

Implementación de la datación mediante ^{210}Pb - ^{137}Cs en Uruguay para el reconocimiento de la variabilidad climático-ambiental del Holoceno superior. Caso de estudio: Laguna de las Nutrias, Rocha, Uruguay

Dating through ^{210}Pb - ^{137}Cs implementation in Uruguay in the recognition of climatic-environmental variability of the upper Holocene. Case study: Laguna de las Nutrias, Rocha, Uruguay

Implementação da datação através de ^{210}Pb - ^{137}Cs no Uruguai para o reconhecimento da variabilidade climático-ambiental do alto Holoceno. Estudo de caso: Laguna de las Nutrias, Rocha, Uruguay

RECIBIDO: 30/3/2020 → APROBADO: 28/5/2020 ✉ german.azcune@gmail.com

✉ AZCUNE, GERMÁN (1); PÉREZ PARADA, ANDRÉS (1); FORNARO, LAURA (1)

(1) GRUPO DE DESARROLLO DE MATERIALES Y ESTUDIOS AMBIENTALES, DEPARTAMENTO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO, CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL DEL ESTE, UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA, URUGUAY

RESUMEN

La geocronología constituye una herramienta fundamental para el estudio de eventos históricos. Su desarrollo en Uruguay se ha vinculado estrechamente con estudios arqueológicos. En los últimos 20 años, las técnicas de datación se han expandido hacia otras disciplinas, propiciando cambios y mejoras metodológicas. El método mayormente utilizado para estudiar la cronología de eventos climáticos y ambientales más recientes del Holoceno es el de ^{210}Pb - ^{137}Cs . El objetivo del presente trabajo es el desarrollo en Uruguay del método geocronológico de ^{210}Pb - ^{137}Cs y su aplicación a un caso de estudio. Para ello, se tomó un testigo vertical de sedimento en la Laguna de las Nutrias (Rocha), que fue submuestreado, y las secciones fueron medidas por espectrometría gamma, determinando los radionucleidos ^{210}Pb , ^{226}Ra y ^{137}Cs .

La concentración de ^{210}Pb fue modelada matemáticamente, encontrándose que el modelo de mejor ajuste es el de flujo constante. Este modelo fue corroborado positivamente contra el perfil histórico de actividad de ^{137}Cs procedente de eventos nucleares. Se determinó la tasa de sedimentación anual, siendo de 3.1 ± 1.5 mm/año⁻¹, desde 1870 a 1986 AD; y de 4.7 ± 0.8 mm/año⁻¹, de 1986 AD hasta el presente. Asimismo, se infirió un evento extremo posiblemente asociado a la variabilidad climática inherente a la pequeña edad del hielo.

PALABRAS CLAVE: geocronología, sedimentación, paleolimnología.

ABSTRACT

Geochronology constitutes a fundamental tool for the study of historical events. Its development in Uruguay has been closely linked with archaeological studies. In the last 20 years, dating techniques have expanded into other disciplines, leading to methodological changes and improvements. The most widely used method to study the chronology of most recent Holocene climatic and environmental events is ^{210}Pb - ^{137}Cs . The objective of this manuscript is the development in Uruguay of the ^{210}Pb - ^{137}Cs geochronological method and its application to a study case. For this, a vertical sediment core was taken from Laguna de las Nutrias (Rocha), which was sub-sampled, and the sections were measured by gamma spectrometry, determining the ^{210}Pb , ^{226}Ra and ^{137}Cs radionuclides. The ^{210}Pb concentration was mathematically modeled, finding that the best fit model is the constant rate of supply model. This model was positively corroborated against the historical profile of ^{137}Cs activity from nuclear events. The annual sedimentation rate was calculated to be 3.1 ± 1.5 mm/year⁻¹ from 1870 to 1986 AD and 4.7 ± 0.8 mm.year⁻¹ after 1986 AD. Likewise, an extreme event possibly associated to the inherent climatic variability of Little Ice Age was inferred.

KEY WORDS: geochronology, sedimentation, paleolimnology.

RESUMO

A geocronologia constitui uma ferramenta fundamental para o estudo de eventos históricos. Seu desenvolvimento no Uruguai está intimamente ligado a estudos arqueológicos. Nos últimos 20 anos as técnicas de datação expandiram-se para outras disciplinas, promovendo mudanças e melhorias metodológicas. O método mais utilizado para estudar a cronologia de eventos climáticos e ambientais mais recentes do Holoceno é o ^{210}Pb - ^{137}Cs . O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento no Uruguai do método geocronológico ^{210}Pb - ^{137}Cs e sua aplicação em um estudo de caso. Para isso, foi coletado um testemunho vertical de sedimentos na Laguna de las Nutrias (Rocha), o qual foi subamostrado, e as seções foram medidas por espectrometria gama, determinando os radionuclídeos ^{210}Pb , ^{226}Ra e ^{137}Cs . A concentração de ^{210}Pb foi modelada matematicamente, constatando que o melhor modelo de ajuste é o modelo de fluxo constante. Este modelo foi corroborado positivamente contra o perfil histórico da atividade de ^{137}Cs de eventos nucleares. A taxa anual de sedimentação foi determinada, sendo de $3,1 \pm 1,5$ mm/ano⁻¹, de 1870 a 1986 dC,

e $4,7 \pm 0,8$ mm/año⁻¹, de 1986 dC até o presente. Da mesma forma, um evento extremo foi inferido possivelmente associado à variabilidade climática inerente à pequena edad de hielo.

PALAVRAS CHAVE: geocronología, sedimentação, paleolimnología.

INTRODUCCIÓN

Dos son los conceptos fundamentales sobre los que se apoya la percepción del tiempo: la duración y la sucesión. La duración es el intervalo entre un acontecimiento y otro, mientras que la sucesión distingue entre diferentes acontecimientos, dándoles un orden. En la cultura occidental el tiempo es percibido como algo lineal e irreversible. Mediante la mecanización del tiempo se establece la medida del mismo, dando la noción de que está dividido en fracciones de igual duración (Puente, 2005). En este marco, la geocronología es una herramienta fundamental para el estudio de eventos históricos o sucesiones de eventos. Si bien en Uruguay el desarrollo de la geocronología se vincula estrechamente con los estudios arqueológicos, en los últimos 20 años, las técnicas de datación se han expandido a otras disciplinas científicas como las ciencias ambientales o el estudio del cambio climático. La interdisciplina ha hecho propicia la mejora metodológica de las técnicas de datación, así como la aplicación de nuevas técnicas, adecuadas para otras matrices y otros rangos temporales.

