

Estudio de análisis forense de la vegetación azonal hídrica terrestre con afectación (SVAHT), sector Salar de Pedernales

INFORME FINAL

Preparado para: Codelco División Salvador
Santiago, 16 de mayo de 2024



Estudio de análisis forense de la vegetación azonal hídrica terrestre con afectación (SVAHT), sector Salar de Pedernales

Informe por:

Marco Salamanca¹, Marco Hidalgo¹, Dilan Campos², Jacques Wiertz², Daniela Gamboa² y Felipe Saavedra²

¹ Laboratorio de Oceanografía Química, Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción.

² Sustainable Minerals Institute - International Centre of Excellence Chile (SMI-ICE-Chile), The University of Queensland, Australia.

The University of Queensland

Clasificada entre las 50 mejores del mundo, la Universidad de Queensland (UQ) es una de las principales instituciones de enseñanza e investigación de Australia. UQ se esfuerza por lograr la excelencia a través de la creación, preservación, transferencia y aplicación del conocimiento. Durante más de un siglo, hemos educado y trabajado con personas sobresalientes para entregar liderazgo de conocimiento para un mundo mejor.

Sustainable Minerals Institute (Instituto de Minería Sustentable)

El Sustainable Minerals Institute (SMI) es un instituto de investigación líder en el mundo comprometido a desarrollar soluciones basadas en el conocimiento para los desafíos de sustentabilidad de la industria global de recursos y para capacitar a la próxima generación de líderes de la industria y la comunidad. El Instituto es transdisciplinario, y nuestro trabajo es independiente, imparcial y riguroso. Nuestra investigación integra la experiencia de los especialistas en producción, ciencias ambientales y sociales para brindar un desarrollo de recursos responsable.

International Centre of Excellence in Chile (Centro Internacional de Excelencia en Chile)

El Centro Internacional de Excelencia en Chile (SMI-ICE-Chile) tiene como objetivo brindar beneficios tangibles para el pueblo chileno y su economía. El Centro está desarrollando una nueva fuerza de conocimiento colaborativo global de la minería en el país que desarrolla capital humano, proporciona resultados de investigación innovadores y realiza transferencia tecnológica efectiva a la industria. El Centro es una asociación entre la Universidad de Queensland, el gobierno chileno (ANID) y la Universidad de Concepción. Esta colaboración e inversión tiene potencial para beneficios significativos para la industria a nivel mundial.



