

# Variaciones isotópicas ( $^{210}\text{Pb}$ , $^{137}\text{Cs}$ ) antropogénicas en el registro estratigráfico de un lago de la cordillera de Nahuelbuta, Chile

Marco Cisternas

Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción,  
Casilla 160-C, Concepción, Chile  
mcisterv@udec.cl

Alberto Araneda

## RESUMEN

La actividad y distribución de  $^{210}\text{Pb}$  y  $^{137}\text{Cs}$  en el registro sedimentario de un lago de la cordillera de Nahuelbuta están influenciadas por la actividad antrópica. Análisis isotópicos, de rayos X, susceptibilidad magnética, polen y granulometría muestran que tanto las variaciones en las tasas de erosión, generadas por cambios en el uso del suelo de la cuenca, como las inyecciones atmosféricas del  $^{137}\text{Cs}$  han operado sobre el comportamiento de dichos isótopos en la columna estratigráfica. Se discute, también, el papel desempeñado por algunas variables naturales, como la proporción entre continentes y océanos en el hemisferio sur y la localización de la cordillera de Nahuelbuta.

*Palabras claves:* Registro sedimentario lacustre,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , Cordillera de Nahuelbuta, Chile central.

## ABSTRACT

**Anthropogenic isotope ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) variations in the sedimentary record from a lake in the Nahuelbuta mountain range, Chile.** The activity and distribution of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  through the sedimentary record of a lake, which is located in the Nahuelbuta mountain range, are influenced by anthropic activity. Isotope analyses, X-rays, magnetic susceptibility, pollen and grain size analyses show both erosion rates variations-produced by land use changes within the watershed-and the  $^{137}\text{Cs}$  atmospheric inputs have affected on the behavior of those isotopes in the record. The role of some natural variables -as the low ratio of land to ocean in southern latitudes, and the Nahuelbuta mountain range locations are also discussed.

*Key words:* Lacustrine sedimentary record,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , Nahuelbuta mountain range, Central Chile.

## INTRODUCCION

Los sedimentos lacustres contienen isótopos naturales y artificiales. Los primeros, son generados por el bombardeo de rayos cósmicos de la atmósfera terrestre (e.g.,  $^{14}\text{C}$  y  $^7\text{Be}$ ) y a través de las secuencias del decaimiento de radionúcleos primordiales ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$ ). En cambio, los

radioisótopos artificiales han sido introducidos al ambiente como resultado de las pruebas de armas y accidentes nucleares ( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  y  $^{241}\text{Am}$ ; Appleby y Oldfield, 1992, 1997).

Uno de los radioisótopos más utilizado para realizar la geocronología de la sedimentación re-

ciente es el  $^{210}\text{Pb}$ . Este isótopo se encuentra en forma natural, en los sedimentos lacustres, como resultado del decaimiento del  $^{238}\text{U}$ . Su período de semidesintegración (22, 26 años), lo hace especialmente adecuado para fechar sedimentos depositados durante los dos últimos siglos (Crickmore *et al.*, 1990).

A diferencia del  $^{210}\text{Pb}$ , el  $^{137}\text{Cs}$  es uno de los principales componentes de la precipitación radiactiva antropogénica. Ambientalmente, se clasifica dentro del grupo de contaminantes inorgánicos producidos por fisión nuclear (Olsen *et al.*, 1982). El  $^{137}\text{Cs}$  fue generado como un subproducto de las pruebas de armas y accidentes nucleares, estando presente en el ambiente desde los primeros ensayos nucleares de 1945 (Whicker *et al.*, 1994). Su distribución global ha estado controlada tanto por

las inyecciones estratosféricas del isótopo, como por los patrones de circulación atmosférica (Walling y Bradley, 1990). Ambientalmente, las características del  $^{137}\text{Cs}$  (*i.e.*, alta energía, comportamiento geoquímico, afinidad con el K, movilidad en los niveles tróficos y bioacumulación), lo convierten en uno de los radioisótopos más peligrosos para los seres vivos, generando lesiones celulares (*i.e.*, cáncer) y modificaciones genéticas (Eyman y Kevern, 1975; Francis y Brinkley, 1976; Unsear, 1993).

La presente investigación informa y discute, respecto a la influencia antropogénica, la distribución de un isótopo natural ( $^{210}\text{Pb}$ ) y uno artificial ( $^{137}\text{Cs}$ ) en el registro sedimentario de un lago sometido históricamente a fuerte presión de uso

## MATERIALES Y METODOS

### AREA DE ESTUDIO

Laguna Chica se localiza en la comuna de San Pedro de la Paz, Chile central (Fig. 1A y B), entre las estribaciones septentrionales de la Cordillera de Nahuelbuta y la planicie sedimentaria del río Biobío (Fig. 1C y D). Su cuenca de drenaje, que cubre 4,5 km<sup>2</sup> de una quebrada que alcanza los 400 m de altitud, no cuenta con ríos ni tributarios de orden mayor (Fig. 2A). Geológicamente, la cuenca se encuentra sobre la serie oriental del basamento metamórfico paleozoico, limitada al norte por una planicie sedimentaria, compuesta por arenas cuaternarias de origen volcánico, que embalsa las aguas del lago (Aguirre *et al.*, 1972; Hervé, 1977; Cecioni y Quezada, 1994). El cuerpo lacustre, con un espejo de agua de 0,87 km<sup>2</sup> y una profundidad máxima de 17 m (Fig. 2B), presenta un efluente temporal sólo en invierno (Parra, 1989). Las aguas del lago provienen, principalmente, de la precipitación interceptada por la cuenca. Durante el último siglo, la precipitación anual fluctuó entre 1 y 2 m a<sup>-1</sup>, con una media de 1,3 m a<sup>-1</sup>. En general, el registro de lluvia durante el período no presenta tendencias al incremento o disminución de los montos (Fig.

