pb-210 en sedimentos lacustres (Gunten and Moser, 1993; Rowan *et al*, 1995; Pinglot and Pourchet, 1995).

El método se basa en la determinación de la actividad del Pb-210 atmosférico (Pb-210 *unsupported*) presente en los sedimentos. Dentro de la serie de desintegración del U-238 se encuentra el Ra-226 ($t_{1/2} = 1602$ años), que se desintegra para generar el gas noble Rn-222 ($t_{1/2} = 3.83$ días). El Rn-222 se difunde a la atmósfera con una tasa constante de aproximadamente $42 \text{ átomos min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, y posteriormente se desintegra a través de varios productos de corta vida media hasta generarse el Pb-210. Este Pb-210

atmosférico vuelve a la litosfera durante precipitaciones o deposición seca, teniendo un tiempo de residencia en la atmósfera de unos 5-10 días (Benninger *et.al.*, 1975; Krishnaswami and Lal, 1978).

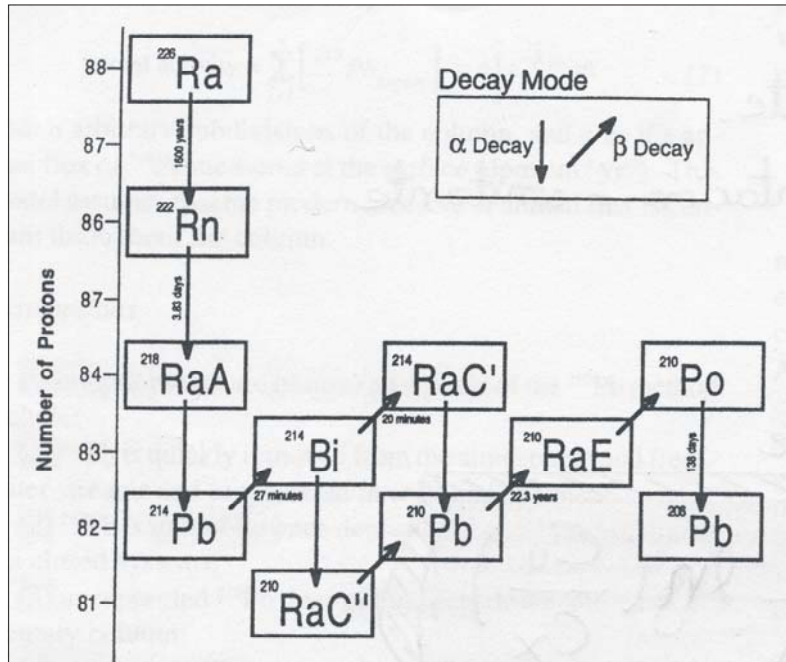


Fig. 15.1. Última mitad de la serie de desintegración del U-238, utilizada en la geocronología del Pb-210. Mediante todo un conjunto de desintegraciones alpha y beta, el Ra-226 se desintegra en diversos radionucleidos de corta vida media, para finalizar con el isótopo estable Pb-206. Cuatro de estos productos de desintegración presentan una vida media muy corta, y son referenciados como: RaA (Po-218), RaC'(Po-214), RaC''(Ti-210), y RaE (Bi-210). El Ra-226 se produce mediante la siguiente serie general de desintegración: U-238 \rightarrow U-234 \rightarrow Th-230 \rightarrow Ra-226. (extraído de Stratton Noller, 2000).

Por consiguiente, existe un exceso de Pb-210 que no se encuentra en equilibrio con el Ra-226, que ha sido generado en la atmósfera e incorporado rápidamente a los sedimentos. Existen, pues, dos orígenes diferentes relacionados con la actividad de Pb-210 presente en los sedimentos.

1. El primero, representa el Pb-210 asociado a los valores de fondo (*background*) del sistema litosférico. Este Pb-210 *in situ* se considera está en equilibrio con la desintegración del Ra-226, recibiendo el nombre de *supported Pb-210*. Su actividad en el sedimento está controlada principalmente por la mineralogía del substrato rocoso.
2. La segunda componente representa el Pb-210 de origen atmosférico, como resultado de la desintegración del gas Rn-222. Este Pb-210 no está en equilibrio con el Ra-226, con lo que recibe el nombre de *unsupported Pb-210*. La posterior incorporación del Pb-210 al sedimento provoca un 'exceso' de este radioisótopo en relación a los valores constantes del Pb-210 *in situ*, con lo que frecuentemente se le asocia el término de *excess Pb-210*

(Pb-210 en exceso). La datación mediante Pb-210 se establece a partir de los valores de la actividad del *unsupported* Pb-210 en función de la profundidad. La actividad presenta unos valores decrecientes en profundidad, de acuerdo con la desintegración radiactiva del Pb-210.

Las diversas vías de acceso de Pb-210 al sedimento lacustre se ilustra en la Fig. 15.2. Las diferentes componentes son:

- A) Aporte erosivo particulado de Ra-226. El Pb-210 formado por la desintegración *in situ* del Ra-226 se denomina *supported* Pb-210.
- B) Aporte atmosférico directo (*unsupported* Pb-210). Una fracción de los átomos de Rn-222, formados por desintegración de Ra-226 en la litosfera, escapan a través de los intersticios del suelo hacia la atmósfera. La desintegración del Rn-222 en la atmósfera produce el Pb-210, el cual será devuelto a la litosfera mediante deposición seca o precipitación húmeda. El Pb-210 que se deposita directamente en el lago será absorbido por las partículas sedimentarias y depositado en el fondo del lago.
- C) Aporte atmosférico indirecto. El Pb-210 atmosférico alcanza el sedimento del lago a través de la cuenca de drenaje.
- D) Desintegración de Rn-222 en la columna de agua.

La principal fuente de Pb-210 en exceso es el aporte atmosférico directo (componente B). La determinación de la actividad del Pb-210 de origen atmosférico en el sedimento permite establecer la tasa de sedimentación reciente y la obtención de un marco cronoestratigráfico para el relleno sedimentario de los últimos 100-150 años.

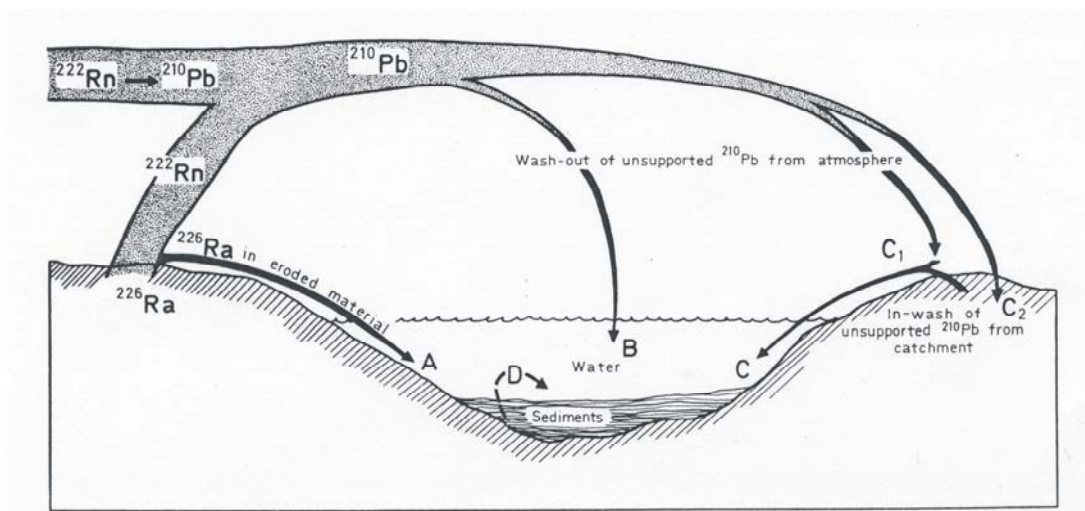


Fig. 15.2. Diferentes fuentes por las cuales el Pb-210 puede alcanzar el relleno sedimentario de un sistema lacustre. El aporte atmosférico directo (componente B) es el principal aporte de Pb-210 'unsupported' (en exceso) (extraído de Oldfield & Appleby, 1984).

15.1.2. Datación radiométrica mediante Cs-137.

El Cs-137 ($t_{1/2} = 30.2$ años) es un radionucleido artificial difundido en la atmósfera a través de ensayos nucleares. Los picos de actividad existentes en un perfil sedimentario representan niveles guía artificiales, asociados al periodo de máximo *input* atmosférico de Cs-137 durante estos ensayos. Los ensayos comenzaron a realizarse a mediados de la década de los 40, y presentan un máximo de actividad nuclear en el año 1963. Varios autores han estudiado este aspecto en diversos sistemas lacustres (Pennington *et al*, 1973; Robbins and Edgington, 1975; Robbins *et al*, 1977; Robbins *et al*, 1978). Más recientemente, el accidente de Chernobyl, ocurrido en 1986, produjo un segundo *input* atmosférico de Cs-137 detectable en muestras ambientales (Pourchet *et al*, 1986; Mélières *et al*, 1988; Pourchet *et al*, 1988; Appleby *et al*, 1993).

Los picos de máxima actividad de Cs-137, en el registro sedimentario, están asociados a estos periodos de la historia de gran introducción de Cs-137 al sistema natural; su presencia indica una edad posterior a la década de los 40. Su localización en el registro sedimentario permite deducir la tasa de sedimentación existente.