Tabla de Contenido

| | |
|---|-----------|
| Glosario | 7 |
| 1. Resumen | 9 |
| 2. Introducción | 10 |
| 3. Objetivos | 14 |
| 3.1. Objetivo general | 14 |
| 3.2. Objetivos específicos | 14 |
| 4. Materiales y métodos | 15 |
| 4.1 Fundamentos teóricos de la geocronología utilizando ^{210}Pb | 16 |
| 4.1.1. MODELO DE ACTIVIDAD INICIAL CONSTANTE | 16 |
| 4.1.2. MÉTODO DE DESEQUILIBRIO RADIOACTIVO (RAZÓN $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$) | 17 |
| 4.2. Obtención de muestras | 18 |
| 4.2.1. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS | 18 |
| 4.2.2. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS | 20 |
| 4.2.3. LECTURAS DE ^{210}Pb | 22 |
| 4.2.4. LECTURAS DE ^{226}Ra | 22 |
| 4.2.5. CONCENTRACIÓN DE PB TOTAL EN PLANTAS | 22 |
| 5. Resultados y Discusión | 23 |
| 5.1. Desarrollo de una metodología para la preparación de muestras vegetales para la determinación de la actividad de ^{210}Pb | 23 |
| 5.1.1. PROTOCOLOS DE DIGESTIÓN DE MUESTRAS | 25 |
| 5.1.2. DEPOSITACIÓN | 26 |
| 5.1.3. LECTURA DE ^{210}Pb | 26 |
| 5.2. Contenido de ^{210}Pb en plantas vivas y plantas muertas del Salar de Pedernales | 29 |
| 5.3. Contenido de ^{210}Pb en la parte aérea y raíces de plantas | 35 |
| 5.4. Intervalo de tiempo transcurrido entre las plantas vivas que ocupan la Zona Activa y las plantas muertas de la Zona Inactiva | 38 |
| 5.4.1. ESTIMACIÓN DEL TIEMPO TRANSCURRIDO DESDE LA MUERTE DE LAS PLANTAS | 38 |
| 5.4.2. CONTENIDO DE PLOMO TOTAL EN PLANTAS | 42 |
| 5.5. Modelo de dinámica de muerte de las plantas del SVAHT del Salar de Pedernales | 44 |
| 6. Conclusiones | 45 |
| 7. Referencias | 46 |
| 8. Anexos | 50 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Comparación de contenidos de ^{210}Pb en diferentes tipos de vegetación..... | 13 |
| Tabla 2. Muestras sometidas a protocolos propuestos por Hovmand, <i>et al.</i> , (2009); Al-Masri <i>et al.</i> , (2015) y Flynn (1968). . | 24 |
| Tabla 3. Lecturas de actividad de ^{210}Pb para muestras tratadas con protocolo según Hovmand, <i>et al.</i> , (2009), Al-Masri, <i>et al.</i> , (2015) y Flynn (1968)..... | 27 |
| Tabla 4. Ubicación de muestras del Salar Pedernales obtenidas en la campaña de otoño 2022..... | 29 |
| Tabla 5. Muestras Salar de Pedernales obtenidas en la campaña de primavera 2022..... | 30 |
| Tabla 6. Lecturas ^{210}Pb obtenidas para Zona Inactiva para campañas de otoño y primavera 2022. | 31 |
| Tabla 7. Lecturas de ^{210}Pb obtenidas para la Zona Intermedia para campañas de otoño y primavera 2022. | 32 |
| Tabla 8. Lecturas de ^{210}Pb obtenidas para Zona Activa para campañas de otoño y primavera 2022..... | 33 |
| Tabla 9. Estadística básica de los resultados del contenido de ^{210}Pb (dpm/g) en las campañas realizadas y por zona evaluada | 34 |
| Tabla 10. Tejidos analizados en las especies de plantas identificadas en la Zona Activa..... | 36 |
| Tabla 11. Factores de Transferencia obtenidos en muestras analizadas para las estructuras de <i>Zameioscirpus atacamensis</i> y <i>Puccinellia frígida</i> para las campañas de otoño y primavera 2022..... | 37 |
| Tabla 12. Resultados de lecturas de actividad de ^{226}Ra y ^{210}Pb utilizados en el cálculo de tiempo transcurrido desde muerte de plantas en la Zona Inactiva e Intermedia | 40 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Principales vías de entrada de ^{210}Pb al ambiente..... | 12 |
| Figura 2. Ubicación geográfica del lugar de obtención de muestras entre 476478,03 m E y 7089377,09 m N por el Norte hasta los 478512,01 m E y 7085339,51 m N por el sur (coordenadas UTM, Datum WGS 84 Huso 19S). Se muestra la Zona Activa, Zona Intermedia y Zona Inactiva de las áreas de muestreo para la recolección de plantas y suelo..... | 15 |
| Figura 3. Extracción de muestra en la Zona Inactiva (478512,84 m E, 7085337,66 m N; coordenadas UTM, Datum WGS 84 Huso 19S) desde cuadrante de 1m ² subdividido en cuadrantes de 400 cm ² para la recolección de las muestras en la campaña de muestreo de primavera 2022. | 19 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 4. Extracción de muestra en la Zona Activa (476478,30 m E ; 7089376,47 m N, coordenadas UTM, Datum WGS 84 Huso 19S) desde cuadrante de 1m ² subdividido en cuadrantes de 400 cm ² para la recolección de las muestras en la campaña de muestreo de primavera 2022. | 20 |
| Figura 5. Resumen del proceso de separación de sal y suelo donde en a) Muestra en oscilación, b) secado del material decantado, c) evaporación de agua con sal disuelta en ella, d) muestra de suelo recuperado e) muestras de sal recuperada. | 21 |
| Figura 6. Muestras utilizadas para evaluar eficiencia de digestión acida de tejido vegetal. | 23 |
| Figura 7. Actividad de ²¹⁰ Pb según diferentes métodos empleados. | 28 |
| Figura 8. Actividad de ²¹⁰ Pb (dpm/g) en muestras de la Zona Inactiva. | 31 |
| Figura 9. Actividad de ²¹⁰ Pb (dpm/g) en muestras de la Zona Intermedia. | 32 |
| Figura 10. Actividad de ²¹⁰ Pb (dpm/g) en muestras de la Zona Activa. | 34 |
| Figura 11. Promedio de ²¹⁰ Pb (dpm/g) para cada zona, por campaña de muestreo. | 35 |
| Figura 12. Variación anual de la actividad de ²¹⁰ Pb por especie y estructura plantar. | 36 |
| Figura 13. Años de muerte estimados por los métodos MCI y DER en los diferentes puntos de muestreo de las zonas Intermedia e Inactiva | 41 |
| Figura 14. Correlación entre ²¹⁰ Pb vs Pb total de las muestras en la Zona Inactiva del SVATH. | 43 |
| Figura 15. Correlación entre ²¹⁰ Pb vs Pb total para muestras de la Zona Activa del SVAHT. | 43 |
| Figura 16. Modelo conceptual de dinámica de muerte del SVAHT del Salar de Pedernales. | 44 |

