

# Variaciones históricas en las tasas de erosión-sedimentación de un cuerpo lacustre antropizado: Utilización de geocronología radioisotópica

MARCO CISTERNAS, ALBERTO ARANEDA,  
OSCAR RETAMAL y ROBERTO URRUTIA  
Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción

## RESUMEN

*En esta investigación se estudian, mediante geocronología radioisotópica ( $Pb^{210}$ ), las variaciones históricas en el proceso de erosión-sedimentación en Laguna Chica de San Pedro, VIII Región. Las estimaciones cronológicas indican que durante los últimos 100 años, el aporte de sedimentos desde la cuenca de drenaje osciló drásticamente en un orden de magnitud. Se concluye que las variaciones son producto de los cambios históricos en el uso del suelo. Finalmente, se proponen tres períodos históricos que habrían provocado el aumento de la erosión de los suelos en la cuenca.*

## ABSTRACT

*In this study, the historical variations in the erosional-sedimentation process in the "Laguna Chica de San Pedro" (VIII Región), are studied using lead<sup>210</sup> geochronology. The results indicate that over the last century, the sediment supply from the drainage basin fluctuated drastically in an order of magnitude. It is concluded that this variations are the result of the historical changes in the land use. Finally, three historic periods are proposed which would have caused an increase in the erosion in the basin soils.*

## 1. INTRODUCCION

La reconstrucción histórica de los efectos del hombre sobre el ambiente que lo rodea evidencia que el período de mayor impacto han sido los últimos siglos. Sin duda alguna, el explosivo desarrollo industrial de la civilización occidental, desde el siglo pasado hasta la fecha, ha alterado significativamente al planeta, afectando los ecosistemas y los factores abióticos originales.

En la actualidad, los estudios ambientales se preocupan principalmente del daño contemporáneo, es decir, de lo que hoy nos afecta directamente. Las investigaciones que se enfocan en este sentido tienen una perspectiva limitada, ya que sólo obtienen una "fotografía" del sistema observado. Una fotografía tomada en un segundo respecto de los cientos de años en que el hombre ha estado afectando al sistema. Desde este punto de vista, es imposible conocer realmente en qué fase se encuentra nuestro sistema respecto a toda su evolución. Sólo traspasando esta concepción "estático-temporal" de los sistemas naturales, será posible proyectar correctamente el futuro de nuestro entorno.

Rescatando esta dinámica temporal de los problemas ambientales, durante la última década se ha valorado el papel de "registrador histórico" que tienen los sedimentos, especialmente los de

origen lacustre (Auer *et al.*, 1996; Spliethoff & Hemond, 1996). Los sedimentos, que lentamente decantan, archivan entre sus capas valiosa información del accionar humano sobre el medio. Así, se convierten en la base necesaria para reconstruir muchos aspectos de este impacto, sea para estimar el ritmo del cambio o para establecer una línea de base en los programas de monitoreo ambiental.

Recientemente, gran cantidad de geógrafos, especialmente los pertenecientes a las escuelas inglesa y australiana, han comenzado a utilizar, tratando de alejarse de los estudios meramente descriptivos, metodologías experimentales para la evaluación de los procesos erosivos históricos, especialmente sobre registros sedimentarios lacustres (Appleby *et al.*, 1985; Battarbee *et al.*, 1985; Appleby & Oldfield, 1992; Olley & Murray, 1994; Saynor *et al.*, 1994; Wallbrink *et al.*, 1994; Appleby *et al.*, 1995). Entre las metodologías sedimentológicas más utilizadas, en el estudio de los registros lacustres, el isótopo  $Pb^{210}$  es reconocido como una poderosa herramienta para estimar las tasas de erosión-sedimentación (Pouchet & Pinglot, 1989; Dorr, 1995; Crusius & Anderson, 1995a).

Dentro de este marco, la presente investigación pretende realizar, a través de los registros sedimentarios, un primer reconocimiento experi-

mental de las variaciones históricas de las tasas de erosión-sedimentación en un cuerpo lacustre localizado en las estribaciones de la Cordillera de Nahuelbuta.