2C). Históricamente, diversas actividades antrópicas han afectado intensamente al lago y su cuenca: tala del bosque nativo, cultivo intensivo de trigo, plantaciones forestales y urbanización (Cisternas *et al.*, 1999, 2000).

### OBTENCION DEL REGISTRO SEDIMENTARIO

Utilizando un ecógrafo se determinó el punto de mayor profundidad del lago (Fig. 2B). Una vez estabilizada la embarcación, mediante buceo autónomo se recolectaron, evitándose la resuspensión, dos núcleos vecinos. Verticalmente, se introdujeron 2 tubos de plexiglass de 5 cm de diámetro por 1 m de longitud en el fondo del lago. Los testigos obtenidos se denominaron LCH-1 y LCH-2.

### RAYOS X

Con el objetivo de determinar la calidad del registro sedimentario, esto es, evaluar si la estratigrafía ha sufrido mezcla biológica o física, se procedió a radiografiar el núcleo LCH-1, a una intensidad de 50 kV, con el método propuesto por Axelsson (1983).

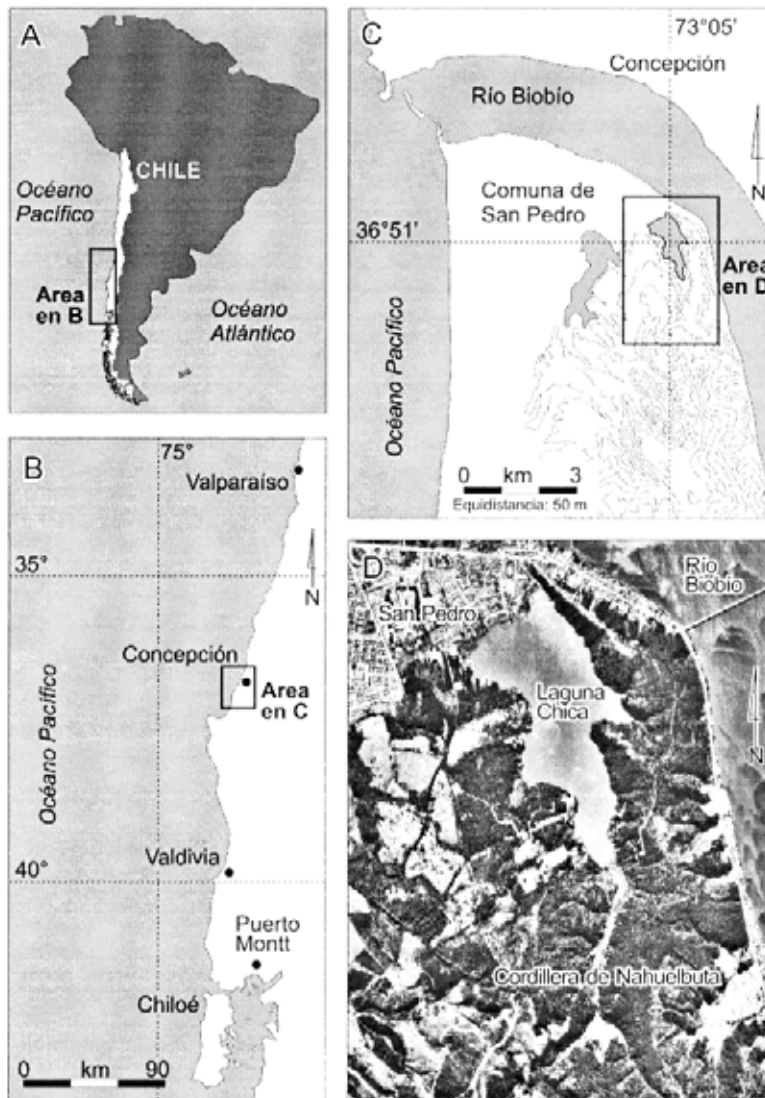


FIG. 1. Localización continental (A), regional (B), y comunal (C y D) del área de estudio.

## MEDICIONES ISOTOPICAS

### FUNDAMENTO METODOLOGICO DEL ANALISIS DE $^{210}\text{Pb}$

La actividad total del  $^{210}\text{Pb}$  en los sedimentos tiene dos componentes. El  $^{210}\text{Pb}$  'sostenido' ('supported') o 'propio' ( $^{210}\text{Pb}_s$ ), que es producto del decaimiento *in situ* del isótopo padre  $^{226}\text{Ra}$  en las partículas de roca (Crickmore *et al.*, 1990). El segundo componente, llamado  $^{210}\text{Pb}$  'no sostenido'

('unsupported') o en exceso ( $^{210}\text{Pb}_{ex}$ ), proviene de la precipitación atmosférica. El  $^{222}\text{Rn}$ , formado por el decaimiento del  $^{226}\text{Ra}$  en el suelo, escapa por los intersticios hacia la atmósfera, donde decae a  $^{210}\text{Pb}$ . Este precipita, por deposición seca y húmeda, sobre la superficie terrestre. El  $^{210}\text{Pb}_{ex}$  que cae dentro de los lagos, sea por precipitación directa o a través de la escorrentía de la cuenca, es removido desde la columna de agua y depositado junto a los sedimentos. En el registro sedimentario, el  $^{210}\text{Pb}_s$  está en equilibrio radioactivo con el  $^{226}\text{Ra}$ , y así el  $^{210}\text{Pb}_{ex}$  se