Índice de anexos

| | |
|--|-----------|
| Anexo 1. Informes de resultados | 50 |
| Anexo 2. Tabla comparativa de la actividad de ²¹⁰ Pb y Pb total medidos en plantas del Salar de Pedernales | 55 |



Glosario

Actividad (A): Magnitud física que mide la tasa de desintegración de un radionucleido, se mide en Becquerel (Bq) que corresponde a una desintegración por segundo; desintegraciones por minuto (dpm) y Curie (Ci) que equivale a la cantidad de radioactividad contenida en 1 g de ^{226}Ra ($3,7 \times 10^{10}$ Bq)

Constante de desintegración (λ): Probabilidad por unidad de tiempo de que un átomo de un determinado nucleido se desintegre (s^{-1} , min^{-1} , h^{-1} , año^{-1}).

Decaimiento radiactivo: Cambio espontáneo de un nucleido inestable en otro. El nucleido inestable se denomina nucleido padre; el nucleido resultante del decaimiento se conoce como nucleido hija.

Desintegración: Fenómeno nuclear en el que un átomo radiactivo disminuye su masa y/o su nivel de energía de forma espontánea, lo que se manifiesta en la emisión de radiaciones ionizantes. Las formas más frecuentes de desintegración son la emisión de partículas alfa, beta y rayos gamma.

Ecuación de decaimiento: Ecuación que describe el cambio en el tiempo de la actividad de radionucleidos.

Equilibrio radioactivo: Es el equilibrio que existe en una serie de decaimiento que se da cuando un nucleido se desintegra a la misma tasa a la que se está produciendo, de manera que la cantidad de átomos permanecen constantes.

Equilibrio secular: Se refiere a una condición que se da en una serie de decaimiento en la cual la vida media del padre es mucho más larga que la vida media de la hija producida, de tal forma que en el equilibrio la actividad de la hija es igual a la actividad con la que decae el padre.

Geocronología: Ciencia que tiene como objetivo poder determinar la edad y sucesión cronológica de los acontecimientos geológicos que han tenido lugar en la historia de la tierra utilizando métodos como la datación radiométrica.

Geocronómetro: Método o elemento que se utiliza para medir o determinar el tiempo en términos geológicos, es decir, para estimar la edad de eventos geológicos o procesos que han ocurrido a lo largo de la historia de la Tierra.

Isótopo: Cada uno de los distintos nucleidos que tienen el mismo número atómico (número de protones) y, por tanto, pertenecen al mismo elemento químico, pero que difieren entre sí en el número de neutrones.

Isótopo radiactivo: Elementos naturales o artificiales que emiten radiaciones ionizantes.

Liofilización: Es un proceso que tiene como objetivo separar el agua (u otro solvente) de una disolución mediante congelación y posterior sublimación a presión reducida del hielo formado, para dar lugar a un material que se disuelve con facilidad.

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

Radiogeocronómetro: Elemento que actúa como indicador de tiempo en procesos, basado en la desintegración radiactiva, comúnmente utilizando radioisótopos.

Radioisótopo: Forma inestable de un elemento que libera radiación a medida que se descompone y se vuelve más estable.

Sonicación: Es el acto de aplicación de la energía del sonido (generalmente ultrasonidos) para agitar o dispersar las partículas de una muestra.

SVAHT: Sistema Vegetacional Azonal Hídrico Terrestre.

Trazadores radiogeoquímicos: sustancias químicas radiactivas empleadas para inferir procesos geológicos mediante la emisión de radiación.

Vida media: Es el tiempo que transcurre para que se disminuya a la mitad el valor inicial de alguna cantidad de un elemento radiactivo.