## 2. MATERIALES Y METODOS

### 2.1 Área de estudio

En la nueva comuna de San Pedro (VIII Región), ubicada al sur de la ciudad de Concepción, se encuentra el sistema lacustre de San Pedro, conformado por las lagunas Grande y Chica de San Pedro (Figura 1). Esta última se inserta en la parte noroccidental de la Cordillera de Nahuelbuta, al sur del río Biobío. Hacia el oriente se encuentra flanqueada por un cordón montañoso que alcanza una altitud aproximada de 350 m y del cual nacen pequeños valles y quebradas que desaguan en la laguna. En el flanco occidental se presenta una extensa llanura, que represa a las aguas, sobre la que se asienta una zona urbana. Su hoya hidrográfica, con un área de 4,5 km<sup>2</sup>, se desarrolla exclusivamente en la falda occidental de la cordillera, recibiendo aportes principalmente de origen pluvial. Su espejo de agua tiene una superficie de 0,87 km<sup>2</sup>, con una profundidad máxima de 17 m (Parra, 1989). En la actualidad se utiliza residencialmente, como balneario y centro de deportes náuticos durante el verano (Leone *et al.*, 1993).

Geomorfológicamente, la zona en que se encuentra el sistema lagunar de San Pedro es de contacto entre dos de las cuatro unidades de relieve tradicionales en Chile. La Cordillera de la Costa, representada por el bloque solevantado de Nahuelbuta y la planicie Costera representada por el sistema de planos sedimentarios fluvio-marinos. El bloque de Nahuelbuta alcanza alturas máximas de 400 m.s.n.m. y pendientes variables desde 0°, en las mesetas, hasta 45° en las riberas de los cuerpos lacustres (Ilabaca, 1988). El plano sedimentario, que represó las aguas del sistema lagunar, corresponde a los sectores bajos conformados por arenas de origen volcánico (Leone *et al.*, 1993).

La vegetación de la cuenca de la Laguna Chica de San Pedro se inserta en la transición entre las regiones Meso e Higromórfica (Di Castri, 1968). El bosque esclerófilo se contacta con el de roble-laurel-lingue que se desarrolla más al sur, produciéndose desde el punto de vista vegetacional una riqueza de especies. Este bosque, al ser talado, origina matorrales esclerófilos, los cuales a su vez, al ser sobreexplotados, se convierten en comunidades arbustivas bajas. Estos hábitats son rápidamente colonizados por malezas introducidas

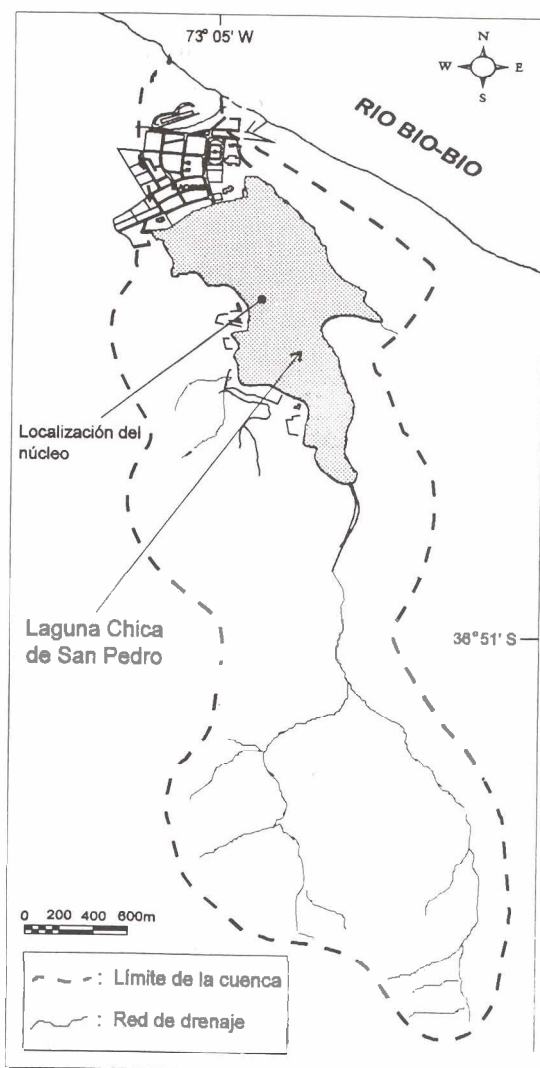


Figura 1: Localización del área de estudio y ubicación del sitio de muestreo.