Los primeros fechados realizados sobre muestras del Uruguay fueron mediante ^{14}C , alrededor de 1980 (Baeza, et al., 1977; Baeza, 1985). Más del 80% de los trabajos de Uruguay en los que se emplea geocronología utiliza esta metodología (Azcune, et al., 2019), siendo asociados en su mayoría a datos arqueológicos de registros prehispánicos.

Para la cronología de eventos recientes, donde se pretende estudiar, por ejemplo, la influencia antropogénica en un cuerpo de agua, el método más utilizado es el de ^{210}Pb - ^{137}Cs (Madella, et al., 1998). Debido a su rango dinámico, que abarca únicamente los últimos 150 años (Ivanovich y Harmon, 1992), el método comenzó a utilizarse en Uruguay en 2002 (García-Rodríguez, et al., 2002) en el estudio de eventos recientes, tanto climáticos como ambientales.

El ^{210}Pb es un isótopo inestable del Pb y pertenece a la serie de decaimiento natural del ^{238}U . El mismo presenta un período de semidesintegración ($t_{1/2}$) de 22.20 años, decayendo por β^- a ^{210}Bi , y presentando una emisión γ asociada de 46.539 keV con 4.25% de probabilidad de ocurrencia (Shamsuzzoha Basunia, 2014). Si bien en sistemas cerrados la serie de decaimiento del ^{238}U debería estar en equilibrio, en sistemas abiertos este equilibrio se rompe por el escape a la atmósfera del ^{222}Rn , gaseoso. El ^{222}Rn , radionucleido de $t_{1/2}=3.8$ días, ya en la atmósfera, decae de manera sucesiva a través de varios radionucleidos a ^{210}Pb , el cual se asocia con aerosoles, precipitándose con la lluvia en zonas continentales y alojándose por escorrentía en el sistema sedimentario reciente de sistemas continentales lénticos u oceánicos.

El ^{210}Pb alojado en el sedimento proviene de dos fuentes: 1) del equilibrio del ^{238}U en el sedimento, y más precisamente del equilibrio del ^{226}Ra , con el que alcanza un

equilibrio secular. A este ^{210}Pb se le asigna la nomenclatura ^{210}Pb base ($^{210}\text{Pb}_{\text{base}}$). 2) El ^{210}Pb depositado por precipitación pluvial es adsorbido en partículas suspendidas en la columna de agua y posteriormente sepultado en el fondo lagunar. A este ^{210}Pb se lo denomina ^{210}Pb en exceso ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) (Crusius y Anderson, 1995). El ^{210}Pb base, al encontrarse en equilibrio secular con el ^{226}Ra , radionucleido de $t_{1/2}=1600$ años, puede ser considerado constante a escala anual o decadal (Rink y Thompson, 2015). En cambio, la actividad del ^{210}Pb en exceso se encuentra sujeta a su decaimiento radioactivo, permitiendo calcular la fecha de sedimentación al evaluar la desintegración radioactiva en función de la profundidad.

Los principios del método de ^{210}Pb han sido propuestos en 1963 y 1964 (Goldberg, 1963; Crozaz, et al., 1964) para muestras de nieve en la Antártida, adaptándose la técnica para sedimentos lacustres en 1971 (Krishnaswamy, et al., 1971) y marinos en 1972-1973 (Koide, et al., 1972; Koide, et al., 1973).

Pese a que se trata de una técnica ampliamente utilizada, la misma asume que el proceso de sedimentación sigue un modelo conocido y que no ocurren procesos de transformación post-depositacional del ^{210}Pb en exceso. Dichas suposiciones, en caso de ser cumplidas en mayor o menor medida, pueden derivar en edades certeras (Hu, et al., 2018), o totalmente erróneas (Tylmann, et al., 2016). Esto deriva en la necesidad de validar el modelo de datación obtenido por ^{210}Pb con un método de datación diferente u otras fuentes de información complementarias (Chang, et al., 2017). Por este motivo, se utiliza el método ^{210}Pb - ^{137}Cs en lugar de emplear únicamente el método de ^{210}Pb , ya que el ^{137}Cs , de origen antrópico, podrá confirmar o contradecir el modelo de edad obtenido mediante el modelo de ^{210}Pb . Por su parte, el ^{137}Cs es producido por fisión nuclear, presenta un decaimiento β^- a ^{137}Ba , con un $t_{1/2}=30.08$ años, y su aparición en sedimentos se debe al *fall out* en el planeta. Dicho *fall out* se ha originado por el vertido a la atmósfera de eventos nucleares armamentistas (bombas o ensayos) o pacíficos (accidentes de reactor u otros), cuyos acontecimientos principales son de fecha conocida.

El objetivo de este trabajo es el desarrollo en Uruguay de la metodología para realizar geocronología mediante ^{210}Pb - ^{137}Cs , y su aplicación a un caso de estudio nacional. Estas capacidades metodológicas son de gran importancia para las ciencias ambientales, ya que permiten evaluar la evolución histórica de distintos sistemas ambientales en el pasado reciente. Hasta el presente trabajo, en Uruguay, todas las cronologías que utilizaron esta metodología en sistemas sedimentarios fueron realizadas en laboratorios extranjeros, tales como: Laboratorio de Química Inorgánica Marina, Instituto Oceanográfico, Universidad de San Pablo, Brasil (Bueno, et al., 2018), Bremen State Radioactivity Measurements Laboratory, Alemania (Marrero, et al., 2014), UFZ Centre for Environmental Research, Alemania (García-Rodríguez, et al., 2002).