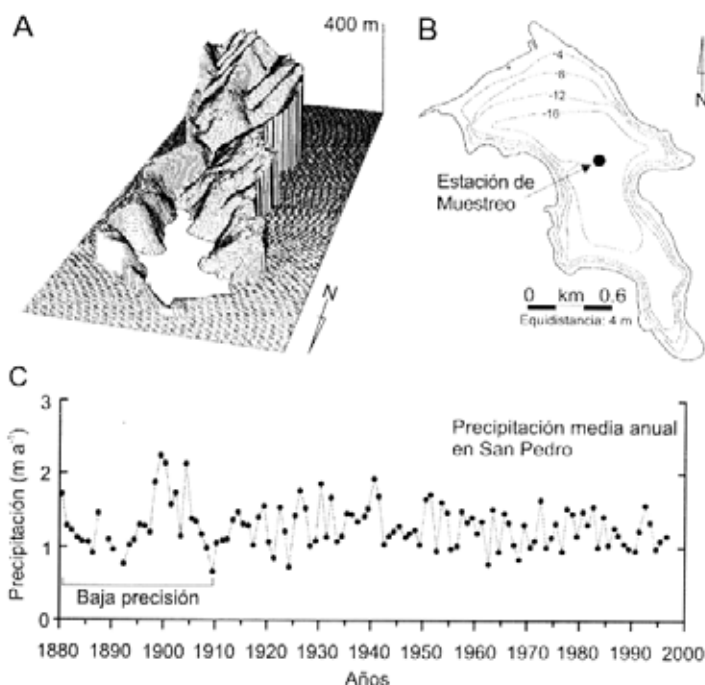


FIG. 2. Modelo digital de elevación de la cuenca de Laguna Chica (A); batimetría del lago con la localización de la estación de muestreo (B), y registro de precipitación media anual del área durante el último siglo.

puede conocer por la diferencia entre el  $^{210}\text{Pb}$  en un determinado estrato, y el valor más bajo y constante de  $^{210}\text{Pb}$  en los estratos profundos; asumiendo la ausencia de  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  debido a su decaimiento natural. De este modo, teóricamente, el  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  en cada estrato debiese declinar con su profundidad y edad de acuerdo con la ley de decaimiento radioactivo; a menos que existan variaciones en el proceso sedimentario (Eakins, 1983; Crickmore *et al.*, 1990).

#### ANÁLISIS DE $^{210}\text{Pb}$

Después de radiografiado, el núcleo LCH-1 fue seccionado a intervalos de 1 cm. La determinación de la concentración del  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  en cada sección se realizó en el Laboratoire de Glaciologie et Geophysique de l'Environnement (CNRS), en la Universidad Joseph-Fourier, Grenoble, Francia, siguiendo las metodologías propuestas por Hasanen (1977), Eakins y Morrison (1978); Binford *et al.* (1991) y Radakovitch (1995). La cronología, tasas de sedimentación y flujo del isótopo se obtuvieron alimentando el modelo CRS ('Constant Rate Supply'; Appleby y Oldfield, 1978, 1992).

#### FUNDAMENTO METODOLÓGICO DEL ANÁLISIS DE $^{137}\text{Cs}$

El  $^{137}\text{Cs}$  inyectado a la estratosfera desciende a la troposfera principalmente en las latitudes medias y polares (Longmore *et al.*, 1983). Posteriormente, precipita, en forma húmeda y seca, sobre la superficie terrestre (Olsen *et al.*, 1982; Agudo, 1998). A los lagos, el  $^{137}\text{Cs}$  llega por precipitación directa sobre el espejo de agua y a través de la escorrentía de la cuenca, la cual erosiona y transporta las partículas de suelo contaminado (Whicker *et al.*, 1994). Así, en la columna de agua, las partículas con  $^{137}\text{Cs}$ , deberían decantar siguiendo un patrón de distribución similar a la precipitación radioactiva (Pennington *et al.*, 1973; Crickmore *et al.*, 1990).

#### ANÁLISIS DE $^{137}\text{Cs}$

Las mediciones de  $^{137}\text{Cs}$  en cada sección de LCH-1 se realizaron en el Laboratorio de Radioactividad Ambiental de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), mediante un detector de Ge

hiperpuro, con 25% de eficiencia relativa y 1,9 keV de resolución. La actividad del radioisótopo se cuantificó mediante el método propuesto por Piñones y Tomcic (1995).

#### SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA

La susceptibilidad reversible del sedimento a un campo magnético de baja frecuencia (de ahora en adelante 'susceptibilidad magnética') es una razón que está en dependencia directa del volumen de minerales ferromagnéticos en el sedimento (e.g., magnetita, titanomagnetita). Este parámetro es utilizado como indicador de variaciones en la fuente sedimentaria y de la energía cinética involucrada en el proceso (Dearing y Flower, 1982; Oldfield *et al.*, 1983; Rummery, 1983; Yu y Oldfield, 1989). La susceptibilidad magnética de LCH-2 se cuantificó en el Labor für Geomorphologie und Geoökologie, en la Universidad de Heidelberg, Alemania, mediante la utilización de un instrumento modificado de Molyneux y Thompson (1973). Dicho sistema mide, con un campo magnético de 0.47 kHz, en forma continua al núcleo completo (sin rebanar). Los resultados se expresan en unidades arbitrarias y adimensionales.

#### ANALISIS GRANULOMETRICO

El análisis granulométrico del sedimento se realizó, previa disgregación con ultrasonido, mediante un Analizador Electrónico de Micropartículas

ELZONE-282PC. El diámetro medio (tamaño medio) se calculó mediante la Media Gráfica según Folk (1980). Los datos son representados en escala logarítmica  $\phi$  ( $\phi$ ) con el propósito de realizar la descripción del sedimento mediante numeración entera (Folk, 1980).