como retamilla, las que forman comunidades asociadas a renovales del antiguo bosque esclerófilo. Sobre esta situación vegetacional y edáfica se desarrolla actualmente el proceso de reforestación artificial. Actualmente, la vegetación original presenta una tendencia notoriamente degradativa hacia comunidades del tipo matorral y pastizal, degradación que se traduce en problemáticas de erosión de los suelos (Barrientos, 1990).

### 2.2. Fundamentación metodológica de la geocronología isotópica

En general, la geocronología isotópica trata de determinar, cuantitativamente, la distribución vertical de un radioisótopo contenido en una columna de sedimento. Debido a su desintegración

natural, los sedimentos más antiguos, situados a niveles más profundos, contienen una proporción menor de dicho radioisótopo (Crickmore *et al.*, 1990). Los sedimentos lacustres contienen isótopos naturales y artificiales, los primeros son generados por el bombardeo de rayos cósmicos de la atmósfera terrestre (*e.g.*  $C^{14}$  y  $Be^7$ ). Los radioisótopos artificiales han sido introducidos al ambiente como resultado de las pruebas de armas y accidentes nucleares (*e.g.*  $Cs^{134}$ ,  $Cs^{137}$ ,  $Pu^{239}$ ,  $^{240}$ ; Appleby & Oldfield, 1992).

El isótopo natural más utilizado para datar a una escala de tiempo que represente el impacto del desarrollo preindustrial e industrial del hombre es el  $Pb^{210}$ . Este isótopo se encuentra en forma natural en los sedimentos lacustres, como un resultado del decaimiento del  $U^{238}$ . Su vida media de 22,26 años, lo hace especialmente adecuado para datar sedimentos depositados en los últimos 150 años. La actividad del  $Pb^{210}$ , en cada capa de sedimento, declina con su profundidad y edad de acuerdo con la ley de decaimiento radiactivo, pudiendo ser utilizado para fechar cada estrato (Eakins, 1983). De acuerdo a lo anterior, la actividad del  $Pb^{210}$ , en una columna de sedimento, debiese presentar una disminución exponencial hacia las capas más profundas (Figura 2).

### 2.3 Metodologías analíticas

A través de buceo autónomo se recolectó un núcleo de sedimento, mediante un tubo de plexiglás de 40 cm de longitud por 5 cm de diámetro, desde el sector más profundo del lago. Inmediatamente después de colectarse la columna se extrajo del tubo, mediante un émbolo, seccionándola a intervalos de 1 cm. Cada muestra (sección) fue secada por 24 horas a una temperatura de 105° C (Binford *et al.*, 1991).

Posteriormente, las muestras fueron trasladadas al Laboratoire de Glaciologie et Geophysique de l'Environnement (CNRS) en la Université Joseph-Fourier, Grenoble, Francia, para la obtención del inventario isotópico del núcleo de sedimento de Laguna Chica de San Pedro. Cada muestra se atacó con ácidos para la extracción del radionúclido  $Po^{210}$  ("nieto radiactivo" del  $Pb^{210}$ ), siendo posteriormente electrodepositado en una placa de plata pura. Finalmente, cada lámina se sometió a conteo, mediante un espectrómetro Canberra Quad Alfa 7404, para medir la emisión de partículas alfa (Radakovitch, 1995).