1. Resumen

El estudio de análisis forense de la vegetación azonal hídrica terrestre con afectación (SVAHT), en el sector Salar de Pedernales, surge de los acuerdos establecidos en el proceso de conciliación por demanda por daño Ambiental (Causa Rol D-07-2020), caratulada “Consejo de Defensa del Estado con Corporación Nacional del Cobre de Chile”, seguida ante el Primer Tribunal Ambiental. El objetivo de este estudio forense fue determinar la data y dinámica de muerte del SVAHT con afectación observable en el Salar de Pedernales. Esta investigación propone el uso del radionúclido ^{210}Pb como geocronómetro, dada su utilidad en escalas de tiempo moderno y a que ha sido empleado en diversos contextos, desde registros geocronológicos en sedimentos hasta la evaluación de la edad de peces teleósteos. El estudio se desarrolló en el Salar de Pedernales a lo largo de un gradiente espacial donde, se distinguen a lo menos tres zonas en los SVAHT; i) una primera zona donde actualmente hay presencia de vegetación viva y activa (Zona Activa), ii) una zona intermedia que presenta vegetación con disminución en la vigorosidad (Zona Intermedia) y iii) una zona con vegetación muerta (Zona Inactiva). Para estimar el tiempo transcurrido desde la muerte de las plantas muertas de la Zona Inactiva y de la Zona Intermedia del SVAHT, se utilizó la actividad de ^{210}Pb de las plantas vivas de la Zona Activa. En este proceso, se asumió que la actividad de las plantas vivas refleja el contenido actual y reciente de ^{210}Pb . En específico, para el cálculo de la edad de muerte se emplearon dos métodos, el método de actividad inicial constante (MCI) y el método de desequilibrio radioactivo (DER). El tiempo transcurrido desde la muerte de las plantas en la Zona Inactiva varió de 16,6 a 71,5 años según el método DER y de 10,8 a 60,8 años según el método MCI. En la Zona Intermedia, el intervalo de tiempo transcurrido desde la muerte fluctuó entre 16,7 y 62,9 años con el método DER y entre 11,9 y 58,0 años con el método MCI. Finalmente, los resultados entregados por ambos métodos de datación (MCI y DER) muestran que la disminución de la superficie del SVAHT habría sido un proceso gradual, donde la muerte de las plantas habría comenzado aproximadamente en el año 1951 en la Zona Inactiva, y alrededor del año 1959 en la Zona Intermedia. Este proceso habría durado alrededor de 71,5 años en la Zona Inactiva y 62,9 años en la Zona Intermedia, lo cual se habría estabilizado entre los años 2010 y 2011.



2. Introducción

Este estudio surge de los acuerdos establecidos en el proceso de conciliación por demanda por daño Ambiental (Causa Rol D-07-2020), caratulada “Consejo de Defensa del Estado con Corporación Nacional del Cobre de Chile”, seguida ante el Primer Tribunal Ambiental. En dicha demanda el Consejo de Defensa del Estado (CDE) demandó a Codelco, División Salvador (DS), por el supuesto daño ambiental generado en el Salar de Pedernales, producto de la extracción y captación de agua que se desarrolla en el sector. Dicho juicio terminó con un Avenimiento y Transacción entre ambas partes que contenía una serie de medidas destinadas a reparar el medio ambiente presuntamente dañado, el cual fue aprobado por el Primer Tribunal Ambiental con fecha 29 de diciembre de 2020. Además, el Primer Tribunal Ambiental de Antofagasta propuso la implementación de medidas complementarias, entre las cuales se incluye la realización de un estudio destinado a desarrollar lineamientos orientados a estimar la data y dinámica de muerte de los Sistemas Vegetacionales Hídricos Terrestre (SVAHT) inactivos presentes en el Salar de Pedernales. Para llevar a cabo este propósito, y tomando en cuenta las discusiones técnicas durante la diligencia judicial en terreno del Primer Tribunal Ambiental, se recomendó el uso de radionúclidos naturales de la serie ^{238}U .

La presente investigación se ha desarrollado bajo la premisa que actualmente no existen metodologías que permitan estimar el tiempo aproximado de afectación de la vegetación en este particular ambiente salino altoandino y, por lo tanto, se ha sugerido el uso de una metodología forense que considere el uso de radionúclidos naturales de la serie ^{238}U , específicamente el uso de ^{210}Pb que permite utilizarlo como geocronómetro en un intervalo de tiempo de hasta 150 años.

En general, cuando se requiere conocer el tiempo de algún proceso o evento se pueden utilizar radionúclidos que se caracterizan por tener una tasa de decaimiento constante y que es característica para cada elemento radioactivo. Es por esta razón que los radionúclidos han sido utilizados ampliamente como geocronómetros de distintos procesos que ocurren en el ambiente (i.e., sedimentación, depositación, historia de procesos de contaminación, datación arqueológica, tasas de acreción, edad de organismos, etc.).