15.1.3. Posibles procesos de movilización del Pb-210 y Cs-137 en el sedimento lacustre.

En el cálculo de la edad del sedimento mediante Pb-210 y Cs-137 se asume la ausencia de movilidad de estos radioisótopos en el perfil sedimentario. Algunos procesos químicos y físicos pueden modificar la deposición inicial de estos radionucleidos. Los procesos son:

Procesos químicos: el Pb-210, una vez depositado, puede ser afectado por diagénesis temprana, principalmente por procesos redox (Koide *et al*, 1973; Gambrell *et al*, 1976). Diversos estudios han evidenciado la posibilidad de existencia de movilidad post-deposicional de Pb-210, asociado al ciclo del Fe-Mn en la interfaz agua-sedimento (Benoit and Hemond, 1990; Benoit and Hemond, 1991). Aunque el Pb-210 es relativamente inmóvil, detallados análisis geoquímicos sobre relaciones isotópicas de Pb aportan importante información relacionada con la posible removilización de Pb-210 bajo fuertes gradientes redox.

Procesos físicos: el perfil deposicional inicial de los radioisótopos puede ser modificado por flujos acuosos turbulentos y por bioturbación, provocando una mezcla del sedimento (Robbins *et al*, 1977; Robbins *et al*, 1978; Benninger *et al*, 1979; Nittrouer *et al*, 1984; Mélières *et al*, 1988; Pourchet and Pinglot; 1989). Los flujos acuosos, tales como los *flash floods*, mezclan el sedimento y originan una dilución de las actividades de Pb-210 y Cs-137 (Appleby *et al*, 1995).

La detección de anomalías en los perfiles de actividad permite identificar factores externos que originaron movilización redox o mezcla de sedimento.

15.2. Técnica analítica: espectrometría gamma.

Las actividades de Pb-210 y Cs-137 del sedimento del Lago de Sanabria fueron determinadas mediante espectrometría gamma. Esta técnica se basa en la identificación de energías gamma asociadas a un isótopo radiactivo determinado. La radiación electromagnética es analizada para identificar y cuantificar los diferentes radionucleidos (Gilmore and Hemingway, 1995). Diversos estudios han plasmado la

aplicabilidad de esta técnica en la datación radiométrica de muestras ambientales (Gaggeler *et al*, 1976; Schery, 1980; Appleby *et al*, 1986; Appleby *et al*, 1988).

El cálculo de la actividad de los radionucleidos, en espectrometría gamma, se realiza según la expresión:

$$\text{Actividad} = (\text{integral} - \text{background}) / (t \times M \times E \times Q) \quad (1)$$

donde;

(Integral - background) = área neta del pico (*Region of Interest (ROI)*) de un radionucleido determinado (cuentas/s)

t = tiempo de contaje de la muestra (s)

M = masa de la muestra (Kg)

E = eficiencia

Q = *quantum yield*

15.2.1. Detectores en espectrometría gamma.

La desintegración radioactiva es un cambio espontáneo del núcleo de un átomo inestable, produciéndose la emisión de partículas (emisión *alpha* y *beta*) o radiación electromagnética (emisión *gamma*). Dentro del amplio espectro de radiaciones electromagnéticas, los rayos gamma se caracterizan por situarse en el espectro de alta energía y longitudes de onda cortas. La radiación gamma emitida presenta una energía muy bien definida que es característica de cada radionucleido.

Con el fin de caracterizar esta radiación gamma y, por tanto, el radionucleido que está presente en una muestra ambiental, se utiliza un material semiconductor como detector. La interacción de la radiación gamma con el semiconductor produce todo un conjunto de procesos físicos, que son transformados en señal eléctrica por un equipo de espectrometría gamma (Gilmore and Hemingway, 1995). De gran importancia reviste la naturaleza y calidad del detector, ya que de ello dependerá la obtención de una mejor o peor señal eléctrica. Se evitará, por ejemplo, que la estructura cristalina del semiconductor tenga impurezas o que existan defectos estructurales en el cristal.

Considerando las características arriba mencionadas, los detectores candidatos a ser utilizados en espectrometría gamma son los siguientes: Si, Ge, CdTe, HgI₂, GaAs, Bi₂S₃, PbI₂, GaSe, AlSb y CdSe. Debido a su alto número atómico, el Ge es el detector más utilizado, ya que permite la detección de radiaciones gamma de mayor energía. Durante los últimos años, en respuesta a la demanda de este tipo de detector, la tecnología para fabricar germanio de alta pureza (*High Purity Germanium*, detectores *HPGe*) ha mejorado sustancialmente. Los primeros detectores de germanio se caracterizaban por tener un tamaño de pocos cm³ y por presentar Litio (detectores *Ge(Li)*), con una resolución de 4-5 keV a 1332 keV. Los detectores más modernos y avanzados tienen un tamaño de unos centenares de cm³ de germanio hiperpuro, ofreciendo una resolución de unos 1.8 keV.

Los detectores *Ge(Li)* presentan Li en la estructura cristalina del Germanio. La presencia de este elemento responde a la antigua ausencia de grandes cristales de

germanio puro durante los inicios de la espectroscopía. La movilidad del Li en la estructura cristalina del Ge es elevada bajo condiciones de temperatura ambiente, por lo que se produce una migración dentro del cristal y la consiguiente destrucción del balance de impurezas del Ge. Por esta razón, los detectores de Ge(Li) deben de mantenerse a temperatura muy baja (temperatura del Nitrógeno líquido ($t^a = -198^{\circ}\text{C}$)).

15.2.2. El sistema electrónico general.

Las señales de *output* que llegan de un detector constituyen, en esencia, una cantidad de carga eléctrica proporcional a la energía de rayos-gamma absorbida por el detector. El objetivo del sistema electrónico es recoger esa carga, determinar la cantidad y almacenar la información generada. Los pulsos electrónicos generados por el detector serán tratados convenientemente por el sistema electrónico con el fin de obtener una señal eléctrica libre de cualquier influencia externa o ruido de fondo.

Un sistema electrónico de espectrometría de rayos-gamma consta de los siguientes componentes:

- Detector: constituye el cristal de germanio, ya sea de Ge(Li) o HPGe.
- Preamplificador: su función es recoger la carga creada en el detector por la interacción con la radiación gamma. Aporta una alta impedancia al detector y una baja impedancia al amplificador.
- Amplificador: su función es realizar todo un conjunto de filtrados electrónicos, que consisten en mejorar la forma del pulso (eliminación de 'ruido').
- MCA (*Multichannel analyser*): su función es ordenar y clasificar todo el conjunto de pulsos electrónicos que salen del amplificador, según la altura del pulso. La altura del pulso es proporcional a la energía gamma depositada en el detector, y es ordenada en canales. El MCA genera una relación del número de cuentas detectadas en cada canal, originando de esta forma un histograma. El tratamiento estadístico del histograma permitirá determinar de forma cualitativa y cuantitativa la presencia y abundancia de radionucleidos en una muestra ambiental.

15.3. Datación radiométrica mediante Pb-210.

El perfil de actividad de Pb-210 permite calcular la edad del sedimento usando principalmente dos modelos: a) el modelo CIC (*Constant Initial Concentration*), y b) el modelo CRS (*Constant Rate of Supply*).

Ambos modelos presuponen las siguientes premisas:

1. Existe un flujo constante de Pb-210 atmosférico hacia el sistema lacustre.
2. El Pb-210 atmosférico no presenta movilidad post-deposicional dentro del sedimento.
3. No existe pérdida de Pb-210 desde el sedimento hacia el agua del lago. Los sedimentos lacustres son considerados como un sistema cerrado con respecto al sedimento y los flujos de Pb-210.
4. La concentración de Pb-210 disuelto en las aguas de los lagos y estuarios es prácticamente cero (Benninger *et.al.*, 1975; Benninger, 1978). El Pb-210 tiene un tiempo de residencia corto en relación al tiempo de residencia del agua del lago, de tal forma que el Pb-210 atmosférico que alcanza la columna de agua es transferido rápidamente al sedimento.

Modelo CIC.

La tasa de sedimentación establecida en el sedimento del Lago de Sanabria ha sido obtenida mediante la utilización del modelo CIC.

Este modelo fue desarrollado en un principio por Goldberg (1963) para realizar dataciones de agua marina, agua de ríos y muestras glaciares, pero fue aplicado por primera vez en sedimentos lacustres por Krishnaswami *et.al.* (1971). El modelo CIC permite calcular la edad del sedimento asumiendo una concentración constante de *unsupported Pb-210* en la interfaz agua-sedimento, es decir, inicialmente todas las muestras de sedimento tienen la misma actividad de *unsupported Pb-210* durante, al menos, los últimos 100-150 años. Teniendo en consideración que se asume un flujo constante de Pb-210 atmosférico al sistema lacustre, el modelo CIC no considera una tasa de sedimentación variable. Cuando la tasa de sedimentación y la actividad de Pb-210 son constantes en el tiempo (modelo *Constant Initial Concentration*) (Robbins and Edgington, 1975; Matsumoto, 1975), se observa un decrecimiento exponencial en la concentración del Pb-210 en exceso como resultado de su desintegración natural. Si la actividad del Pb-210 atmosférico es representada en una escala logarítmica en función de la profundidad, el perfil resultante será lineal con una pendiente proporcional a la tasa de sedimentación (Shuka and Joshi, 1989). El Pb-210 atmosférico decae exponencialmente con una edad según la ley de desintegración radiactiva:

$$A = A(0) e^{-kt} \quad (2)$$

donde:

A = actividad de *unsupported Pb-210* en cada profundidad.

A(0) = actividad de *unsupported Pb-210* en la interfaz agua-sedimento (actividad inicial).

k = constante de semi-desintegración del Pb-210 (0.03114 años⁻¹).

t = tiempo

A y A(0) son obtenidos directamente a partir de las mediciones de Pb-210.

De esta forma, la edad (t) de cada nivel sedimentario puede ser calculada de la siguiente manera:

$$t(z) = (1/k) * (\ln(A(0)/A)) \quad (3)$$

donde;

t(z) = edad en la profundidad z

k = constante de semi-desintegración del Pb-210 (0.03114 años⁻¹).