#### ANALISIS PALINOLOGICO

El polen de *Pinus radiata* fue analizado para obtener una comprobación de la cronología del  $^{210}\text{Pb}$ . Chile carecía de árboles de *P. radiata* hasta que fueron introducidos hacia finales del siglo XIX. En la comuna de San Pedro, la compañía Carbonífera de Lota estableció las primeras plantaciones comerciales de esta especie en 1885 (Aztorquiza, 1929; Contesse, 1987). Posteriormente, durante los años treinta, se propagaron ampliamente en el centro sur de Chile debido al incentivo estatal (Contesse, 1987; Donoso y Lara, 1996). Considerando lo anterior, el polen de *P. radiata* en Laguna Chica no puede ser más antiguo que 1880, así los depósitos de aquella época debiesen contener el polen más profundo. Por consiguiente, se buscó polen de *P. radiata* en 1 g de sedimento seco de cada estrato de LCH-1. Para separar el polen de la matriz se utilizaron técnicas palinológicas estándar (Faegri y Iversen, 1975; Dupré, 1992) y para su cuantificación, en granos por gramo de sedimento, se usaron los métodos de Anderson (1974) y Kempt *et al.* (1974).

### RESULTADOS

#### RAYOS X

La radiografía de LCH-1 muestra que el registro es adecuado para realizar estudios estratigráficos (Fig. 3A). No hay signos obvios de mezcla física o biológica (e.g., restos de organismos bentónicos o galerías de origen biológico) que pudieran haber redistribuido el  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , o polen después de su deposición. Por el contrario, LCH-1 muestra estratos horizontales que varían en espesor a través de la columna.

#### $^{210}\text{Pb}$

El inventario total de  $^{210}\text{Pb}_{\text{ox}}$  en la columna sedimentaria es de  $757 \text{ Bq m}^{-2}$ , lo que implica un flujo de  $^{210}\text{Pb}$  hacia los sedimentos de  $23,57 \text{ Bq m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ . Dicho flujo resulta ser bastante bajo, en comparación con otros lagos del hemisferio norte, como se discute más adelante.

En condiciones simples, donde la precipitación del  $^{210}\text{Pb}$  y la sedimentación son constantes a través del tiempo, la actividad del  $^{210}\text{Pb}$  en el registro

sedimentario declina constantemente con la profundidad desde un máximo, en el primer centímetro, hasta un valor constante en equilibrio con el  $^{226}\text{Ra}$  (Goldberg, 1963; Appleby y Oldfield, 1978). Así, el decrecimiento de la actividad del  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  estaría determinado sólo por la edad del depósito, la que controla su progresivo decaimiento.

En LCH-1 la actividad de  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  muestra una tendencia general a declinar con la profundidad (Fig. 3B). Sin embargo, el perfil presenta algunas fluctuaciones que se superponen a este patrón. El 'peak' de máxima actividad no se encuentra en la parte más alta de la columna, sino a 3 centímetros por debajo de la interface agua-sedimento. Si la llegada del isótopo es asumida como constante, esta tendencia sugiere que el lago ha experimentado cambios en las tasas de sedimentación. La concentración mínima relativa de  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  implica una máxima relativa en la tasa de sedimentación. Si se considera que una precipitación atmosférica constante de  $^{210}\text{Pb}$  produce un flujo constante hacia el fondo del lago, el aumento de la tasa de sedimentación diluirá la actividad del isótopo en el registro sedimentario (Crickmore *et al.*, 1990).

Al interpretar los datos de  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  con el modelo CRS, que considera una precipitación constante del isótopo, los primeros 15 centímetros de LCH-1 abarcan un poco más de un siglo (Fig. 3C). La fecha más antigua inferida desde el modelo, para los sedimentos a 15 cm de profundidad, es 1883. Mientras que el centímetro superficial se ajustó al año de 1996 (el año de muestreo), con la obtención de las fechas intermedias cada 1 cm. Esta serie cronológica es consistente con los datos de  $^{137}\text{Cs}$  y polen, como se expone abajo.

#### $^{137}\text{Cs}$

El inventario de  $^{137}\text{Cs}$  en el registro sedimentario LCH-1 es de  $461 \text{ Bq m}^{-2}$  (corregido a 1996). Este valor reflejaría que Laguna Chica ha estado expuesta a niveles medios-altos de precipitación radioactiva para el hemisferio sur (Appleby *et al.*, 1995).

El perfil de actividad de  $^{137}\text{Cs}$  (Fig. 3D) es dominado por un amplio 'peak' que concuerda con la cronología de  $^{210}\text{Pb}$ . La probable fecha de la cúspide es 1963, cuando el  $^{137}\text{Cs}$  alcanzó su máximo en la atmósfera. El 'peak' de  $^{137}\text{Cs}$  se corresponde con el período 1961-1968 de la cronología de  $^{210}\text{Pb}$ . La actividad declina por arriba del centímetro 6, proba-

blemente debido a que muy poco  $^{137}\text{Cs}$  ha sido inyectado a la atmósfera después de la firma del 'Nuclear Test-ban Treaty', en 1963 (Wan *et al.*, 1987; Robbins *et al.*, 1990).