La aplicación de radionúclidos se fundamenta en las propiedades de elementos inestables, así como de su comportamiento fisicoquímico. Estos elementos, indistintamente de su comportamiento radioactivo pueden participar en diversas reacciones, como precipitación, disolución, absorción, adsorción, ingestión, acumulación, depositación, entre otras, lo que resulta en su presencia en todos los compartimentos de un ecosistema y en todas las matrices ambientales. No obstante, es la capacidad de decaimiento radioactivo la propiedad que posibilita su uso como cronómetros de distintos procesos físico-químicos en los que intervienen. Este proceso determina las escalas de tiempo en las que estos elementos pueden emplearse.

Para evaluar los aportes de sustancias que ocurren en el tiempo en diferentes ecosistemas, se utilizan trazadores radiogeocímicos asociados al material que está llegando, los cuales proporcionan la escala temporal de estos aportes (Appleby & Oldfield, 1978; Robbins & Edgington, 1975). En este contexto, los trazadores radioactivos naturales, particularmente los de la serie del ^{238}U son útiles, ya que se conoce con exactitud sus modos de producción y decaimiento. Estos radioisótopos se evalúan en los diferentes compartimentos ambientales (i.e., agua, suelo, sedimentos y atmósfera) y a través de sus actividades y vidas medias se pueden evaluar las tasas a la que estos procesos ocurren (Azevedo, 1988).

En escalas de tiempo moderno, es decir, en muestras cuya edad no supere los 150 años, el ^{210}Pb ha sido usado ampliamente como geocronómetro en investigación ambiental (Laisaoui et al., 2008, Ziad et al., 2011). Así este radionúclido se ha usado como trazador de procesos atmosféricos (Graustein & Turekian, 1996), tasas de erosión (Walling et al., 2003; Meriguetti Pinto et al., 2013), sedimentación y datación de sistemas acuáticos (Horvatini et al., 2008; Lima et al., 2014), registros de aportes antropogénicos en sedimentos costeros (Salamanca y Camaño, 1994) y cálculo de edad de peces teleósteos (Salamanca 2001; 2007). Particularmente este radionúclido, perteneciente a la serie del ^{238}U , se ha utilizado ampliamente para obtener registros geocronológicos en los sedimentos de escala reciente, (Appleby & Oldfield, 1978; Krishnaswami & Lal, 1978), ya que tiene una vida media de 22,3 años, lo que permite conocer la edad de sedimentos en una escala temporal de aproximadamente 100 a 150 años. No obstante, lo anterior requiere conocer adicionalmente el contenido de ^{226}Ra que es quien lo produce por decaimiento radioactivo (Krishnaswami & Lal, 1978; Luque Marín, 2003).

Los antecedentes bibliográficos preliminares indican que el ^{210}Pb está presente en el suelo producto del decaimiento de su padre ^{226}Ra (vida media de 1600 años) a través de su hija ^{222}Rn (vida media de 3,82 días), que es un radioisótopo gaseoso que luego se transforma a ^{210}Pb . Pero también por este mismo fenómeno, el ^{222}Rn puede emanar desde el suelo y alcanzar la atmósfera decayendo luego a ^{210}Pb , el cual vuelve a la superficie de la tierra con

las precipitaciones secas y/o húmedas, por lo que existe un flujo continuo de este radionúclido a la superficie del suelo (**Figura 1**). Así, las plantas en el suelo pueden incorporar este radionúclido de una manera similar como lo hacen con el Pb estable o no radiactivo, ya que el ^{210}Pb radiactivo se comporta químicamente como el Pb no radiactivo, es decir, se puede disolver, adsorber, precipitar, absorber, etc., usando para ello los mismos mecanismos fisiológicos que para el Pb no radiactivo. Esto significa que el ^{210}Pb se puede encontrar presente en una gran variedad de plantas y ambientes. En la **Tabla 1** se muestra el contenido de ^{210}Pb en diferentes vegetales y las concentraciones presentes en ellas.

Con los antecedentes señalados anteriormente, Codelco División Salvador encomendó la realización de un estudio científico al Centro de Excelencia Internacional de la Universidad de Queensland, SMI-ICE-Chile para determinar la data y dinámica de muerte de las plantas del SVAHT.