A(0) = actividad inicial de *unsupported Pb-210* por unidad de masa.

A = actividad de *unsupported Pb-210* por unidad de masa en la profundidad z

Modelo CRS.

Este modelo fue originalmente propuesto por Goldberg (1963) y desarrollado con más detalle por Appleby and Oldfield (1978). El modelo asume una tasa de aporte constante de Pb-210 al sedimento, independientemente de la existencia de cambios en la tasa de sedimentación. El modelo CRS calcula edades a partir de la actividad total de

unsupported Pb-210 en la columna de sedimento. La edad del sedimento en cada profundidad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$t(z) = (1/k) * (\log(A(0)/A_z)) \quad (4)$$

donde;

$t(z)$ = edad del sedimento en la profundidad z

k = constante de semi-desintegración del Pb-210 (0.03114 años⁻¹)

$A(0)$ = *unsupported Pb-210* total en la columna de sedimento

A_z = *unsupported Pb-210* en la columna de sedimento por debajo de la profundidad z

A_z y $A(0)$ son calculados por integración numérica del perfil de Pb-210

15.4. Análisis radiométrico del sedimento del Lago de Sanabria.

Las dataciones radiométricas mediante Pb-210 y Cs-137 fueron realizadas en los testigos sedimentarios SAN135E (Cubeta E), SAN270W (Cubeta W), y SAN434 (plataforma distal). Las muestras de sedimento fueron analizadas en el *Department of Experimental Physics (University College Dublin, Ireland)*. Todas las muestras fueron secadas en una estufa a 60 °C durante 72 h, hasta que perdieron su contenido en agua. Una vez secadas, las muestras fueron molidas y homogeneizadas mediante el uso de un mortero de Ágata. Finalmente, entre 4-6 g de sedimento fueron introducidos en una cápsula cilíndrica de plástico de 5 ml de volumen, de geometría bien determinada, y depositada posteriormente en un detector de pozo (*well-detector*). El detector utilizado fue un cristal de Germanio puro, de bajo *background*. El espectro de radiación gamma fue tratado utilizando el *software* informático GeniePC (Canberra Industries, copyright 1996).

15.4.1. El espectro analizado.

Los principales canales analizados fueron:

1. Pb-210, a 46.52 KeV
2. Cs-137, a 661.66 KeV
3. Pb-214, a 295.21 KeV y 351.92 KeV
4. Bi-214, a 609.3 KeV

La actividad del *unsupported Pb-210* en el sedimento fue determinada mediante la siguiente sustracción:

$$\textit{unsupported Pb-210} = \text{Pb-210}_{\text{total}} - \textit{supported Pb-210}$$

El *supported Pb-210* fue deducido a partir de la actividad del Pb-214 ($t_{1/2} = 26.8$ min.) y del Bi-214 (19.7 min.), asumiendo un equilibrio secular entre los dos radionucleidos y el *supported Pb-210*. El $\text{Pb-210}_{\text{total}}$ se obtiene directamente mediante el espectrograma.

15.5. Resultados de los perfiles de Pb-210 y Cs-137 en el sedimento.15.5.1. Resultados generales: tasas de sedimentación.

Los perfiles de actividades de Pb-210 *unsupported* y Cs-137 obtenidos en las secuencias sedimentarias, han permitido establecer la tasa de sedimentación del relleno sedimentario más reciente de cada uno de los testigos estudiados. En los valores deducidos se presupone; a) la ausencia de movilización del Pb-210 y Cs-137 en el sedimento, y b) el techo de las secuencias sedimentarias constituye la interfaz agua-sedimento, es decir, no existe pérdida de sedimento correspondiente a la parte más superior de los testigos.

Las tasas de sedimentación, según los perfiles de Pb-210 *unsupported*, son calculadas de la siguiente forma:

$$\text{tasa sedimentación} = \ln(2) / (k \times t_{1/2}) \quad (6)$$

(cm/año)

siendo;

$t_{1/2}$ = vida media del Pb-210 (22.26 años).

k = pendiente de la recta. Por ejemplo, de la expresión $1251.9 e^{-0.1667x}$ el valor k es igual a 0.1667.

Los perfiles de actividades de Cs-137 han permitido determinar el horizonte sedimentario asociado a los máximos ensayos de explosiones nucleares (1963 AD), mediante la ubicación del pico de máxima actividad de Cs-137. Así, las tasas de sedimentación han sido calculadas mediante la siguiente expresión:

$$\text{tasa de sedimentación} = A / (C - B) \quad (7)$$

(mm/año)

siendo;

A = intervalo de sedimento (en mm) entre el techo de la secuencia sedimentaria y la situación del pico máximo de Cs-137. La profundidad considerada es el valor medio del intervalo de profundidad de la muestra.

$(C - B)$ = intervalo temporal (en años); siendo $B = 1963$ AD, y C = año de extracción del testigo.

La presencia del horizonte ESD (rotura de la presa Vega de Tera, 1959 AD) constituye un cambio litológico importante que determina notablemente las características de los perfiles de actividad del Pb-210 *unsupported* y del Cs-137. Así, el carácter sedimentario del ESD (mayor granulometría, bajo contenido en materia orgánica) origina una perturbación en el perfil de desintegración natural del Pb-210 *unsupported*. Debido a esta influencia de la litología sobre el perfil de actividades, las tasas de sedimentación han sido obtenidas mediante los valores de las muestras situadas en el tramo post-ESD (caso de las cubetas del lago, allí donde el ESD se encuentra bien desarrollado). La influencia de la litología sobre los perfiles de actividad del Pb-210 *unsupported* y Cs-137 ha sido constatada en diversos estudios paleolimnológicos (p.ej., Appleby et al., 1995).

El modelo CIC ha sido utilizado para la obtención de la tasa de sedimentación a partir de los perfiles de Pb-210 *unsupported*. La utilización de este modelo, en las secuencias estudiadas, requiere asumir la ausencia de cambios significativos en la tasa de sedimentación durante el tramo post-ESD.

Testigo SAN135E (cubeta oriental): los perfiles de actividades de Pb-210 *unsupported* y Cs-137 se muestran en la Fig. 15.3. Los 7 cm más superficiales de la secuencia sedimentaria han facilitado una tasa de sedimentación de 1.8-1.9 mm/año. La presencia del Episodio Sedimentario Detrítico (ESD), situado entre 7-26 cm de profundidad, ha provocado una dilución general de las actividades de ambos radionucleidos, como consecuencia del cambio litológico asociado a este horizonte sedimentario. En los 7 cm más superficiales (tramo post-ESD) las actividades del Pb-210 decrecen exponencialmente según la ley de desintegración natural del Pb-210 ($r^2 = 0.88$, Fig. 15.4); asimismo, las actividades del Cs-137 muestran un pico de máxima actividad (214.0 Bq/Kg) situado entre 6-7 cm de profundidad, asociado al año de máximos ensayos nucleares (1963 AD) (Fig. 15.3).

SAN135E (Cubeta E)

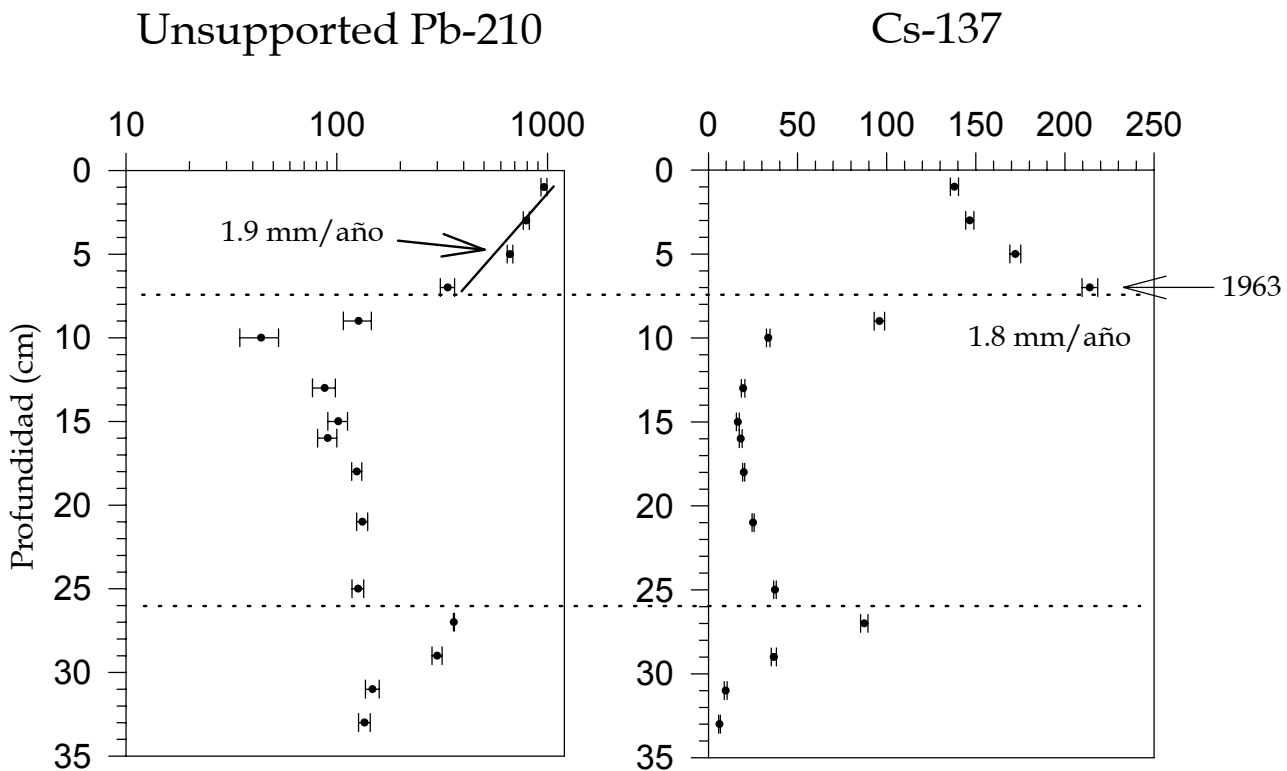


Fig. 15.3. Perfiles de actividades del Pb-210 'unsupported' y Cs-137, en el testigo SAN135E (Cubeta E). La tasa de sedimentación deducida es de 1.8-1.9 mm/año. En el perfil de Pb-210 'unsupported' ha sido utilizado el modelo CIC; en el perfil del Cs-137 ha sido utilizado el criterio del nivel sedimentario asociado a 1963 AD (máximos ensayos nucleares). El Episodio Sedimentario Detrítico (ESD), situado entre 7-26 cm de profundidad, constituye un cambio litológico importante, originando una dilución de las actividades en ambos perfiles. Actividades en Bq/Kg. Errores referenciados a 1 sigma.