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo

El muestreo fue realizado en febrero de 2018 en la Laguna de las Nutrias, Rocha, Uruguay (Figura 1), laguna natural de 33.8 ha de área, con una cuenca de 44.7 ha y una profundidad máxima de 1.5 m. Se trata de una laguna somera, de agua dulce y turbia, desarrollada sobre depósitos de la Formación Laguna Merín, con

un alto nivel de eutrofización según sus niveles de nitrógeno y fósforo (Kruk, et al., 2006, 2009). La elección de este sistema léntico se basa en sus características sedimentológicas e hidrodinámicas, la cuales aseguran la decantación y ausencia de mezcla de sedimentos (al no contar con afluentes, solamente incorpora agua mediante precipitación pluvial y escorrentía). Asimismo, la laguna está alejada de actividades antrópicas de gran porte que generen perturbaciones de importancia (Sánchez-Cabeza, et al., 2012). Se tomó un testigo vertical de sedimento de 65 cm de longitud en la zona de mayor profundidad y libre de colonización masiva de macrófitas de la laguna, de forma manual, empleando para ello un tubo de cloruro de polivinilo (PVC) de 150 mm de diámetro interno (coordenadas de muestreo $34^{\circ}40'50.8''$ S, $54^{\circ}17'42.0''$ O). Se inmovilizó la interfase agua-sedimento mediante el empleo de espuma fenólica saturada en agua (espuma floral) previo al sellado, y se dispuso la columna de sedimento de forma horizontal, de manera de evitar la compactación y movimiento de agua intersticial (García-Rodríguez, 2002). El testigo de sedimento fue almacenado a 4°C hasta el momento de su apertura.



Figura 1. Localización de la Laguna de las Nutrias en la costa uruguaya (cotas imagen: $34^{\circ}34'22''\text{S}$ $54^{\circ}31'30''\text{O}$ – $34^{\circ}47'00''\text{S}$ $54^{\circ}07'07''\text{O}$)

Preparación de muestra

El testigo fue abierto de manera longitudinal, y luego fraccionado de forma transversal cada 1 cm, desde la superficie hasta los 30 cm de profundidad, y cada 2 cm, desde los 30 cm hasta el final (Figura 2).



Figura 2. Apertura de testigo de sedimento y submuestreo

Cada sección de sedimento fue secada a 60°C hasta masa constante (aproximadamente 48 h), molida en molino Micro-Mill de Bel-ArtTM SP SciencewareTM hasta un tamaño menor a $125\mu\text{m}$, y sellada en placas Petri de $35\text{mm} \times 10\text{mm}$ por al menos 4 semanas, para así alcanzar el equilibrio secular de las series naturales del ^{238}U y ^{232}Th .

Determinación de radionucleidos

Para la determinación de los radionucleidos ^{210}Pb , ^{226}Ra y ^{137}Cs , las muestras fueron medidas por 150.000 segundos cada una, con un tiempo muerto que varió desde 0.1 a 0.4%. Para ello se utilizó un sistema de espectrometría gamma con detector de germanio de alta pureza (HPGe) ORTEC GMX35P4-76-RB acoplado al sistema de espectrometría Gamma DSPEC jr. ORTEC-AMETEK. Para la calibración en eficiencia fue utilizado el patrón IAEA 385 – Irish Sea Sediment, preparado y medido en las mismas condiciones que la muestra. El ^{210}Pb fue estudiado mediante su fotopico de 46.54 keV, el ^{226}Ra mediante el fotopico del ^{214}Pb de 351.93 keV, y el ^{137}Cs mediante el fotopico del ^{137}Ba de 661.66 keV.

Análisis de datos

La concentración de ^{210}Pb fue modelada matemáticamente mediante el modelo de actividad constante o concentración inicial constante (CIC – Constant Initial Concentration) (Robbins y Edgington, 1975) y el modelo de flujo constante (CRS - Constant Rate of Supply) (Appleby y Oldfield, 1978). Para la realización de dichos modelos matemáticos se utilizó el software Microsoft® Excel® para Office 365 MSO (16.0.12527.20260) 32 bits.

Modelo de concentración inicial constante – CIC

Este modelo supone como hipótesis una concentración inicial (C_0) de depósito del $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ constante, con lo cual la concentración de actividad de cualquier sección i (C_i) se calculará mediante la ley de desintegración radiactiva como:

$$C_i = C_0 \times e^{-\lambda t} \quad \text{con} \quad \lambda = \ln(2)/t_{1/2} \quad \text{siendo} \quad t_{1/2} = 22.2 \text{ años para el } ^{210}\text{Pb}$$

Por lo tanto, la edad de cada sección puede calcularse como:

$$t_i = (1/\lambda) \times \ln (C_0/C_i)$$

Modelo de flujo constante - CRS

Este modelo tiene como hipótesis un flujo constante, es decir que la cantidad de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ anual por área es la misma. Se define la actividad acumulada específica por unidad de área A_i como:

$$A_i = \int_i^\infty (C_i/S) di \text{ con } S \text{ como la sección del testigo}$$

De forma análoga a CIC, la edad de cada sección se puede calcular como:

$$t_i = (1/\lambda) \times \ln (A_0/A_i)$$

RESULTADOS

Actividad específica de los radionucleidos

La actividad específica de ^{210}Pb y ^{226}Ra para cada una de las secciones, calculada en base a la masa de sedimento medida, a la corrección por autoabsorción y a la eficiencia del detector, es presentada en la Figura 3. Para el cálculo de incertidumbres se tuvieron en cuenta las asociadas a la actividad radioactiva, que cumple con una distribución Poisson, tanto de las muestras como del ruido de fondo, así como las informadas para el patrón utilizado.

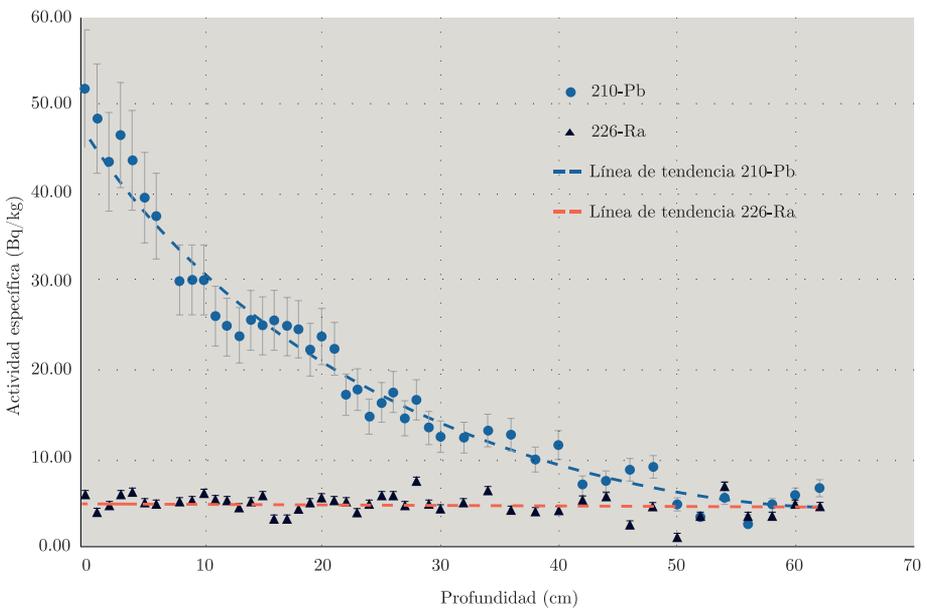


Figura 3. Distribución de actividad específica de ^{226}Ra y ^{210}Pb en relación a profundidad