Los datos de actividad del isótopo  $Pb^{210}$  se utilizaron para alimentar el modelo conocido como Tasa de Aporte Constante o *Constant Rate of Supply* (CRS Model; Appleby & Oldfield, 1978, 1992), obteniéndose la geocronología en años (datación de cada estrato de sedimento) y

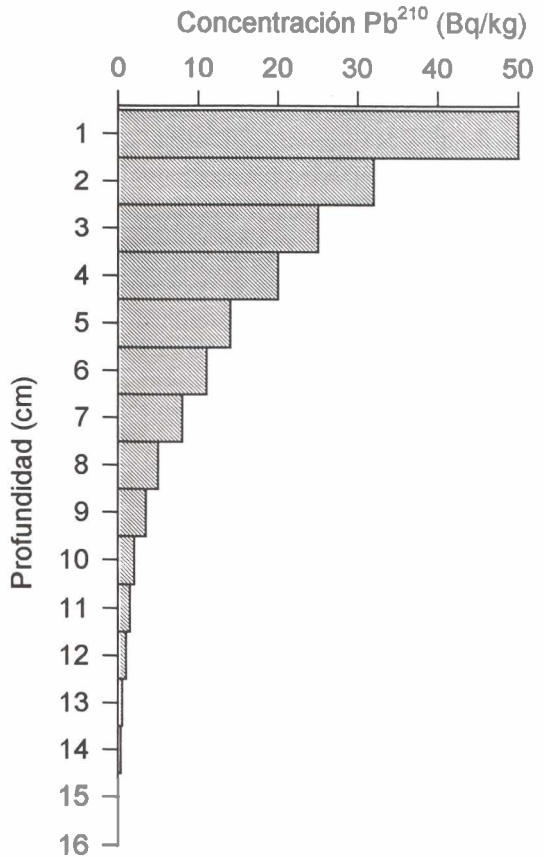


Figura 2: Perfil de decaimiento radiactivo teórico del isótopo  $Pb^{210}$  en los sedimentos.

las tasas de sedimentación en gramos de sedimento seco que llegan a un centímetro cuadrado del fondo del lago durante un año ( $gr \cdot cm^{-2} \cdot año^{-1}$ ).

### 3. RESULTADOS

En la Figura 3 se observan los resultados del análisis isotópico de la columna de sedimento. El eje vertical representa la profundidad de la columna de sedimento, desde la interfase agua-sedimento (0 cm) hacia los estratos más profundos (18 cm). La horizontal muestra la actividad del radioisótopo  $Pb^{210}$  en cada estrato de sedimento.

Se reconoce que el perfil de actividad no se comporta de acuerdo a la tendencia exponencial esperable (Figura 1). Por el contrario, presenta importantes variaciones en la curva, fluctuando entre 52,7 Bq/kg, en el centímetro 3, y 0,5 Bq/kg en el centímetro 18.

Como resultado de la aplicación del modelo geocronológico CRS se obtiene la edad, en años, de cada estrato de sedimento. En la Figura 4 se grafican los resultados obtenidos de ambas variables (edad y profundidad). La alta correlación