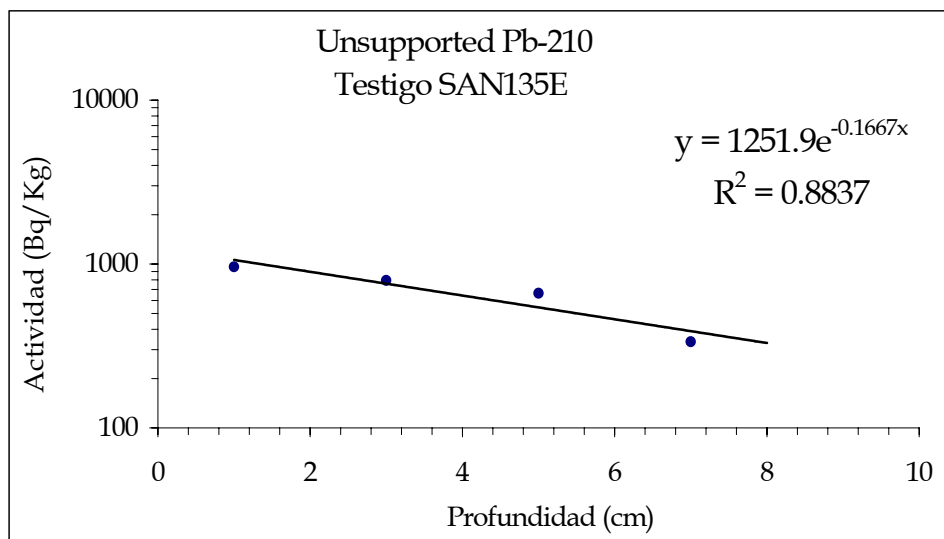


Fig. 15.4. Actividades del Pb-210 unsupported del testigo SAN135E (Cubeta E), en el tramo más superficial de la secuencia sedimentaria (tramo post-ESD). Las actividades del Pb-210 unsupported decrecen de forma exponencial, siguiendo la ley de desintegración natural del Pb-210, según la expresión $y = 1251.9 e^{-0.1667x}$ (siendo $x =$ profundidad, en cm).

Testigo SAN270W (cubeta occidental): los perfiles de actividades de Pb-210 unsupported y Cs-137 se muestran en la Fig. 15.5. Los perfiles han facilitado una tasa de sedimentación de 1.2-1.3 mm/año. En el tramo más superficial de la secuencia (tramo post-ESD), las actividades del Pb-210 siguen una tendencia de decrecimiento exponencial según la ley de desintegración natural del Pb-210 (a excepción de la primera muestra más superficial) ($r^2 = 0.89$; Fig. 15.6). Las actividades del Cs-137 muestran un pico de máxima actividad (169.9 Bq/Kg) situado entre 4-5 cm de profundidad (1963 AD) (Fig. 15.5).

Testigo SAN434 (plataforma distal): los perfiles de actividades del Pb-210 unsupported y Cs-137 se muestran en la Fig. 15.7. Los perfiles han facilitado una tasa de sedimentación de 0.4-0.5 mm/año. En el tramo más superficial de la secuencia, las actividades del Pb-210 decrecen exponencialmente según la ley de desintegración natural del Pb-210 ($r^2 = 0.99$; Fig. 15.8). Las actividades del Cs-137 muestran un pico de máxima actividad (167.8 Bq/Kg) situado entre 1-2 cm de profundidad (1963 AD).

Las características de los perfiles de actividades, así como las tasas de sedimentación deducidas, se resumen en la Tabla 15.1. Las tasas de sedimentación han sido deducidas según dos criterios independientes: el perfil de actividades de Pb-210 unsupported y el perfil de actividades de Cs-137. Ambos resultados han aportado valores similares y coherentes entre sí. Así, los tramos más superficiales de cada una de las secuencias sedimentarias presentan las siguientes tasas de sedimentación: 1.8-1.9 mm/año (SAN135E, cubeta oriental), 1.2-1.3 mm/año (SAN270W, cubeta occidental), y 0.4-0.5 mm/año (SAN434, plataforma distal).

SAN270W (Cubeta W)

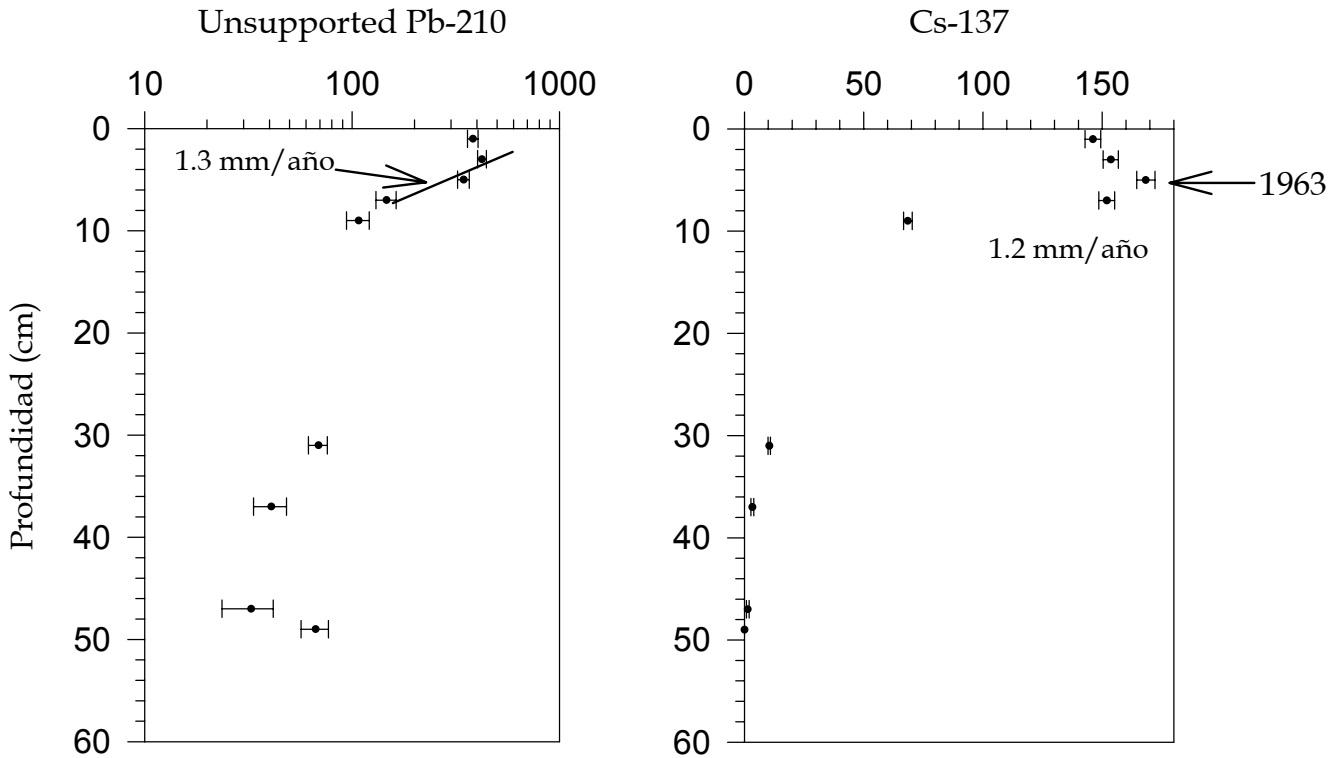


Fig. 15.5. Perfiles de actividades del Pb-210 'unsupported' y Cs-137, en el testigo SAN270W (Cubeta W). La tasa de sedimentación deducida es de 1.2-1.3 mm/año. En el perfil del Pb-210 'unsupported' ha sido utilizado el modelo CIC; en el perfil del Cs-137 ha sido utilizado el criterio del nivel sedimentario asociado a 1963 AD (máximos ensayos nucleares). Actividades en Bq/Kg. Errores referenciados a 1 sigma.