La actividad específica del ^{226}Ra oscila en base a una actividad constante, ya que la misma depende únicamente del decaimiento radiactivo de la serie natural del ^{238}U . Para el ^{210}Pb , se observa un decaimiento exponencial con la profundidad, hasta valores de actividad de ^{210}Pb constantes, actuando en la parte exponencial el decaimiento radiactivo del ^{210}Pb depositado por precipitación pluvial (^{210}Pb en exceso). Podría afirmarse que la base constante constituye únicamente la actividad del ^{210}Pb proveniente del decaimiento de la serie del ^{238}U en el mismo sedimento (^{210}Pb base) (Sánchez-Cabeza, et al., 2012). Este comportamiento pseudo-constante a tiempos cortos se debe al equilibrio secular existente entre el ^{210}Pb y el ^{226}Ra encapsulado en el sedimento. Restando ambas contribuciones, puede calcularse la actividad del $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, la cual es presentada en la Figura 4 para todo el testigo.

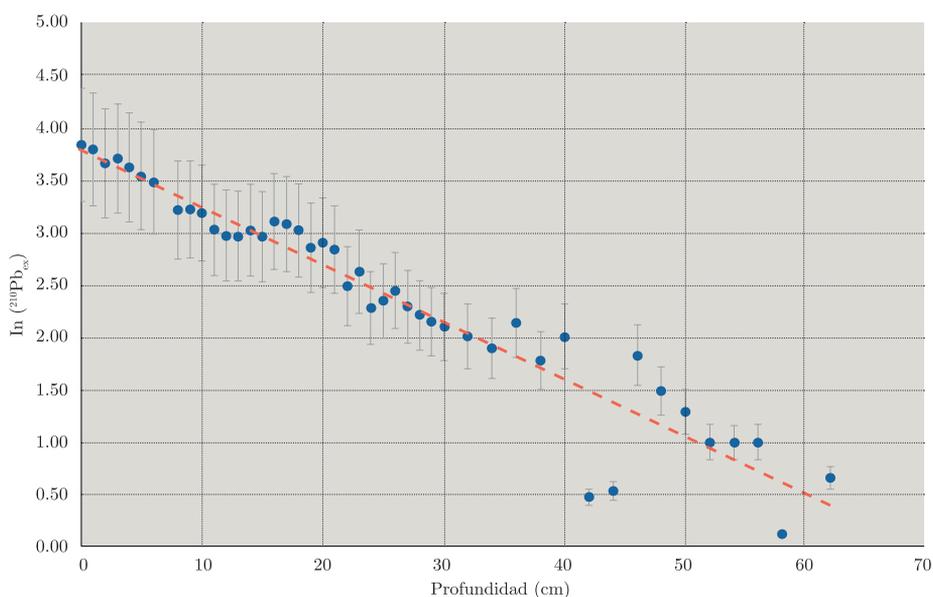


Figura 4. Distribución de logaritmo de actividad específica $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ en relación a la profundidad

Al igual que para la actividad específica de ^{210}Pb y ^{226}Ra , la actividad específica de ^{137}Cs para cada una de las secciones fue calculada en base a la masa de sedimento medida, la corrección por autoabsorción y la eficiencia del detector. La misma es presentada en la Figura 5.

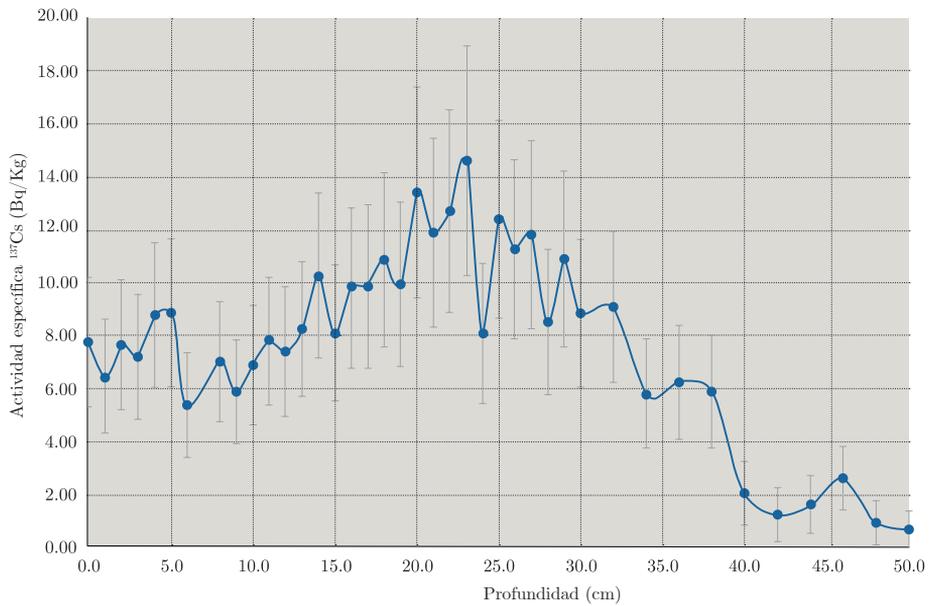


Figura 5. Distribución de actividad específica de ^{137}Cs en relación a profundidad

Modelado de la actividad del ^{210}Pb en exceso

Para el modelo CIC se hizo la suposición de concentración inicial constante de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, presentándose en la Figura 6 un gráfico de la edad en relación a la profundidad.