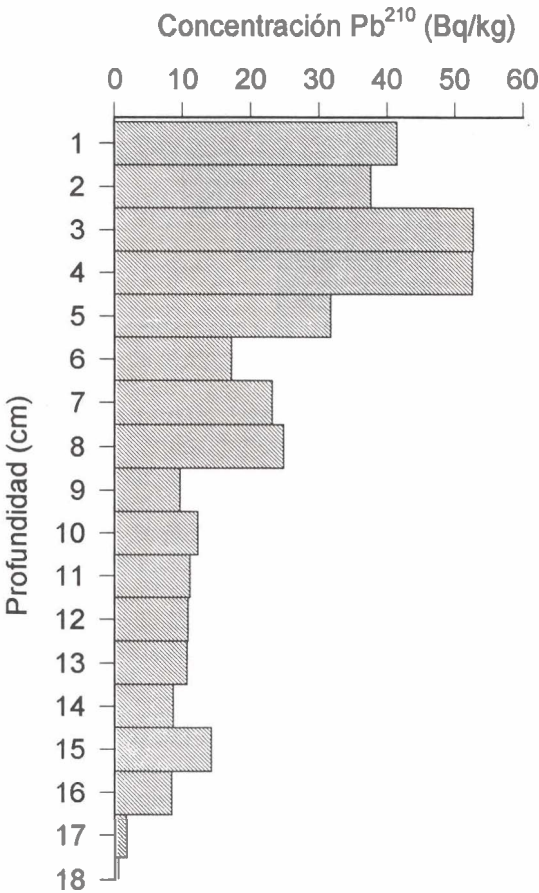


Figura 3: Perfil de decaimiento radiactivo del isótopo Pb<sup>210</sup> en la columna de sedimento de Laguna Chica de San Pedro.

( $r = 0,97$ ) valida la data cronológica lograda, pues indica que a medida que se profundiza en la columna de sedimento, se encuentran sedimentos más antiguos.

A partir de esta consideración, se obtuvieron las tasas de sedimentación y la geocronología en los diferentes centímetros (Figura 5). Las estimaciones para las tasas de sedimentación indican que durante los últimos 100 años el aporte de sedimentos desde la cuenca de drenaje osciló drásticamente, en un orden de magnitud, entre  $5,20 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$  y  $60,00 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ . Las variaciones temporales en las tasas de sedimentación demuestran la existencia de tres eventos erosivos claramente diferenciables. El primero comienza aproximadamente en 1883 ( $5,20 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ) alcanzando su máximo desarrollo hacia 1948 ( $58,10 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ). Posteriormente, comienza otro episodio en 1951 ( $24,30 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ) presentando los más altos valores durante 1968 ( $60,00 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ). Finalmente, el último evento se inicia hacia 1978 ( $26,10 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ), aumentando hasta la actualidad ( $52,00 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ).

Si sobre estos resultados se aplican algunos supuestos es posible obtener las tasas de erosión históricas de la cuenca. Los supuestos necesarios son: a) El proceso de sedimentación es homogéneo en todo el espejo de agua. b) El proceso de erosión es homogéneo en toda la cuenca de drenaje, y c) Todo el material erosionado en la cuenca alcanza el fondo del lago. De este modo, considerando que la superficie de la cuenca mide  $4,5 \text{ km}^2$  y el espejo de agua cuenta con  $0,87 \text{ km}^2$ , se estima que la tasa de erosión de la cuenca ha fluctuado dramáticamente entre  $0,1 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  y  $1,16 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ .

### 5. DISCUSION

Las drásticas variaciones reconocidas en las tasas de erosión-sedimentación en la Laguna Chica de San Pedro, son probablemente el resultado del accionar humano sobre la cuenca durante el último siglo. Así lo demuestran algunos autores que, utilizando metodologías geocronológicas, han reconocido similares resultados en sectores altamente intervenidos, así por ejemplo, en Ingle-

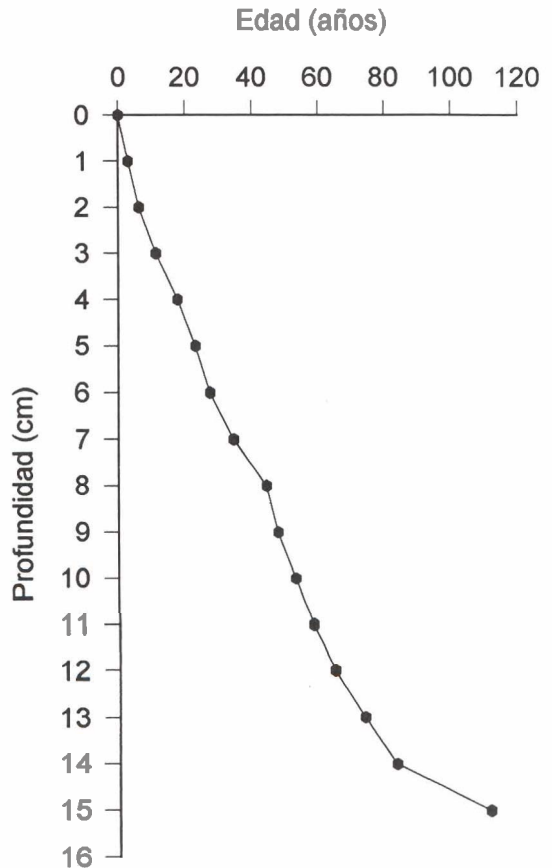


Figura 4: Perfil de edad y profundidad para los sedimentos de Laguna Chica de San Pedro.