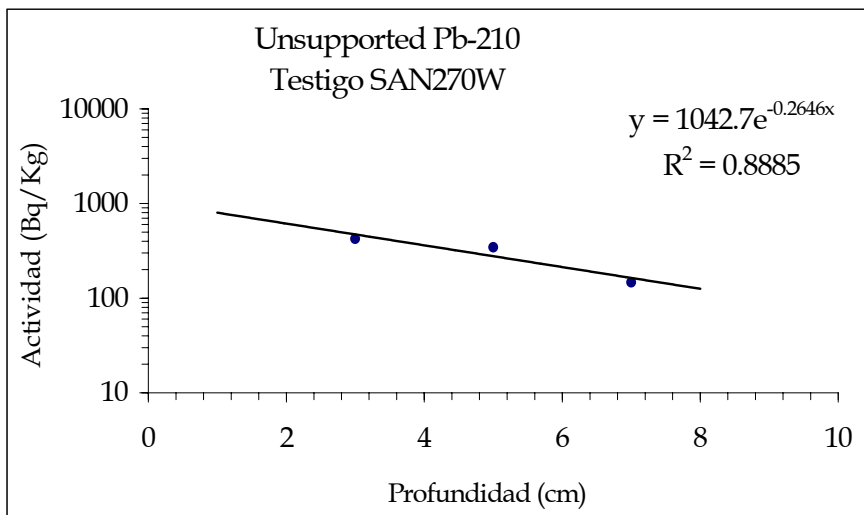


Fig. 15.6. Actividades del Pb-210 'unsupported' del testigo SAN270W (Cubeta W), en el tramo más superficial de la secuencia sedimentaria (tramo post-ESD). Las actividades del Pb-210 'unsupported' decrecen de forma exponencial, siguiendo la ley de desintegración natural del Pb-210, según la expresión $y = 1042.7 e^{-0.2646x}$ (siendo x = profundidad, en cm).

SAN434 (plataforma distal)

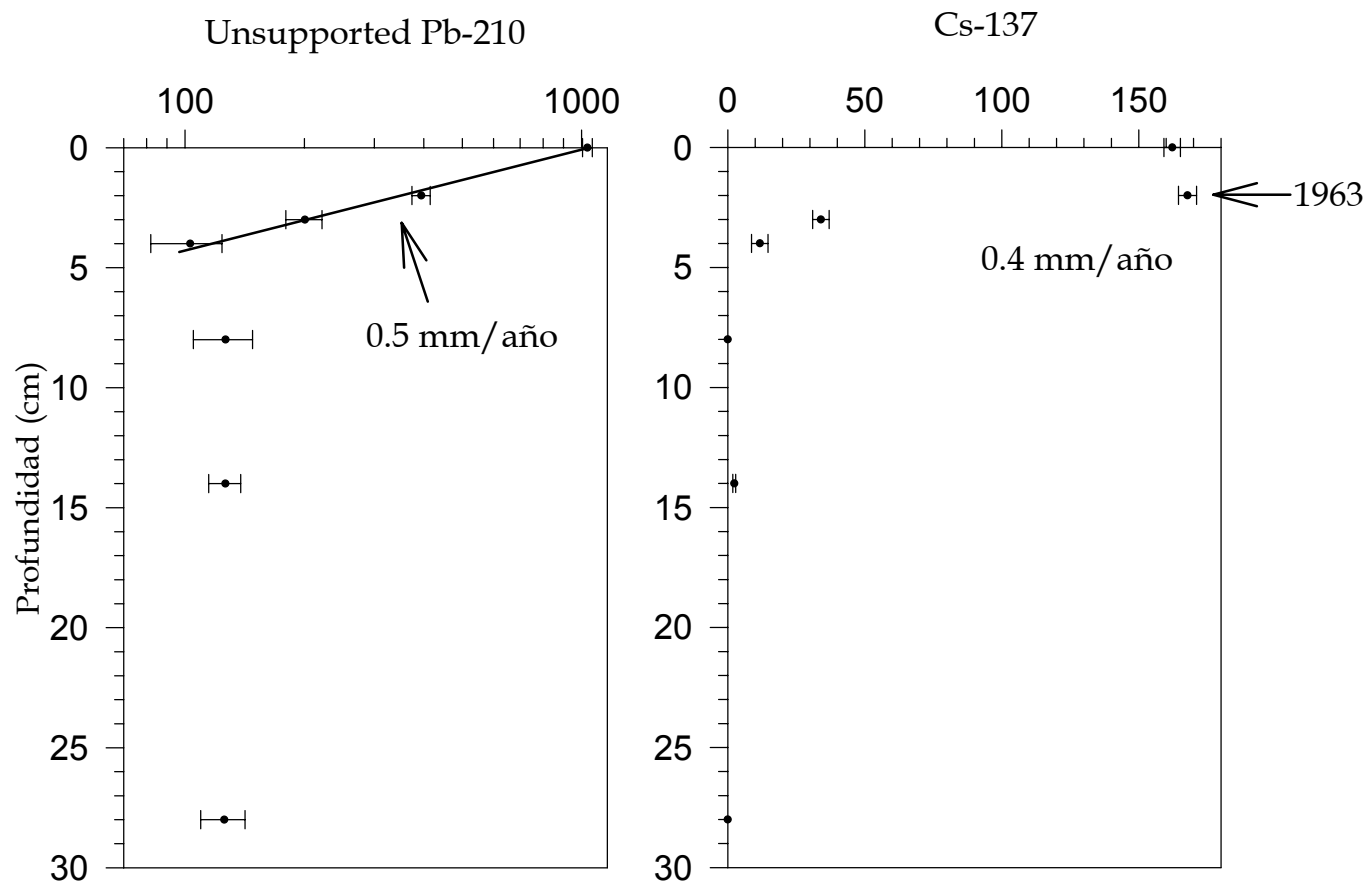


Fig. 15. 7. Perfiles de actividades del Pb-210 'unsupported' y Cs-137, en el testigo SAN434 (plataforma distal). La tasa de sedimentación deducida es de 0.4-0.5 mm/año. En el perfil del Pb-210 'unsupported' ha sido utilizado el modelo CIC; en el perfil del Cs-137 ha sido utilizado el criterio del nivel sedimentario asociado a 1963 AD (máximos ensayos nucleares). Actividades en Bq/Kg. Errores referenciados a 1 sigma.

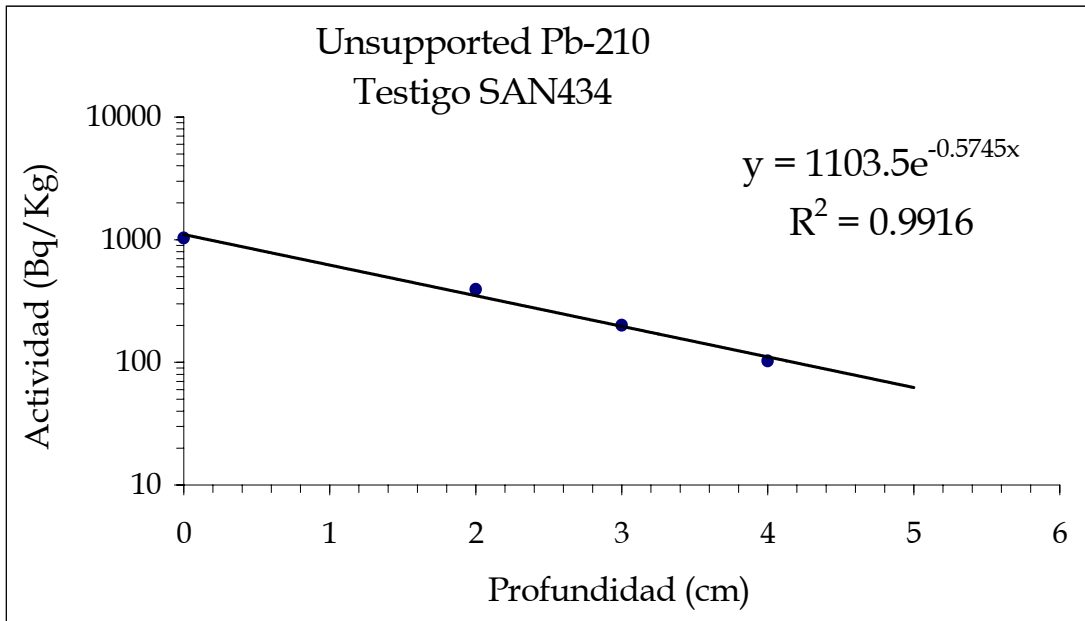


Fig. 15.8. Actividades del Pb-210 unsupported del testigo SAN434 (Plataforma distal), en el tramo más superficial de la secuencia sedimentaria. Las actividades del Pb-210 unsupported decrecen de forma exponencial, siguiendo la ley de desintegración natural del Pb-210, según la expresión $y = 1103.5 e^{-0.5745x}$ (siendo x = profundidad, en cm).

Los perfiles de actividad de Pb-210 *unsupported* han permitido determinar la ley de desintegración natural del Pb-210 en cada una de las secuencias sedimentarias (**Tabla 15.1**). Las expresiones matemáticas obtenidas responden a la ley de desintegración natural (ecuación (2)). De esta forma, la actividad existente en la interfaz agua-sedimento (actividad inicial, $A(0)$), es deducida a partir de la expresión matemática obtenida. La incógnita x es la profundidad (en cm). Según la ecuación (2), las actividades iniciales de Pb-210 *unsupported* presentan unos valores comprendidos entre 1000-1300 Bq/Kg.

		Testigo sedimentario		
		SAN135E (Cubeta E)	SAN270W (Cubeta W)	SAN434 (plataforma distal)
Pb-210 (<i>unsupported</i>)	Ley de desintegración	$1251.9 e^{-0.1667x}$	$1042.7 e^{-0.2646x}$	$1103.5 e^{-0.5745x}$
	Actividad inicial (Bq/Kg)	1251.9	1042.7	1103.5
	Tasa de sedimentación (mm/año)	1.9	1.3	0.5
Cs-137	Actividad del pico máximo (Bq/Kg)	214.0	169.9	167.8
	Situación del pico máximo (cm)	6-7	4-5	1-2
	Tasa de sedimentación (mm/año)	1.8	1.2	0.4

Tabla 15.1. Tasas de sedimentación deducidas según las actividades del Pb-210 *unsupported* y del Cs-137, en los testigos sedimentarios SAN135E (Cubeta E), SAN270W (Cubeta W), y SAN434 (plataforma distal). En la ley de desintegración natural, la incógnita x es la profundidad (en cm). La actividad inicial es la actividad de Pb-210 *unsupported* presente en la interfaz agua-sedimento. La situación del pico máximo de actividad de Cs-137 corresponde 1963 AD (máximos ensayos de explosiones nucleares).