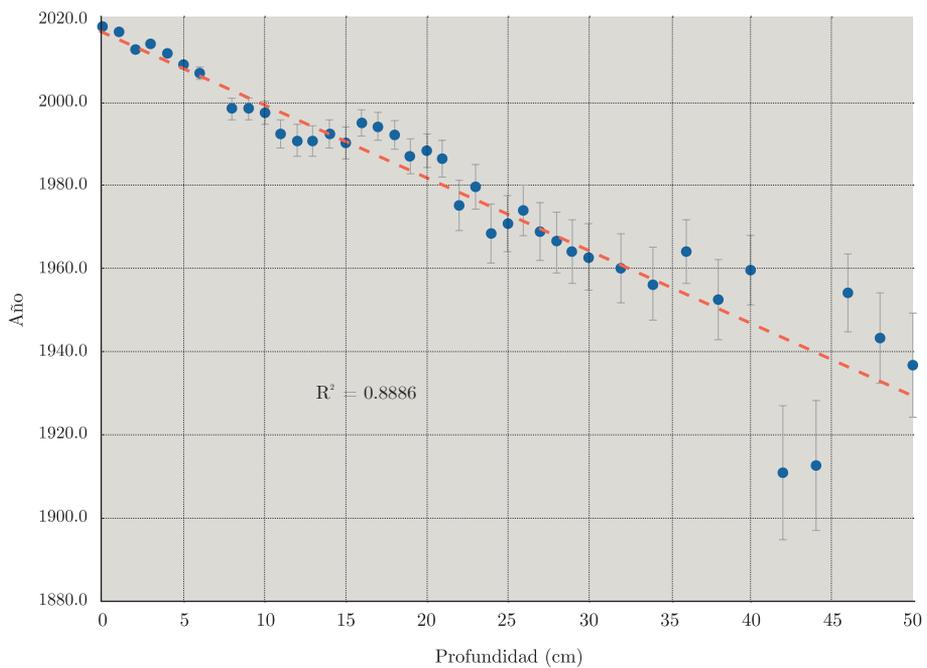


Figura 6. Datación por ^{210}Pb utilizando el modelo de concentración inicial constante (CIC)

Para el modelo CRS se hizo el supuesto de una cantidad de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ anual por unidad de área constante, en la Figura 7 se presenta el gráfico de la edad en relación a la profundidad.

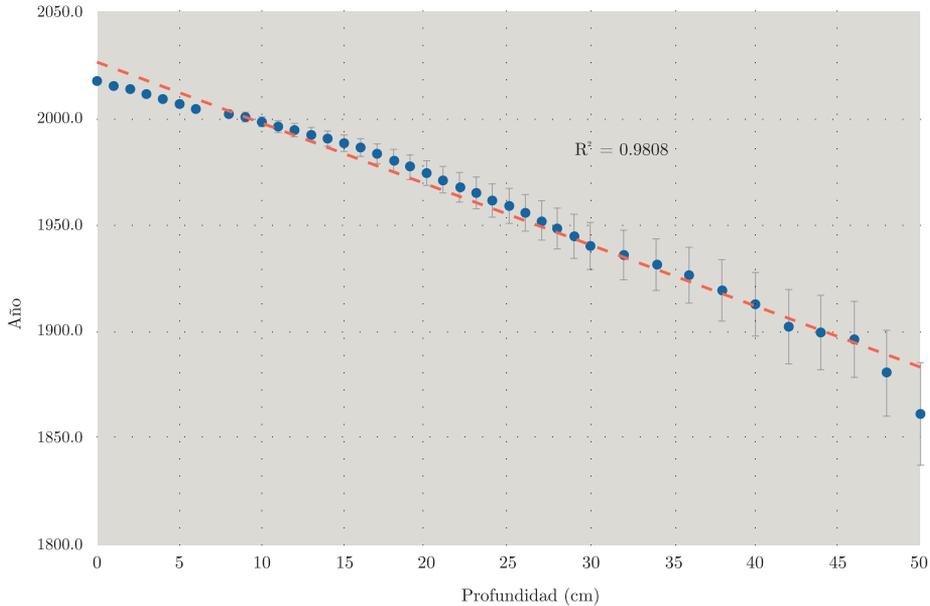


Figura 7. Datación por ^{210}Pb utilizando el modelo de flujo constante (CRS)

DISCUSIÓN

Al evaluar los modelos matemáticos CIC y CRS utilizados, se observa que el CIC tiene una dificultad al suponer una concentración inicial de depósito de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ constante, lo que implica que la masa anual de sedimento tiene la misma proporción de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. Esto no es real en zonas de alta presión antropomórfica, con variabilidad anual de precipitaciones o presencia de otros procesos erosivos, algunos de ellos característicos de la zona costera donde esta laguna se ubica (ej. Harris, et al., 2014). Por otro lado, el modelo CRS parte del supuesto de que la cantidad de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ anual por área es la misma; solamente requiere que el aporte de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ sea constante en el tiempo, lo que constituye una suposición mucho más general (Fernández García, 2012). Asimismo, del grado de ajuste presentado por los datos del testigo de la Laguna de las Nutrias a ambos modelos, representado en el valor de r^2 , es posible inferir que el modelo de mejor ajuste es el CRS.

En ambos modelos, para el cálculo de incertidumbres se realizó la propagación de la incertidumbre de las medidas de ^{210}Pb y ^{226}Ra implicadas en cada punto.