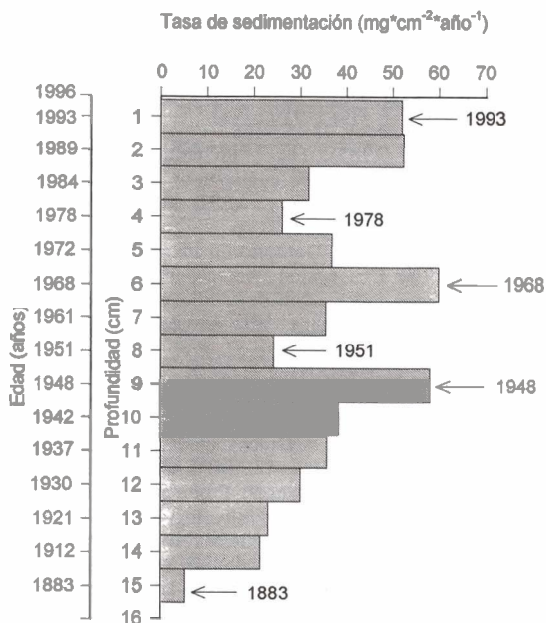


Figura 5: Tasas de sedimentación y geocronología estimadas para Laguna Chica de San Pedro.

terra, durante los últimos 15 años, se han realizado programas de reforestación sobre suelos con características de turberas, por lo que se ha requerido canalizar los terrenos para su drenaje. Battarbee *et al.* (1985) evaluaron el impacto de este proceso sobre las tasas de erosión, mediante la comparación de las tasas de sedimentación entre las cuencas lacustres reforestadas y las no perturbadas. Concluyen que en las cuencas no canalizadas las tasas de erosión habían permanecido constantes, sin embargo en las canalizadas se observaron bruscas variaciones en las tasas de sedimentación.

En un trabajo similar, realizado en Finlandia (Liehu *et al.*, 1986), orientado a evaluar los efectos de la canalización de turberas sobre los lagos, se reconocen las relaciones entre tasas de sedimentación y uso del suelo destacando la gran influencia que tuvo la depresión económica sobre la agricultura, y por ende sobre las tasas de erosión, durante la Segunda Guerra Mundial. Otro estudio (Oldfield & Thompson, 1978), realizado en Papúa, Nueva Guinea, presenta similares relaciones. Previamente muestreada la cuenca de drenaje, para reconstruir los cambios de uso del suelo, y apoyados con evidencia histórica, los autores concluyen que las variaciones en las tasas de erosión son producto de la intensificación agrícola de subsistencia, específicamente, con la siembra de *Ipomea batatas* (papa dulce).

En América Latina, Binford *et al.* (1991) realizaron estudios de tasas de acumulación de sedi-

mentos en el lago Titicaca, Bolivia. Mediante el fechamiento de un núcleo de sedimento, reconocen dos episodios sedimentarios en el último siglo. Determinan un aumento de las tasas de sedimentación hace 106 años, que declinan en las décadas siguientes, posteriormente comienzan nuevamente a aumentar hacia 1950. Los autores relacionan estos comportamientos a dos situaciones históricas que coinciden con los valores extremos; un período de bajo nivel en las aguas del lago y los cambios introducidos a los sistemas agrícolas por la última reforma agraria boliviana. A similares resultados, también en el lago Titicaca, llegan las últimas investigaciones de Pourchet *et al.*, (1994).