Los perfiles de Pb-210 *unsupported* y de Cs-137, de los tres testigos estudiados, se resumen en las Fig. 15.9 y 15.10, respectivamente.

15.5.2. Situación cronoestratigráfica del Episodio Sedimentario Detrítico (ESD).

Los perfiles de actividades de Pb-210 *unsupported* y Cs-137 han permitido caracterizar la posición cronoestratigráfica del horizonte sedimentario ESD (horizonte inorgánico asociado a la rotura de la presa Vega de Tera, ocurrido en 1959 AD).

El marco cronoestratigráfico del horizonte ESD ha sido establecido en el testigo SAN135E (Fig. 15.11). Las dataciones obtenidas mediante Pb-210 *unsupported* y Cs-137

son coherentes con el año de deposición del horizonte ESD (1959 AD). Así, y aplicando el modelo CIC (ecuación (3)), las edades obtenidas mediante el perfil del Pb-210 *unsupported* han delimitado el ESD en una edad coincidente a 1959 AD (como es el caso de la muestra inmediatamente inferior a la base del horizonte ESD). Asimismo, el perfil de Cs-137 ha situado el año 1963 AD en la muestra inmediatamente superior al techo del horizonte ESD. Entre 29-30 cm de profundidad los valores de actividad de Cs-137 sitúan el comienzo de los primeros ensayos nucleares (aprox. 1945 AD).

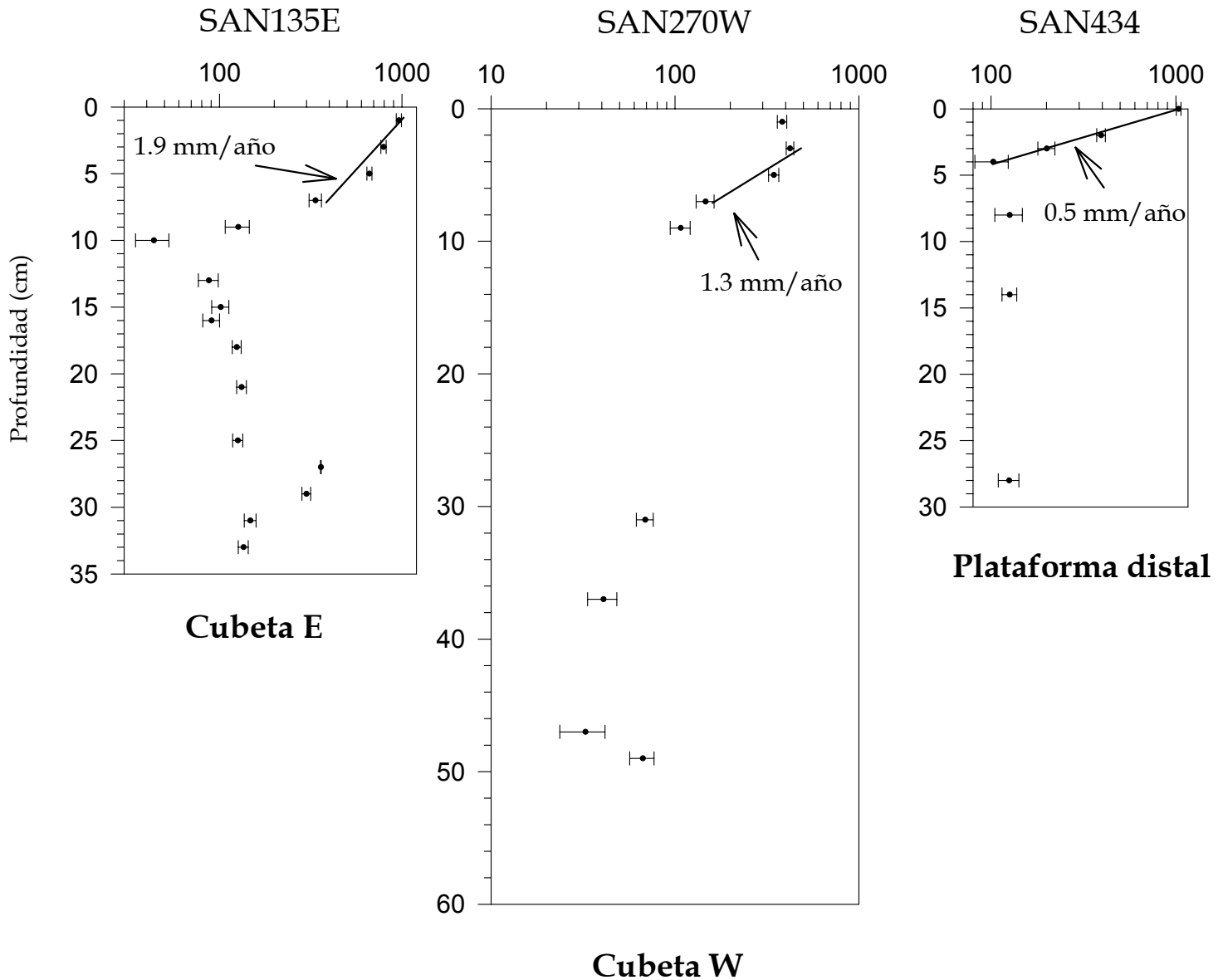


Fig. 15.9. Perfiles de Pb-210 'unsupported' de los testigos SAN135E (Cubeta E), SAN270W (Cubeta W) y SAN434 (plataforma distal). Las tasas de sedimentación han sido determinadas en los tramos post-ESD (allí donde estaba bien desarrollado el ESD), según el modelo CIC. Actividades en Bq/Kg. Errores referenciados a 1 sigma.

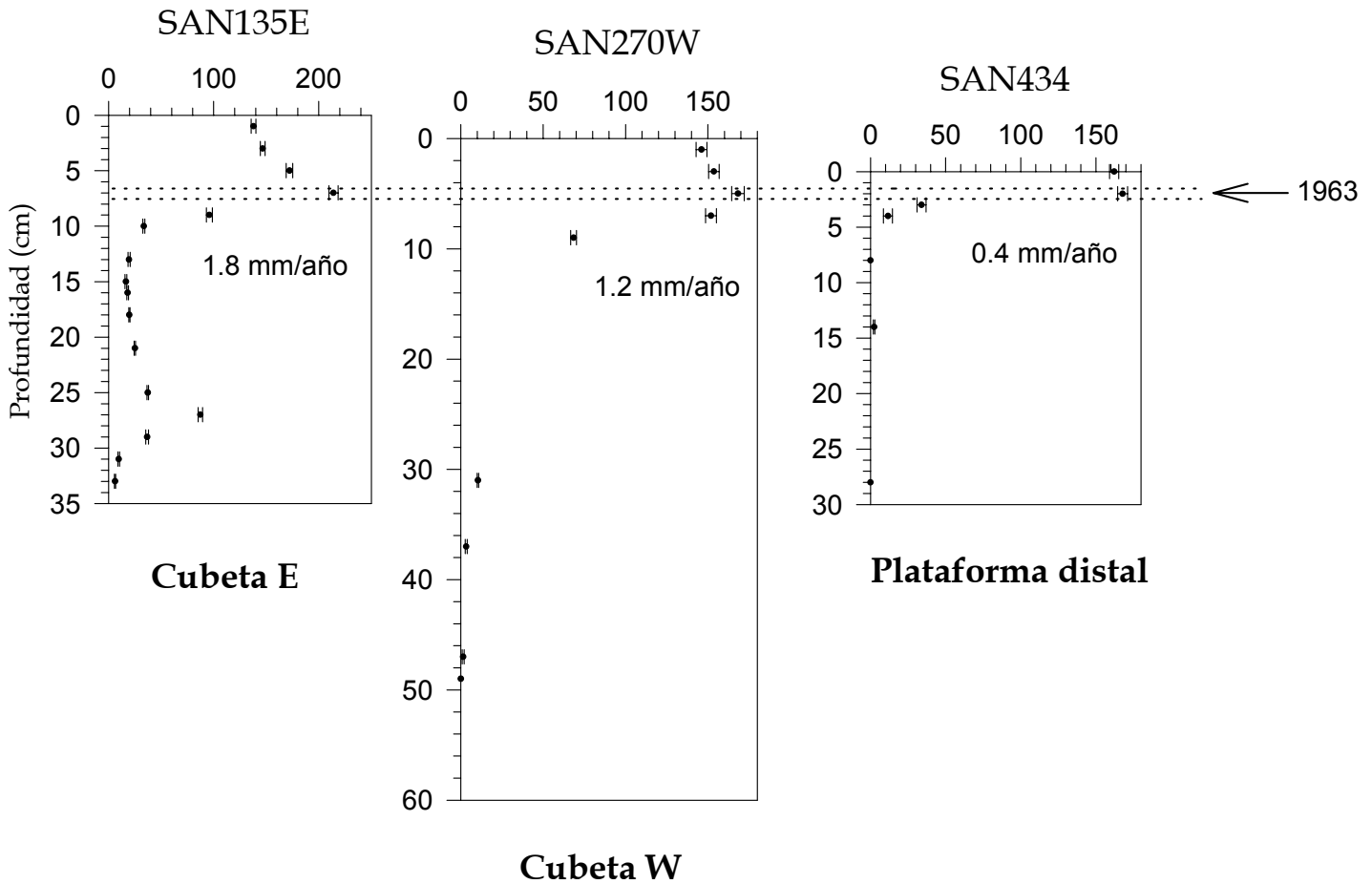


Fig. 15.10. Perfiles de Cs-137 de los testigos SAN135E (Cubeta E), SAN270W (Cubeta W) y SAN434 (plataforma distal). Las tasas de sedimentación han sido determinadas según la situación estratigráfica del nivel asociado a 1963 AD (máximos ensayos nucleares). Las secuencias sedimentarias han sido colgadas según el nivel sincrónico de 1963 AD. Actividades en Bq/Kg. Errores referenciados a 1 sigma.