Verificación de modelo CRS mediante distribución temporal de actividad de ^{137}Cs

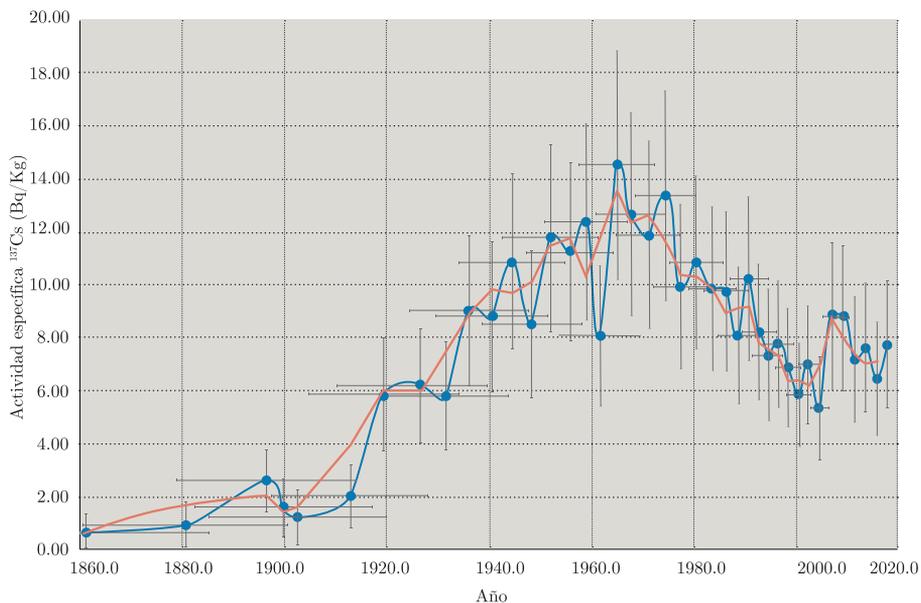


Figura 8. Distribución de actividad específica de ^{137}Cs en función del tiempo

En la Figura 8 se representa un gráfico de actividad específica de ^{137}Cs para cada sección del testigo, en relación a la datación realizada mediante el modelo CRS. En trazo azul de dicha figura se grafica la actividad específica de ^{137}Cs , de origen antrópico, generado por fisión nuclear y liberado al ambiente en accidentes nucleares o pruebas de armas nucleares. Además, en trazo rojo se muestra la línea de tendencia suavizada según la media móvil cada 2 puntos. En dicha figura se pueden encontrar diversos máximos, correspondientes a procesos de fisión como los anteriormente mencionados, que se dieron en diferentes lugares del planeta; los de mayor importancia son presentados en la Tabla 1.

Los corrimientos de las fechas con respecto a los eventos señalados pueden deberse a dinámicas de transporte atmosférico, ya que una vez que alcanzan la atmósfera, los radionucleidos demoran desde meses hasta años en transportarse, hasta finalmente depositarse en el sedimento. Los fenómenos de distribución se dan primero a nivel troposférico, extendiéndose dentro del mismo hemisferio, por vientos, y luego, a nivel estratosférico de manera global, por difusión y decantación. La presencia de valores de ^{137}Cs mayores a 0 desde 1900 y su crecimiento hacia los años donde encontramos los máximos se deben a movilidad vertical post-deposición de dicho radionucleido en el sedimento (Foster, et al., 2006). Las incertidumbres presentadas en dicho gráfico son, en el eje X las correspondientes a las dataciones realizadas según el modelo CRS, y en el eje Y calculadas de forma análoga a las de los demás radionucleidos medidos.

Tabla 1. Máximos de distribución de ^{137}Cs y los eventos históricos asociados

Máximo de ^{137}Cs	Evento asociado	Tiempo (años AD)
1950.4 ± 9.5 1957.7 ± 8.4	Bombas nucleares de Hiroshima, Nagasaki (Japón) y Trinidad (Estados Unidos)	1945
1964.1 ± 7.6	Pruebas de armamento nuclear efectuadas principalmente en Murooa, Pacífico Sur, por el gobierno francés	1963
1990.5 ± 3.7	Accidente de Chernóbil, Ucrania	1986
2009.2 ± 1.2	Accidente de Fukushima, Japón	2011

En base al modelo de datación mediante CRS se pudo calcular la tasa de sedimentación. En la Figura 9 se presenta un gráfico de dicha tasa de sedimentación en función del tiempo. En el mismo se observan dos zonas con tasas de sedimentación diferentes, pero a la vez aproximadamente constantes para cada período. Específicamente, en una zona inferior (Zona A), estimada desde 1870 (límite inferior de confiabilidad para dataciones actuales por ^{210}Pb) hasta 1986, de $3.1 \pm 1.5 \text{ mm/año}^{-1}$, y una zona superior (Zona B), desde 1986 hasta el 2018, de $4.7 \pm 0.8 \text{ mm/año}^{-1}$. Dichas tasas de sedimentación son calculadas como la media de las tasas de sedimentación en cada zona, representadas en el gráfico de la Figura 9 como líneas de trazo rojo, punteado. Asimismo, los intervalos de confianza son calculados como el doble de la desviación estándar de las tasas de sedimentación, y son representados en el gráfico como zonas grises. El incremento de sedimentación reflejado entre las zonas A y B del gráfico se explica por la tendencia histórica creciente de precipitación total anual, según indican los datos climáticos históricos de la estación pluviométrica Rocha, donde se observan precipitaciones menores a 900 mm/año^{-1} hasta la década de 1980, y mayores a 1100 mm/año^{-1} a partir de la misma (García-Rodríguez, 2002).

Cabe destacar que con anterioridad a 1880 se observa un evento de muy baja sedimentación (seno) asociado a otro posterior, entre 1880 y 1900, de muy alta tasa de sedimentación (cresta). Esto podría corresponderse con la alternancia de período de sequía extrema, pero con suelos aún vegetados, y escasos aportes de sedimentos al cuerpo lagunar, seguido de un período húmedo. Durante este último, las abundantes lluvias habrían generado procesos de erosión y escorrentía superficial (lavado) sobre un suelo con un escaso tapiz vegetal, favoreciendo el aporte de sedimento, con el consiguiente aumento de la tasa de sedimentación. Este escenario podría asignarse a las condiciones que imperaron en el hemisferio

sur durante la Pequeña Edad del Hielo (Piovano, et al., 2002; del Puerto et al., 2011). Si bien para inferir las edades anteriores a 1870 se podría suponer que la tasa de sedimentación se mantuvo relativamente constante en 3.1 mm/año^{-1} , esto podría derivar en un error en caso de existir eventos extremos que afecten directamente la tasa de sedimentación, como el inferido anteriormente.