Sin embargo, la sección inferior del perfil de  $^{137}\text{Cs}$  no se ajusta a la cronología de  $^{210}\text{Pb}$ . El  $^{137}\text{Cs}$  permanece detectable a profundidades que corresponden, según el  $^{210}\text{Pb}$ , a los años treinta. Estas fechas están al menos 15 años desfasadas; debido a que las pruebas de armamento nuclear produjeron muy poco  $^{137}\text{Cs}$  antes de los años cincuenta. Una posibilidad es que el  $^{137}\text{Cs}$  haya migrado algunos centímetros hacia abajo por difusión después de la deposición (Crusius y Anderson, 1995). Esta difusión pudo haber también ampliado el 'peak' que es asignado a 1963; sin embargo, es poco probable que la difusión hubiese movido este máximo hacia arriba o abajo.

#### POLEN

A pesar de la discordancia entre la cronología de  $^{210}\text{Pb}$  y la sección inferior del perfil de  $^{137}\text{Cs}$ , las fechas más antiguas del  $^{210}\text{Pb}$  son consistentes con la aparición del polen de *P. radiata* en el registro sedimentario (Fig. 3E). El polen, que aparece a una profundidad de 15-16 cm, podría provenir desde los árboles introducidos en 1885. De ser así, el registro polínico confirmaría la fecha de 1883 que se estimó, a partir de la data de  $^{210}\text{Pb}$ , para los 15 cm de profundidad de LCH-1.

#### TASAS DE SEDIMENTACION

De acuerdo al modelo CRS, la tasa neta de acumulación ha variado en un orden de magnitud, desde  $50 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  en 1883 a  $600 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  en 1968 (Fig. 3F). El perfil muestra tres pulsos de sedimentación durante el siglo XX. El primero comienza a finales del siglo XIX y alcanza su máximo hacia fines de los cuarenta ( $580 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ). Otro pulso comienza a inicios de los cincuenta ( $240 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) y logra su máximo a fines de los sesenta ( $600 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ). El evento más reciente, comienza alrededor de 1978 ( $260 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) y se mantiene durante los noventa ( $520 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ). Considerando los 15 cm de sedimento acumulado desde 1883 hasta 1996, la tasa media de sedimentación es de  $1,33 \text{ mm a}^{-1}$ . Si se toma en cuenta la masa acumulada en igual período de tiempo, la tasa media de acumulación másica es de  $300 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ .

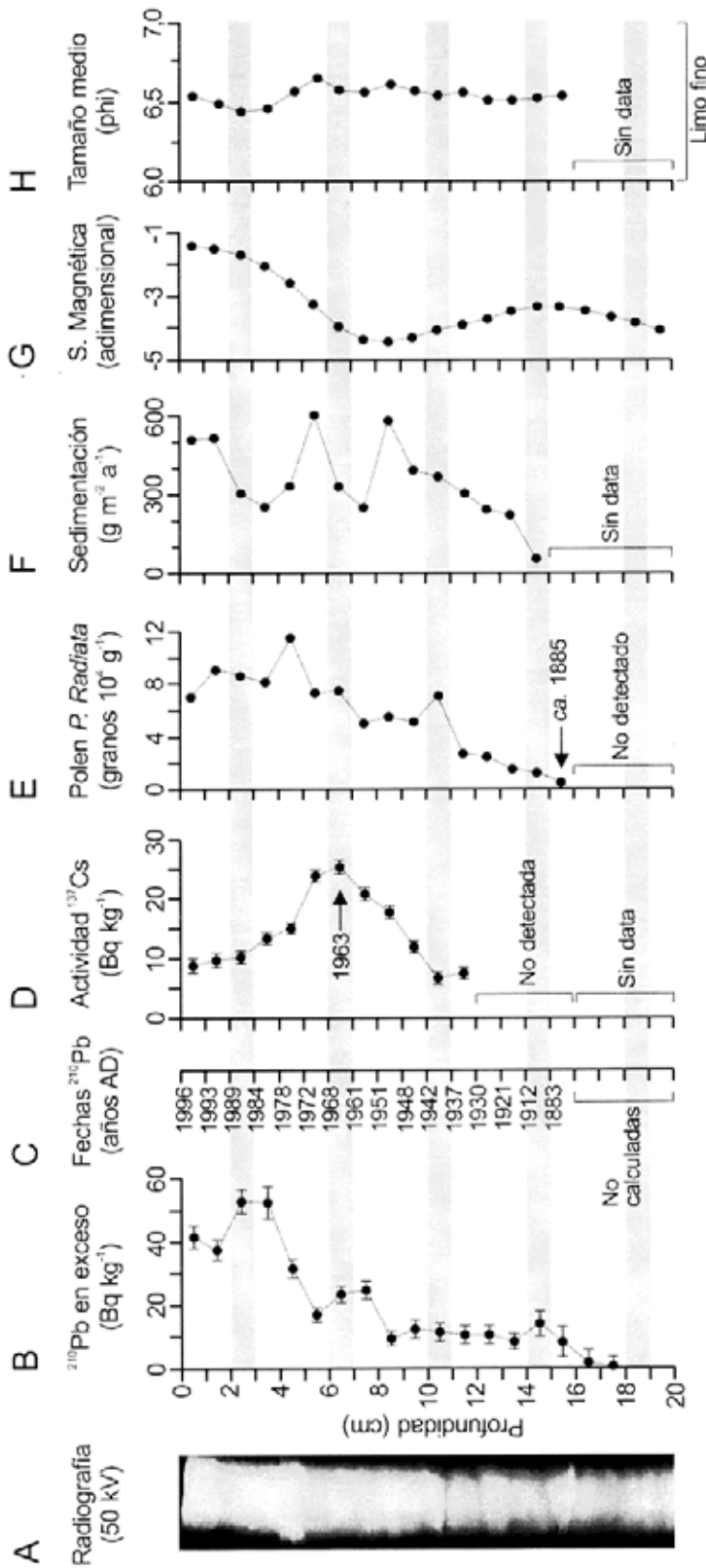


FIG. 3. Radiografía (A), actividad de  $^{210}\text{Pb}$  en exceso (B), modelo cronológico (C), actividad de  $^{137}\text{Cs}$  (D), concentración de polen de *P. radiata* (E), tasas de sedimentación (F), susceptibilidad magnética (G) y tamaño medio de las partículas (H), del registro sedimentario de Laguna Chica.

### SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA

El perfil de susceptibilidad magnética de LCH-2 (Fig. 3G) presenta un notorio incremento de los minerales ferromagnéticos en los sedimentos a partir de los años sesenta. Desde el siglo XIX hasta mediados del siglo XX estos minerales muestran una presencia relativamente constante, aunque con un amplio 'peak' hacia 1883. Sin embargo, a partir de fines de los sesenta, la tasa de sedimentación de partículas férricas presenta un incremento mucho más alto y constante que en el siglo anterior. Estos resultados indicarían que la cuenca del lago ha sufrido, durante el último medio siglo, un aumento de la energía erosional, que ha sido capaz de ir

transportando con el tiempo partículas más densas.

### CARACTERIZACION GRANULOMETRICA

El tamaño medio de las partículas que conforman al registro sedimentario ha sido bastante homogéneo a través del tiempo (Fig. 3H). Se trata de limos finos con diámetros medios que oscilan alrededor de 6,5  $\phi$ . A partir de los años setenta se aprecia una leve tendencia al aumento del tamaño, para disminuir nuevamente durante los noventa. A pesar de que el tamaño medio está relacionado indirectamente con la susceptibilidad magnética, las tendencias de ambos parámetros no parecieran tener comportamientos correlacionados.

## DISCUSION Y CONCLUSIONES

La presencia y distribución del isótopo natural  $^{210}\text{Pb}$  y del artificial  $^{137}\text{Cs}$  en el registro sedimentario de Laguna Chica están influenciadas por el accionar antrópico.

Por una parte, las concentraciones de  $^{210}\text{Pb}$  en el registro sedimentario han sido afectadas por la tendencia general al incremento de las tasas de sedimentación durante el último medio siglo. El aumento en la producción de sedimentos desde la cuenca, que no ha sufrido grandes cambios en sus precipitaciones, podría ser explicado observando el progresivo aumento del polen de *P. radiata*. Del perfil polínico se infiere un fuerte y sostenido cambio de uso del suelo: el reemplazo de vegetación nativa por plantaciones forestales, las que habrían acelerado el proceso erosivo de la cuenca.

Por otro lado, tanto la presencia como la distribución del  $^{137}\text{Cs}$  en los sedimentos de la laguna Chica de San Pedro, han estado controladas por las inyecciones del radioisótopo en la atmósfera terrestre. La columna sedimentaria registró la precipitación atmosférica global del  $^{137}\text{Cs}$ ; identificándose claramente el comienzo de las inyecciones, su incremento, su máxima presencia en la atmósfera ('peak' de 1963), y su progresiva declinación después de la firma del 'Nuclear Test-ban Treaty'. Debido a que se detectaron variaciones en las tasas de sedimentación del lago, es necesario considerar, que el 'peak' de  $^{137}\text{Cs}$ , asignado a 1963, podría responder más bien al fenómeno erosivo. La erosión de la cuenca pudo haber transportado una

mayor proporción de suelo con  $^{137}\text{Cs}$  al fondo del lago. No obstante, dos factores discrepan con la anterior hipótesis: i- las tendencias generales de las tasas de sedimentación y del polen de pino presentan un aumento sostenido, por lo que no pueden explicar la presencia de un simple valor máximo de  $^{137}\text{Cs}$  edáfico, y ii- si el 'peak' de  $^{137}\text{Cs}$  fue producto de la erosión, el registro debería presentar en realidad dos 'peaks', uno producido por el máximo de precipitación atmosférica y otro generado por la erosión; a menos que ambos procesos hayan sido simultáneos.

Como se mencionó en los resultados, Laguna Chica presenta un bajo flujo de  $^{210}\text{Pb}$  ( $24 \text{ Bq m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) en comparación con lagos del hemisferio norte, que tienen tasas por sobre los  $150 \text{ Bq m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  (Preiss *et al.*, 1996). Esta diferencia podría resultar de la baja proporción entre continentes y océanos en el hemisferio sur. El  $^{210}\text{Pb}$  atmosférico se genera por el decaimiento del  $^{222}\text{Rn}$ , que a su vez es producto del  $^{226}\text{Ra}$  presente en las rocas continentales (Appleby y Oldfield, 1992). Para Laguna Chica, y probablemente también para otras partes de la costa occidental de Sudamérica, el bajo flujo de  $^{210}\text{Pb}$  estaría controlado por las masas de aire del Pacífico. Este aire oceánico, que produce la lluvia en el área, transporta cantidades más bajas de  $^{210}\text{Pb}$  que las masas del hemisferio norte, donde los continentes cubren una mayor proporción de la superficie terrestre.