Testigo SAN135E

Profundidad (cm)	Cs-137 Edad (AD)	Pb-210 Edad (AD)
0-1		1991
1-2		
2-3		1985
3-4		
4-5		1979
5-6		
6-7	1963	1957
7-8		
8-9		
9-10		
10-11	EPISODIO	
11-12		
12-13		
13-14	SEDIMENTARIO	
14-15		
15-16		
16-17		DETRÍTICO
17-18		
18-19		
19-20	(rotura de la presa Vega de Tera)	
20-21		
21-22	1959 AD	
22-23		
23-24		
24-25		
25-26		
26-27		1959
27-28		
28-29		1952
29-30	1945	
30-31		1928
31-32		
32-33		1923

Fig. 15.11. Situación cronoestratigráfica del Episodio Sedimentario Detrítico (ESD), correspondiente a la rotura de la presa Vega de Tera (1959 AD). El modelo cronológico ha sido obtenido a partir de los perfiles de actividad de Pb-210 unsupported y de Cs-137, del testigo SAN135E (cubeta oriental). La edad de la rotura de la presa Vega de Tera (1959 AD) se encuentra en coherencia con el modelo cronoestratigráfico de ambos radionucleidos.

Subcapítulo 16. TASAS DE SEDIMENTACIÓN EN EL LAGO DE SANABRIA.

16.1. Tasas de sedimentación según los diferentes criterios utilizados.

Las tasas de sedimentación de las secuencias sedimentarias del Lago de Sanabria (tasas de sedimentación de los distintos ambientes deposicionales) han sido determinadas utilizando los siguientes criterios: a) C-14 (datación radiométrica), b) Pb-210 (datación radiométrica), c) Cs-137 (datación radiométrica), y d) trampas de sedimentación. Los resultados obtenidos mediante los métodos radiométricos (C-14, Pb-210 y Cs-137) han permitido determinar las tasas de sedimentación existentes tanto en las dos cubetas del lago como en la plataforma distal. Las trampas de sedimentación, en cambio, han permitido determinar las tasas acumulativas únicamente en las dos cubetas del Lago de Sanabria. Los resultados obtenidos mediante los diferentes criterios se muestran en la **Tabla 16.1 a**. Los cocientes de tasas de sedimentación entre los distintos ambientes lacustres se ilustra en la **Tabla 16.1 b**.

		Tasas de sedimentación (mm/año)			
		Cubeta W	Cubeta E		Plataforma distal
		SAN270W	SAN235E	SAN135E	SAN434
pre-ESD	C-14	2.01	0.95	0.71	0.45
post-ESD	Pb-210	1.3		1.9	0.5
	Cs-137	1.2		1.8	0.4
	Trampas de sedimentación (mg/m ² día)	833	668		

Tabla 16.1 a. Tasas de sedimentación deducidas en los distintos testigos sedimentarios del Lago de Sanabria, mediante los diferentes métodos utilizados: C-14, Pb-210, Cs-137, y trampas de sedimentación.

		Cocientes de tasas de sedimentación		
		CW/CE	CW/PD	CE/PD
pre-ESD	C-14	2.5	4.4	1.8
post-ESD	Pb-210	0.7	2.6	3.8
	Cs-137	0.7	3.0	4.5
Trampas de sedimentación		1.25		

Tabla 16.1 b. Cocientes de tasas de sedimentación (CW/CE, CW/PD, CE/PD) entre cada uno de los ambientes lacustres. CW/CE: cociente de tasas de sedimentación entre la Cubeta W y la Cubeta E. CW/PD: cociente de tasas de sedimentación entre la Cubeta W y la Plataforma Distal. CE/PD: cociente de tasas de sedimentación entre la Cubeta E y la Plataforma Distal.

La datación mediante C-14 ha permitido establecer la tasa de sedimentación en el relleno sedimentario pre-ESD (desde la base de la secuencia sedimentaria hasta la base del horizonte ESD (1959 AD)). La datación mediante Pb-210 y Cs-137 ha permitido establecer la tasa de sedimentación en el tramo post-ESD (sedimento depositado en las últimas décadas, posterior al horizonte ESD). Las trampas de sedimentación han permitido determinar la tasa de sedimentación actual (el intervalo estudiado ha sido agosto´98-noviembre´99).

Las tasas de sedimentación deducidas permiten obtener las siguientes conclusiones:

Según el C-14

1. Las tasas de sedimentación se encuentran determinadas por el ambiente lacustre considerado. Así, la plataforma distal (testigo SAN434) presenta una tasa de sedimentación notablemente inferior a la existente en las dos cubetas del lago (**Fig. 16.1**). La tasa de sedimentación en la plataforma distal es 4.4 veces menor con respecto a la cubeta occidental (testigo SAN270W) y 1.8 veces menor con respecto a la cubeta oriental (testigos SAN135E y SAN235E) (**Tabla 16.1 b**).

Según el C-14, Pb-210 y Cs-137.

2. La plataforma distal presenta una tasa de sedimentación de 0.4-0.5 mm/año. Tanto la datación mediante C-14, como los perfiles de actividad de Pb-210 y Cs-137, constatan una tasa de sedimentación muy similar para toda la secuencia sedimentaria (**Tabla 16.1 a**).

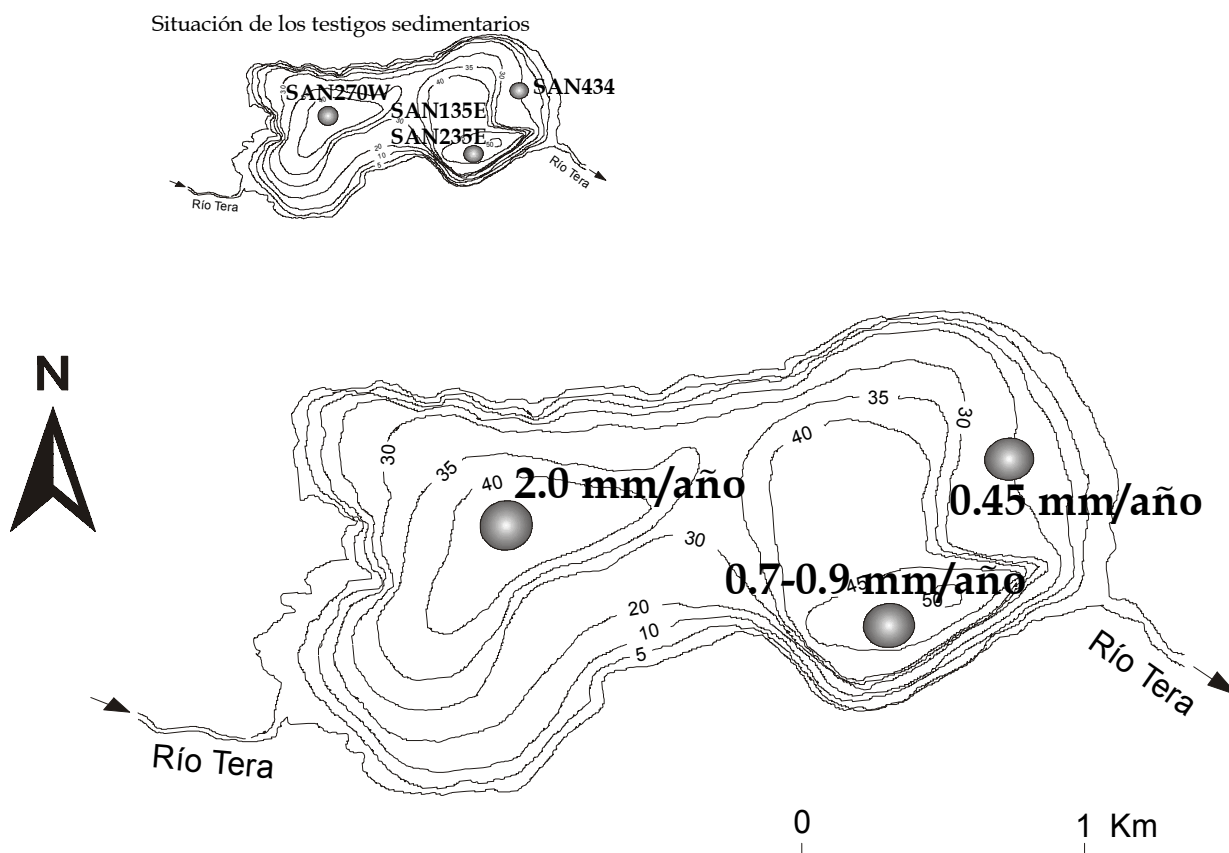


Fig. 16.1. Tasas de sedimentación deducidas en los diferentes testigos sedimentarios del Lago de Sanabria, mediante el método del C-14. La cubeta occidental, próxima a la entrada del río Tera, presenta una mayor tasa de sedimentación con respecto a las zonas más distales y próximas a la salida del río Tera (cubeta oriental y plataforma distal).

Según el Pb-210 y Cs-137.