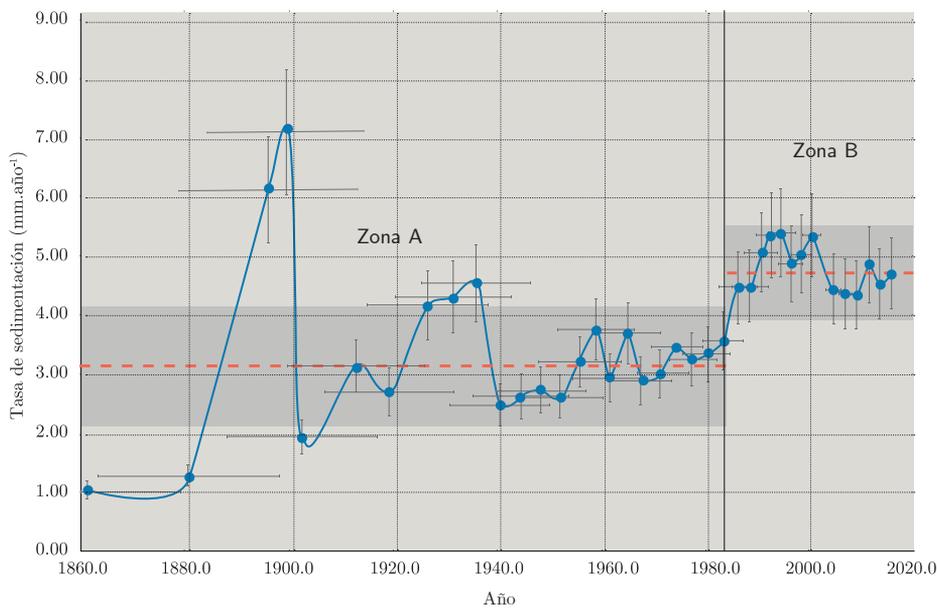


Figura 9. Distribución de tasa de sedimentación respecto al tiempo

CONCLUSIONES

Se ha presentado el desarrollo de una metodología adecuada para realizar geocronología mediante ^{210}Pb - ^{137}Cs en sistemas lacustres. Estas capacidades analíticas y de trabajo se encuentran actualmente disponibles en Uruguay. La metodología fue aplicada a la Laguna de las Nutrias como un caso de estudio, obteniéndose edades certeras mediante el uso del modelo de flujo constante de ^{210}Pb ; verificadas por la aparición en el perfil sedimentario de concentraciones máximas de ^{137}Cs provenientes de eventos históricos conocidos. Asimismo, dicha metodología ha sido empleada para obtener la tasa de sedimentación interanual de la laguna, marcando dos períodos con diferentes tasas de sedimentación, bien delimitados y asociados a la pluviosidad total anual, y un evento climático extremo de aridez (posiblemente asociado a la pequeña edad del hielo). Las capacidades metodológicas desarrolladas podrán ser utilizadas por diversos investigadores en reconstrucciones paleoambientales, permitiendo evaluar procesos históricos tanto naturales como antrópicos asociados a cuerpos de agua con características ambientales similares a la Laguna de las Nutrias.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos muy especialmente a Felipe García-Rodríguez, del Polo de Desarrollo Universitario “Geociencias del Holoceno”, Centro Universitario Regional del Este, Universidad de la República, Uruguay, por la colaboración en el trabajo de campo y corrección del texto. A Laura Pérez, Fabrizio Scarabino, Leticia González y Leandro Bergamino, del mismo Polo de Desarrollo Universitario, por su colaboración en el trabajo de campo. A Heinkel Bentos Pereira y Ana Lía Noguera del Grupo de Desarrollo de Materiales y Estudios Ambientales, Departamento de Desarrollo Tecnológico, Centro Universitario Regional del Este, Universidad de la República, Uruguay, por el apoyo técnico y por su colaboración en la utilización del sistema gamma respectivamente. Asimismo, agradecemos al Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (PEDECIBA) y a la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República por el financiamiento.

REFERENCIAS

- Appleby, P.G. y Oldfield, F., 1978. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. En: *CATENA*, 5(1), pp.1–8. doi: 10.1016/S0341-8162(78)80002-2.
- Azcune, G., Capdepon Caffa, I. y García-Rodríguez, F., 2019. Contextos geocronológicos de eventos naturales y culturales de Uruguay. En: *Revista De Geología (UFC)*, 32(1), pp.126–146.
- Baeza, J., Taddei, A., Femenías, J., Rodríguez, O., Melgar, W., Díaz, A. y Fornaro, M., 1977. Investigaciones arqueológicas en el área de Salto Grande: tres primeros radiocarbonos. En: *V Encuentro de Arqueología del Litoral*. Río Negro: Intendencia Municipal de Río Negro, Ministerio de Educación y Cultura. pp.67-88.
- Baeza, J., 1985. *Los fechados radiocarbónicos de Salto Grande, estado actual de las investigaciones arqueológicas en el Uruguay*. Montevideo: Centro de Estudios Arqueológicos.
- Bueno, C., Brugnoli, E., Bergamino, L., Muniz, P., García-Rodríguez, F. y Figueira, R., 2018. Anthropogenic and natural variability in the composition of sedimentary organic matter of the urbanised coastal zone of Montevideo (Río de la Plata). En: *Marine Pollution Bulletin*, 126, pp.197–203. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.11.009.
- Chang, Y., Berelson, W. M. y Li, H., 2017. AMS ^{14}C and ^{210}Pb dating on a 51-cm sediment core from Santa Barbara Basin, CA: old carbon source. En: *Geophysical Research Abstracts*, 19(3), p.11308.