De acuerdo a los antecedentes, las variaciones reconocidas para Laguna Chica de San Pedro indicarían la ocurrencia de tres eventos erosivo-sedimentarios, reflejo de drásticos cambios en el uso del suelo de la cuenca. Preliminarmente, en base a la recopilación histórica básica, es posible proponer tres diferentes fases en la historia "ambiental" de la Laguna. La primera fase correspondería a lo que es posible denominar degradación antrópica del bosque nativo, caracterizado principalmente por actividades de tala y quemadas, para realizar siembras. La segunda fase respondería a la preparación del suelo para las primeras plantaciones forestales. Finalmente, la tercera fase reflejaría al activo proceso de crecimiento urbano desarrollado en la cuenca de la laguna.

## 6. CONCLUSIONES

- A partir de las tasas de sedimentación obtenidas, se concluye que han existido dramáticos cambios en los procesos de erosión-sedimentación de Laguna Chica de San Pedro.
- Se propone que las variaciones reconocidas son producto de los cambios históricos en el uso del suelo sobre la cuenca de drenaje, modificando, ante cada intervención, los montos de erosión del suelo.
- Se proponen tres períodos históricos, que habrían provocado el aumento de la erosión en la cuenca. La primera fase, desde 1883 a 1948, respondería a la degradación antrópica del bosque nativo. Desde 1951 a 1968 habría existido una fase preparatoria para plantaciones forestales, y finalmente, el tercer período respondería a los efectos provocados por el hombre al desarrollar proyectos habitacionales.
- Finalmente, se puede concluir que es necesario, junto a la utilización de metodologías geocronológicas isotópicas, utilizar las fuentes históricas disponibles, con el fin de corroborar la data obtenida experimentalmente.

## 7. AGRADECIMIENTOS

La presente investigación es parte de los proyectos de investigación DIUC P.I. N° 96.310.021-1.1 y Fondecyt N° 1960600. Los autores desean expresar su agradecimiento por la valiosa colaboración a: Felipe Ríos, Jorge Vergara, Patricia Martínez y Olaya Martínez. Agradecimientos especiales al Dr. Michel Pourchet del Laboratoire de Glaciologie et Geophysique de l'Environnement (CNRS) en la Université Joseph-Fourier, Grenoble, Francia.