- Las tasas de sedimentación más recientes (últimas décadas) evidencian valores muy similares para una misma secuencia sedimentaria. Así, ambas técnicas han permitido deducir valores de 1.2-1.3 mm/año (Cubeta W), 1.8-1.9 mm/año (Cubeta E) y de 0.4-0.5 mm/año (plataforma distal) (**Fig. 16.2**).
- Las tasas de sedimentación determinadas mediante Pb-210 y Cs-137 (en las dos cubetas del lago), evidencian unos resultados diferentes comparados con los resultados de C-14. Así, mediante la datación por C-14, la Cubeta W presenta una tasa de sedimentación mayor con respecto a la Cubeta E (2.0 mm/año en la cubeta occidental, con respecto a 0.7-0.9 mm/año en la cubeta oriental). En cambio, la tasa

de sedimentación deducida para las últimas décadas, muestra unos valores más elevados en la Cubeta E (1.8-1.9 mm/año) con respecto los valores de la Cubeta W (1.2-1.3 mm/año). Para constatar la validez de estas observaciones, asumimos el cumplimiento de las siguientes premisas:

- Ausencia de errores significativos en la determinación de la edad mediante C-14.
- Ausencia de movilización de los radionucleidos Pb-210 y Cs-137 dentro del perfil sedimentario.
- Los testigos sedimentarios utilizados, para la datación mediante Pb-210 y Cs-137 en las dos cubetas (testigos SAN270W y SAN135E), tienen preservada toda la secuencia sedimentaria más superficial; es decir, el techo de los testigos constituyen la interfaz agua-sedimento.
- Si se cumplen las premisas *a*, *b*, y *c*, probablemente los resultados son explicable mediante la existencia de posibles cambios sedimentarios propios del sistema deposicional del Lago de Sanabria.

Situación de los testigos sedimentarios

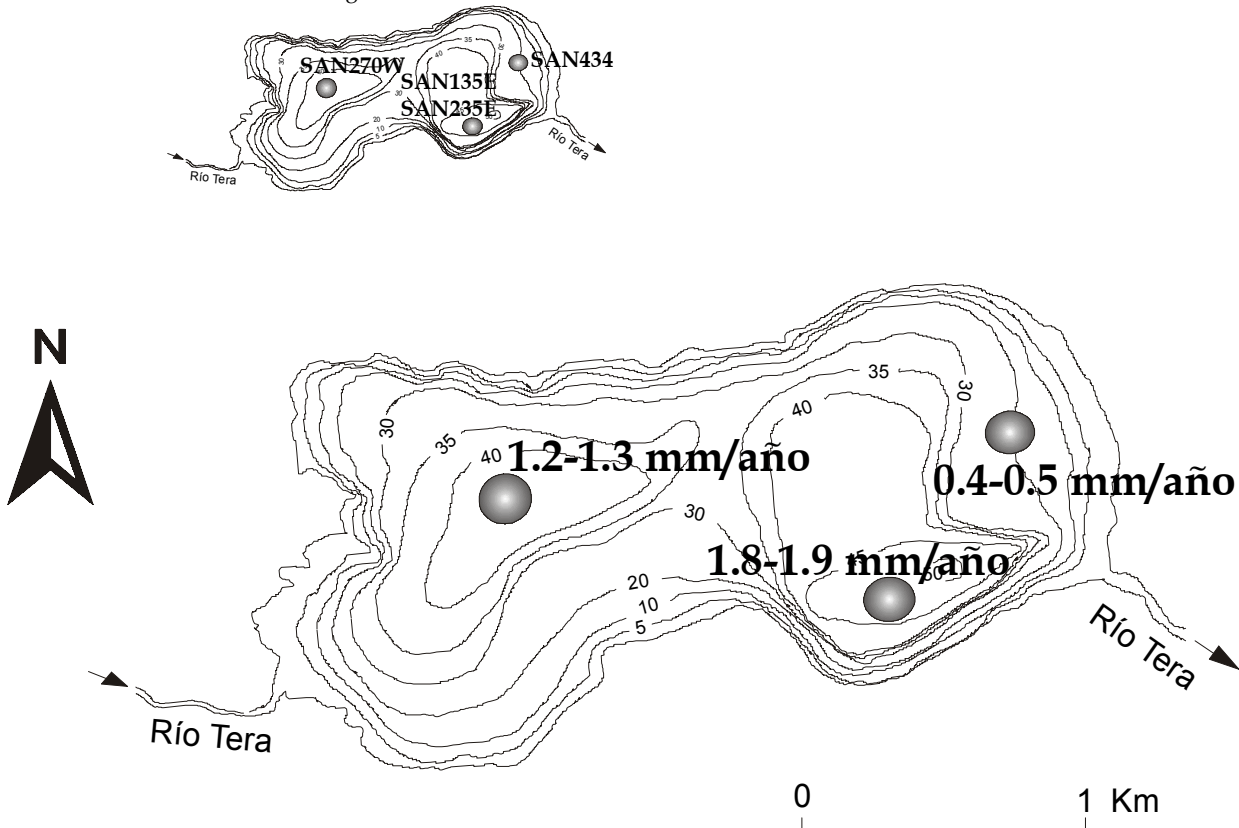


Fig. 16.2. Tasas de sedimentación del relleno sedimentario más reciente (últimas décadas) deducidas en los diferentes testigos sedimentarios del Lago de Sanabria. Las tasas de sedimentación han sido deducidas mediante los perfiles de actividad de Pb-210 y Cs-137. La plataforma distal (testigo SAN434) presenta unos valores muy similares a los obtenidos mediante el método del C-14.

Según las trampas de sedimentación.

5. Las trampas de sedimentación, instaladas durante agosto'98-noviembre'99, han evidenciado una tasa de sedimentación de 833 mg/m² día (Cubeta W) y 668 mg/m² día (Cubeta E) (**Tabla 16.1 a**). Por lo tanto, durante el periodo señalado, la tasa de sedimentación en la Cubeta W ha sido 1.25 veces mayor respecto la Cubeta E ($CW/CE = 1.25$). Este cociente (CW/CE) presenta un valor intermedio con respecto a los cocientes CW/CE obtenidos mediante otros criterios (0.7 según el Pb-210 y Cs-137, y 2.5 según el C-14) (**Tabla 16.1 b**).

Según el conjunto de criterios (C-14, Pb-210, Cs-137 y trampas de sedimentación).

6. El Lago de Sanabria presenta una mayor tasa de sedimentación en la cubeta occidental, situada en una posición proximal con respecto a la entrada del río Tera (**Fig. 16.1**). En posiciones más distales, cercanas ya a la salida del río Tera, la tasa de sedimentación es menor. Así, la cubeta oriental presenta una tasa de sedimentación 2.5 veces menor con respecto la Cubeta W; la plataforma distal presenta una tasa de sedimentación 4.4 veces menor con respecto la Cubeta W (**Tabla 16.1 b**). Estos resultados son deducidos a partir de la datación mediante C-14. Las trampas de sedimentación confirman la existencia de una mayor tasa de sedimentación en la Cubeta W, pero la diferencia entre la tasa de sedimentación de la Cubeta W con la de la Cubeta E fue menor ($CW/CE = 1.25$).
7. Las tasas de sedimentación deducidas a partir de los perfiles de actividad de Pb-210 y Cs-137, y atribuibles a las últimas decenas de años, evidencian la existencia de una mayor tasa de sedimentación en la Cubeta E (**Fig. 16.2**), muy similar a la deducida para la Cubeta W mediante el C-14. Si asumimos la ausencia de cambios sedimentarios significativos dentro del sistema deposicional del Lago de Sanabria, es probable la existencia de uno o varios factores que pudieran haber perturbado los valores de la tasa de sedimentación en las secuencias de las dos cubetas. Estos factores serían:
 - a) Mobilización de los radionucleidos Pb-210 y Cs-137 dentro del perfil sedimentario, y/o
 - b) Ausencia de parte del registro sedimentario más superficial de alguna secuencia (presumiblemente podría afectar al testigo SAN270W, por presentar una tasa de sedimentación inferior al testigo SAN135E). Esta posible ausencia de registro sedimentario podría estar asociada tanto a la existencia de pequeños *hiatus* erosionales en el testigo SAN270W (se encuentra en una zona próxima a la entrada del río Tera), como a la posible pequeña pérdida de parte del registro sedimentario más superficial durante el proceso de extracción del testigo.
8. La tasa de sedimentación deducida en la plataforma distal (testigo SAN434) presenta unos resultados muy similares ya sea según los valores obtenidos mediante C-14 como según los valores obtenidos mediante los perfiles de Pb-210 y Cs-137 (**Tabla 16.1 a**). Estos resultados evidencian la ausencia de cambios apreciables en las tasas de sedimentación a lo largo de la secuencia sedimentaria. Además, verifican la aplicabilidad y complementariedad de los tres métodos radiométricos utilizados (C-14, Pb-210 y Cs-137), allí donde las secuencias

sedimentarias reúnan las condiciones óptimas para evitar los factores de perturbación descritos en el punto 7.

9. Como conclusión de todos estos puntos descritos, los resultados de las tasas de sedimentación deducidas mediante C-14, Pb-210 y Cs-137, así como las trampas de sedimentación, han permitido deducir:
 - 9.1. Las tasas de sedimentación son mayores en la Cubeta W, debido a su proximidad a la entrada del río Tera. Las posiciones más distales (Cubeta E y plataforma distal), próximas a la salida del río Tera, presentan unas tasas de sedimentación menores.
 - 9.2. Probablemente, las tasas de sedimentación han aumentado en las últimas décadas. El incremento es detectable fundamentalmente en las dos cubetas del lago; en la plataforma distal, de ambiente más somero y marginal, este incremento no ha sido registrado. Algunos valores obtenidos mediante Pb-210 y Cs-137, como por ejemplo en el testigo SAN270W, han podido ser alterados por la existencia de posibles factores de perturbación (p.ej. ausencia de registro sedimentario más superficial).