Inversamente, estas mismas condiciones geográficas favorecerían la precipitación del  $^{137}\text{Cs}$  en Laguna Chica. Las masas del Pacífico, después de recorrer gran parte del océano, se encuentran, en su viaje hacia el este, con las estribaciones cordilleranas occidentales de Chile, en este caso Nahuelbuta, donde se genera un aumento de las precipitaciones debido a la convección de dichas masas de aire. De este modo, el  $^{137}\text{Cs}$ , cuya precipitación es controlada a escala local por la lluvia, precipita sobre el continente después de haber sido acumulado en la cuenca del Océano Pacífico. Así, el

inventario de  $^{137}\text{Cs}$  reconocido para Laguna Chica ( $461 \text{ Bq m}^{-2}$ ) resulta ser relativamente alto, en comparación con otros estudios realizados en el hemisferio sur, que reportan concentraciones inferiores a los  $400 \text{ Bq m}^{-2}$  en la Antártica y Australia (Longmore *et al.*, 1983; Appleby *et al.*, 1995). Sin embargo, si la comparación es hecha con lagos del hemisferio norte, con inventarios por sobre los  $1.000 \text{ Bq m}^{-2}$  (Pennington *et al.*, 1973), el inventario de Laguna Chica es bajo. Esto lógicamente responde a la localización de las inyecciones del radioisótopo, generadas principalmente en el hemisferio norte.

### AGRADECIMIENTOS

Investigación financiada por los proyectos Fondecyt No. 1980529, 1010640 y DIUC No. 96.310.021.-1.1. Los autores agradecen al Dr. M. Pourchet (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (Centro National de la Recherche Scientifique), Grenoble, Francia), al Dr. H. Brueckner (Universidad de Marburg, Ale-

mania) y a I. Tomicic y O. Piñones (Comisión Chilena de Energía Nuclear) por la infraestructura facilitada. Especiales agradecimientos, por sus comentarios y sugerencias científicas a los Dres. J.A. Morales, R. García (Universidad de Huelva, España), E. Piovano (Universidad Nacional de Córdoba) y S. Ribeiro (Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina).

### REFERENCIAS

- Agudo, E.G. 1998. Global distribution of  $^{137}\text{Cs}$  inputs for soil erosion and sedimentation studies. In Use of  $^{137}\text{Cs}$  in the study of soil erosion and sedimentation (IAE.; editor). *International Association of Hydrological Sciences*, Publication 1028, p. 117-121. Vienna, Austria.
- Aguirre, L.; Hervé, F.; Godoy, E. 1972. Distribution of metamorphic facies in Chile. *Krystallinikum*, Vol. 9, p. 7-19. Praga.
- Anderson, T.W. 1974. The chestnut pollen decline as a time horizon in lake sediments in eastern North America. *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 11, p. 678-685.
- Appleby, P.G.; Oldfield, F. 1978. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  to the sediment. *Catena*, Vol. 5, p. 1-8.
- Appleby, P.G.; Oldfield, F. 1992. Application of Lead-210 to sedimentation studies. In Uranium-series disequilibrium. Applications to earth, marine and environmental sciences. (Ivanovich, M.; Harmon, R.; editors). *Oxford Science Publication*, p. 731-778. Oxford.
- Appleby, P.G.; Jones, V.J.; Ellis-Evans, J.C. 1995. Radiometric dating of lake sediments from Signy Island. *Journal of Paleolimnology*, Vol. 13, p. 179-191.
- Appleby, P.G. 1997. Sediment records of fallout radionuclides and their applications to studies of sediment-water interactions. *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. 99, p. 573-586.
- Axelsson, V. 1983. The use of X-ray radiographic methods in studying sedimentary properties and rates of sediments accumulation. *Hydrobiologia*, Vol. 103, p. 65-69.
- Aztorquiza, O. 1929. Lota, antecedentes históricos con una monografía de la Compañía Minera e Industrial de Chile. *Sociedad Imprenta y Litografía Concepción*, 44 p. Concepción.
- Binford, M.W.; Brenner, M.; Engstrom, D.R. 1991. Patrones de sedimentación temporal en la zona litoral del Huinamarca. In El lago Titicaca (Dejoux, C.; Iltis, A.; editores). *ORSTOM-Hisbol*, p. 47-57. La Paz, Bolivia.
- Cecioni, A.; Quezada, J. 1994. Síntesis preliminar de la geología urbana de Concepción. In *Congreso Geológico Chileno*, No. 7, *Actas*, Vol. 1, p. 595-599. Concepción.
- Cisternas, M.; Martínez, P.; Oyarzún, C.; Debels, P. 1999. Caracterización del proceso de reemplazo de vegetación nativa por plantaciones forestales en una cuenca