## BIBLIOGRAFIA

- APPLEBY P. G. & F. OLDFIELD (1978): The calculation of Lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  to the sediment. *Catena* 5: 1-8.
- APPLEBY P.G.; J. A. DEARING & F. OLDFIELD (1985): Magnetic studies of erosion in a Scottish lake catchment: Part I, core chronology and correlation. *Limnol. Oceanogr.*, 30:1144-1153.
- APPLEBY P.G. & F. OLDFIELD (1992): Application of Lead-210 to sedimentation studies. En: Uranium-series disequilibrium. Applications to earth, marine and environmental sciences 2th. Edition. (M. Ivanovich and R. Harmon Eds.) Oxford Science Publication. 910 pp.
- APPLEBY P.G.; V.J. JONES & J.C. ELLIS-EVANS (1995): Radiometric dating of lake sediment from Signy Island (maritime Antarctic): evidence of recent climatic change. *Journal of Paleolimnology*, 13: 179-191.
- AUER, M.; A. JOHNSON; M. PENN & S. EFFLER (1996): Pollutant sources, depositional environment, and surficial sediments of Onongada lake, NY. *J. Environ. Qual.*, 25:46-55.
- BARRIENTOS, J. C. (1990): Estructura dinámica de la vegetación en la hoya hidrográfica de la laguna Chica de San Pedro. Facultad de Cs. Biológicas y Recursos Naturales, Universidad de Concepción. 23 pp.
- BATTARBEE R.W.; P.G. APPLEBY; K. ODELL & R.J.FLOWER (1985):  $\text{Pb}^{210}$  dating of Scottish lakes sediments, afforestation and accelerated soil erosion. *Earth Surf. Proc. Landf.*, 10: 137-142.
- BINFORD, M.W., M. BRENNER & D.R. ENGSTROM (1991): Patrones de sedimentación temporal en la zona litoral del Huiñaimarca. En: El lago Titicaca. C. Dejoux & A. Iltis (Eds.). ORSTOM-Hisbol, La Paz, Bolivia. 584 pp.
- CRICKMORE M.J., P.G. TAZIOLI, P.G. APPLEBY & F. OLDFIELD (1990): The use of nuclear techniques in sediment transport and sedimentation problems. Technical Documents in Hidrology. International Hydrological Programme IHP-III-5. UNESCO, Paris. 170 pp.
- CRUSIUS, J. & R.F. ANDERSON (1995A): Sediment focusing in six small lakes inferred from radionuclide profiles. *Journal of Paleolimnology*, 13: 143-155.
- DI CASTRI, F. (1968): Esbozo ecológico de Chile. In *Biologie de L'Amérique australe*. Deboutteville, C. & E. Rapoport (Eds.). Centre National de la Recherche Scientifique. 34 pp.
- DORR, H. (1995): Application of  $^{210}\text{Pb}$  in soils. *Journal of Paleolimnology*, 13:157-168.
- EAKINS, J.D. (1983): The  $^{210}\text{Pb}$  technique for dating sediments, and some applications. United Kingdom Atomic Energy Agency. AERE (R 10821) Harwell, Oxfordshire, England. 22 pp.
- ILABACA, G. (1978): Transgresión marina reciente en el litoral de Concepción. Antecedentes morfológicos. Seminario taller sobre desarrollo e investigación de los recursos marinos, VIII Región. Universidad de Concepción, Chile.
- LEONE, N.G., L. URBANI & H. FOX (1993): Cuadro Estratégico territorial de la recuperación y desarrollo de la cuenca del Biobío. F. Faranda & O. Parra (Eds.) Serie EULA Propuestas de Ordenamiento, Vol. 1. 351 pp.
- LIEHU, A., O. SANDAN & H. SIMOLA (1986): Effects of peatbog ditching in lakes: Problems in paleolimnological interpretation. *Hydrobiologia*, 143: 417-424.
- OLDFIELD, F. & R. THOMPSON (1978): Evidence of recent paleomagnetic secular variation in lake sediments from the New Guinea Highlands. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 17:300-306.
- OLLEY, J. M. & A.S. MURRAY (1994): Origins of variability in the  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  ratio in sediments. Variability in stream erosion and sediment transport (Proceedings of the Camberra Symposium). IAHS Publ. 224: 103-110.
- PARRA, O. (1989): La eutroficación de la Laguna Grande de San Pedro, Concepción, Chile: Un caso de estudio. *Ambiente y Desarrollo*, 5(1): 117-136.
- POURCHET, M. & J.F. PINGLOT (1989): Cesium 137 and Lead 210 in alpine lake sediments: measurements and modeling of mixing processes. *Journ. Geophys. Research*, 94: 12761-12770.
- POURCHET, M., P. MOURGUIART, J.F. PINGLOT, N. PREISS, J. ARGOLLO & D. WIRRMANN, (1994): Sédimentation récente dans le lac Titicaca (Bolivie). *C.R. Acad. Sci. Paris* 319:535-541.
- RADAKOVITCH, M.O. (1995): Etude du transfer 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 de Lion (NW Méditerranée). Thèse de doctorat de L'Université de Perpignan. 54 pp.
- SAYNOR, M.J., R.J. LOUGHRAM, W.D. ERSKINE & P.F. SCOTT (1994): Sediment movement on hillslopes measured by Cesium-137 and erosion pins. Variability in stream erosion and sediment transport (Proceedings of the Camberra Symposium). IAHS Publ. 224: 87-93.
- SPLIETHOFF, H. & H. HEMOND (1996): History of toxic metal discharge to surface waters of the Aberjona watershed. *Environmental Science and Technology*. 30:121-128.
- WALLBRINK, P.J., J.M. OLLEY & A.S. MURRAY (1994): Measuring soil movement using  $^{137}\text{Cs}$ : implications of reference site variability. Variability in stream erosion and sediment transport (Proceedings of the Camberra Symposium). IAHS Publ. 224:95-102.