- Crozaz, G., Picciotto, E. y De Breuck, W., 1964. Antarctic snow chronology with Pb 210. En: *Journal of Geophysical Research*, 69(12), pp.2597–2604. doi: 10.1029/JZ069i012p02597.
- Crusius, J. y Anderson, R.F., 1995. Sediment focusing in six small lakes inferred from radionuclide profiles. En: *Journal of Paleolimnology*, 13(2), pp.143–155. doi: 10.1007/BF00678103.
- Fernández García, A., 2012. *Datación de sedimentos y evaluación de tasas de sedimentación mediante el análisis de isótopos radiactivos de origen natural y artificial usados como trazadores*. Santander: Universidad de Cantabria. (Tesis de Maestría).
- Foster, I.D.L., Mighall, T.M., Proffitt, H., Walling, D.E. y Owens, P.N., 2006. Post-depositional ¹³⁷Cs mobility in the sediments of three shallow coastal lagoons, SW England. En: *Journal of Paleolimnology*, 35(4), pp.881–895. doi: 10.1007/s10933-005-6187-6.
- García-Rodríguez, Felipe, 2002. *Estudio paleolimnológico de lagunas de Rocha, Castillos y Blanca, sudeste del Uruguay*. Montevideo: Facultad de Ciencias, Universidad de la República. (Tesis de Doctorado).
- García-Rodríguez, F., Mazzeo, N., Sprechmann, P., Metzeltin, D., Sosa, F., Treutler, H.C., Renom, M., Scharf, B. y Gaucher, C., 2002. Paleolimnological assessment of human impacts in Lake Blanca, SE Uruguay. En: *Journal of Paleolimnology*, 28, pp.457–468.
- Goldberg, E.D., 1963. Geochronology with ²¹⁰Pb. En: IAEA, ed. *Proceedings of the Symposium on Radioactive Dating*. Viena: International Association of Hydrological Sciences. pp.122–130.
- Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J. y Lister, D.H., 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. En: *International Journal of Climatology*, 34(3), pp.623–642. doi: 10.1002/joc.3711.
- Hu, G., Chaolu, Y., Jiafu, Z., Guirong, C., Baolin, P., Jinhua, L., Tao, J., Shuangwen, Y., Dehong, L. y Jianwei H., 2018. Chronology of a lacustrine core from Lake Linggo Co using a combination of OSL, ¹⁴C and ²¹⁰Pb dating: implications for the dating of lacustrine sediments from the Tibetan Plateau. En: *Boreas*, 47(2), pp.656–670. doi: 10.1111/bor.12291.
- Ivanovich, M. y Harmon, R.S., 1992. *Uranium-series disequilibrium: applications to earth, marine, and environmental sciences*. 2da ed. Oxford: Clarendon Press.

- Koide, M., Bruland, K.W. y Goldberg, E.D., 1973. Th-228/Th-232 and Pb-210 geochronologies in marine and lake sediments. En: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(5), pp.1171–1187. doi: 10.1016/0016-7037(73)90054-9.
- Koide, M., Soutar, A. y Goldberg, E.D., 1972. Marine geochronology with ²¹⁰Pb. En: *Earth and Planetary Science Letters*, 14(3), pp.442–446. doi: 10.1016/0012-821X(72)90146-X.
- Krishnaswamy, S., Lal, D., Martin, J.M. y Meybeck, M., 1971. Geochronology of lake sediments. En: *Earth and Planetary Science Letters*, 11(1), pp.407–414. doi: 10.1016/0012-821X(71)90202-0.
- Kruk, C., Rodríguez-Gallego, L., Quintans, F., Lacerot, G., Scasso, F., Mazzeo, N., Meerhoff, M., y Paggi, J.C., 2006. Biodiversidad y calidad de agua de 18 pequeñas lagunas en la costa sureste de Uruguay. En: Menafrá, R., Rodríguez-Gallego, L., Scarabino, L. y Conde, D., eds. *Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya*. Montevideo: Vida Silvestre Uruguay. pp.599–610.
- Kruk, C., Rodríguez-Gallego, L., Meerhoff, M., Quintans, F., Lacerot, G., Mazzeo, N., Scasso, F., Paggi, J.C., Edwin, T.H., Peeters, M. Y Scheffer, M., 2009. Determinants of biodiversity in subtropical shallow lakes (Atlantic coast, Uruguay). En: *Freshwater Biology*, 54(12), pp.2628–2641. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02274.x>
- Madella, M., Powers-Jones, A.H. y Jones, M.K., 1998. A simple method of extraction of opal phytoliths from sediments using a non-toxic heavy liquid. En: *Journal of Archaeological Science*, 25(8), pp.801–803. doi: 10.1006/jasc.1997.0226.
- Marrero, A., Tudurí, A., Perez, L., Cuña, C., Muniz, P., Lopes Figueira, R.C., de Mahiques, M.M., de Lima Ferreira, P.A., Pittauerová, D., Hanebuth, T.J.J. y García-Rodríguez, F. 2014. Historical changes in terrigenous river supply from the Río de la Plata basin to the inner shelf of Uruguay. En: *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 21(2), pp.165–179.
- Piovano, E.L., Ariztegui, D. y Moreira, S.D., 2002. Recent environmental changes in Laguna Mar Chiquita (central Argentina): a sedimentary model for a highly variable saline lake. En: *Sedimentology*, 49(6), pp.1371–1384. doi: 10.1046/j.1365-3091.2002.00503.x.
- Puente, I., 2005. *La historia de la medición del tiempo y la noción de tiempo*. [s.l.]: [s.n.]. [Consulta: 28 de febrero de 2020] Disponible en: https://www.academia.edu/5198951/LA_HISTORIA_DE_LA_MEDICIÓN_DEL_TIEMPO_Y_LA_NOCIÓN_DE_TIEMPO.

- Del Puerto, L., García-Rodríguez, F., Bracco, R., Castiñeira, C., Blasi, A., Inda, H., Mazzeo, N. y Rodríguez, A., 2011. Evolución climática holocénica para el Sudeste del Uruguay: análisis multi-proxy en testigos de lagunas costeras. En: García-Rodríguez, F., ed. *El Holoceno en la zona costera del Uruguay*. Montevideo: UdelaR. p. 263. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Rink, W.J. y Thompson, J.W., eds., 2015. *Encyclopedia of scientific dating methods*. Amsterdam: Springer. (Encyclopedia of Earth Sciences Series)
- Robbins, J.A. y Edgington, D.N., 1975. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. En: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(3), pp.285–304. doi: 10.1016/0016-7037(75)90198-2.
- Sánchez-Cabeza, J., Díaz-Asencio, M. y Ruiz-Fernández, A.C., 2012. *Radiocronología de sedimentos costeros utilizando ^{210}Pb : modelos, validación y aplicaciones*. Viena: OIEA. ISBN: 978-92-0-325210-2
- Shamsuzzoha Basunia, M., 2014. Nuclear data sheets for A = 210. En: *Nuclear Data Sheets*, 121, pp.561–694. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2014.09.004>
- Tylmann, W., Bonka, A., Goslarbc, T., Wulfde, S. y Grosjeanf, M., 2016. Calibrating ^{210}Pb dating results with varve chronology and independent chronostratigraphic markers: problems and implications. En: *Quaternary Geochronology*, (32), pp.1–10. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2015.11.004>