- lacustre de Nahuelbuta. *Revista Chilena de Historia Natural*, Vol. 72, p. 661-676.
- Cisternas, M.; Torres, L.; Urrutia, R.; Araneda, A.; Parra, O. 2000. Comparación ambiental, mediante registros sedimentarios, entre las condiciones prehispánicas y actuales de un sistema lacustre. *Revista Chilena de Historia Natural*, Vol. 73, p. 151-162.
- Contesse, D. 1987. Apuntes y consideraciones para la historia del Pino radiata en Chile. *Academia Chilena de la Historia, Boletín*, Vol. 97, p. 351-373.
- Crickmore, M.J.; Tazioli, P.G.; Appleby, P.G.; Oldfield, F. 1990. The use of nuclear techniques in sediment transport and sedimentation problems. *International Hydrological Programme*, 170 p. Unesco, Paris.
- Crusius, J.; Anderson, R.F. 1995. Evaluating the mobility of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{210}\text{Pb}$  from their distributions in laminated lake sediments. *Journal of Paleolimnology*, Vol. 13, p. 119-141.
- Donoso, C.; Lara, A. 1996. Utilización de los bosques nativos en Chile: pasado, presente y futuro. In *Ecología de los bosques nativos de Chile* (Armesto, J.; Villagrán, C.; Arroyo, M.; editores). Editorial Universitaria, p. 234-255. Santiago.
- Dupré, M. 1992. Palinología. *Geoforma Ediciones*, 48 p. Zaragoza, España.
- Eakins, J.D.; Morrison, R.T. 1978. A new procedure for the determination of lead-210 in lake and marine sediments. *International Journal of Applied Radioactive Isotopes*, Vol. 29, p. 531-536.
- Eakins, J.D. 1983. The  $^{210}\text{Pb}$  technique for dating sediments, and some applications. *United Kingdom Atomic Energy Agency*, 22 p. Harwell, Oxfordshire.
- Eyman, L.D.; Kevern, N.R. 1975. Cesium-137 and stable cesium in a hypereutrophic lake. *Health Physics*, Vol. 28, p. 549-555.
- Faegri, K.; Iversen, J. 1975. Textbook of pollen analysis. *Hafner*, 220 p. New York.
- Folk, R. 1980. Petrology of sedimentary rocks. *Hemphill Publishing Co.*, 184 p. Texas.
- Francis, C.W.; Brinkley, F.S. 1976. Preferential adsorption of  $^{137}\text{Cs}$  to micaceous minerals in contaminated freshwater sediment. *Nature*, Vol. 260, p. 511-513.
- Goldberg, E.D. 1963. Geochronology with lead-210. In *Symposium on Radioactive Dating*. (IAEA.; editor). *International Association of Hydrological Sciences Publication*, p. 122-130. Vienna, Austria.
- Hasanen, E. 1977. Dating of sediments, based on  $^{210}\text{Pb}$  measurements. *Radiochemical and Radioanalytical Letters*, Vol. 31, p. 207-214.
- Hervé, F. 1977. Petrology of the crystalline basement of the Nahuelbuta mountains, south central Chile. In *Comparative studies on the geology of the Circum-Pacific orogenic belt in Japan and Chile* (Ishikawa, T.; et al., editors) *Japanese Society for the Promotion of Sciences*, p. 1-51.
- Kempt, A.L.; Anderson, T.W.; Thomas, R.L.; Mudrochova, A. 1974. Sedimentation rates and recent sediment history of lakes Ontario, Erie and Huron. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 44, p. 207-218.
- Longmore, M.E.; O'Leary, B.M.; Rose, C.W. 1983. Cesium-137 profiles in the sediment of a partial-meromictic lake on Great Sandy Island, Queensland, Australia. *Hydrobiologia*, Vol. 103, p. 21-27.
- Molineux, L.; Thompson, R. 1973. Rapid measurement of the magnetic susceptibility of long cores of sediment. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, Vol. 32, p. 479-481.
- Oldfield, F.; Barnosky, C.; Leopold, B.Y.; Smith, J.P. 1983. Mineral magnetic studies of lake sediments. *Hydrobiologia*, Vol. 103, p. 37-44.
- Olsen, C.R.; Cutshall, N.H.; Larsen, I.L. 1982. Pollutant-particle associations and dynamics in coastal marine environments: a review. *Marine Chemistry*, Vol. 11, p. 501-533.
- Parra, O. 1989. La eutrofización de la Laguna Grande de San Pedro, Concepción, Chile: un caso de estudio. *Ambiente y Desarrollo*, Vol. 5, p. 117-136.
- Pennington, W.; Cambray, R.S.; Fisher, E.M. 1973. Observations on lake sediments using  $^{137}\text{Cs}$  fallout as a tracer. *Nature*, Vol. 242, p. 324-326.
- Piñones, O.; Tomicic, I. 1995. Estudio de los niveles radiológico-ambientales en Chile durante el periodo 1966-1994. *Nucleotécnica*, Vol. 29, p. 67-82.
- Preiss, N.; Méliers, M.; Pourchet, M. 1996. A compilation of data on lead-210 concentration in surface air and fluxes at the air-surface and water-sediment interfaces. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, p. 28847-28862.
- Radakovitch, M.O. 1995. Étude du transfert et du dépôt du matériel particulaire par le  $^{210}\text{Po}$  et le  $^{210}\text{Pb}$ . Application aux marges continentales du Golfe de Gascogne (NE Atlantique) et du Golfe du Lion (NW Méditerranée). Memoria de Título (Inédito). *Université de Perpignan*, 85 p.
- Robbins, J.A.; Murdoch, A.; Oliver, B.G. 1990. Transport and storage of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in sediments of Lake St. Clair. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 47, p. 572-587.
- Rummery, T.A. 1983. The use of magnetic measurements in interpreting the fire histories of lake drainage basins. *Hydrobiologia*, Vol. 103, p. 53-58.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). 1993. Sources and effects of ionizing radiation. (UNSCEAR.; editor). *United Nations Organization*, 129 p. California.
- Wan, G.J.; Stantshi, P.H.; Sturm, M.; Farrenkothen, K.; Lueck, A.; Werth, E.; Shuler, C. 1987. Natural ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$ ) and fallout ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ) radionuclides as geochemical tracers of sedimentation in Greifensee, Switzerland. *Chemical Geology*, Vol. 63, p. 181-196.
- Walling, D.E.; Bradley, S.B. 1990. Some applications of caesium-137 measurements in the study of erosion, transport and deposition. In *Variability in stream erosion and sediment transport. Proceedings of the Canberra Symposium* (IAEA.; editors). *International Association of Hydrological Sciences Publication*, p. 125-132.

Oxfordshire, England.

Whicker, J.J.; Ward-Whicker, F.; Jacobi, S. 1994.  $^{137}\text{Cs}$  in sediments of Utah and reservoirs: effects of elevation, sedimentation rate and fallout history. *Journal of*

*Environmental Radioactivity*, Vol. 23, p. 265-283.

Yu, L.; Oldfield, F. 1989. A multivariate mixing model for identifying sediment source from magnetic measurement. *Quaternary Research*, Vol. 32, p. 168-181.