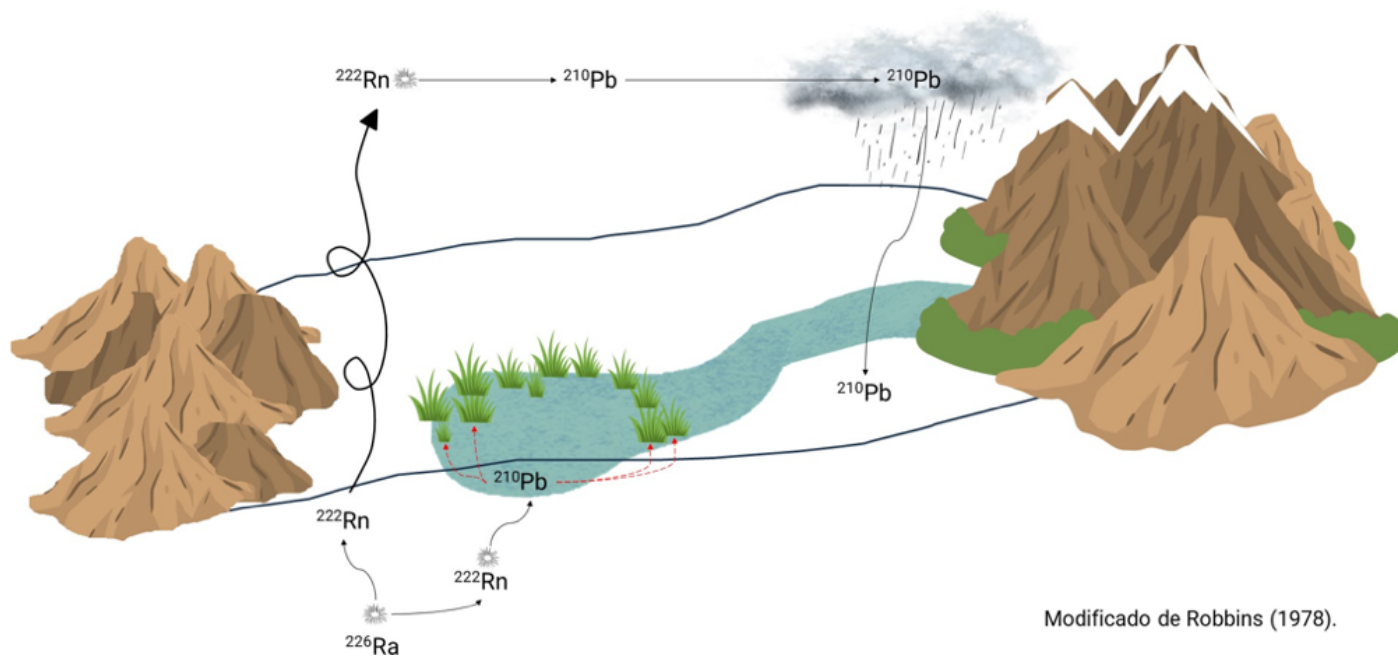


Figura 1. Principales vías de entrada de ^{210}Pb al ambiente.

Tabla 1. Comparación de contenidos de ^{210}Pb en diferentes tipos de vegetación.

| Planta | Unidad | | Rango de ^{210}Pb | | Muestra Analizada | Fuente |
|--|--------|-----|----------------------------|-------------|-------------------|--------------------------------|
| <i>Artemisa sp.</i> | Bq /kg | p.s | 15,54±5,92 | 51,43±39,96 | Planta entera | Ibrahim & Whicker, 1987 |
| Alfalfa | Bq /kg | p.s | 0,94 | 1,04 | Planta entera | Persson, 2014 |
| Menta | Bq /kg | p.s | 42,60 | *** | Planta entera | Kovacs, <i>et al.</i> , 2015 |
| Manzanilla | Bq /kg | p.s | 34,10 | *** | Planta entera | Kovacs, <i>et al.</i> , 2015 |
| <i>E. augstifolium</i> | Bq /kg | p.s | 12,40±8,55 | *** | Maleza/pastos | Mahon & Mathew, 1983 |
| <i>Cladonia convoluta</i> | Bq/kg | - | 188 | 200 | Planta entera | Sert <i>et al.</i> , 2011 |
| <i>Homalotecium sericeum</i> | Bq/kg | - | 188 | 575 | Planta entera | Sert <i>et al.</i> , 2011 |
| <i>Urtica dioica</i> | Bq/kg | - | 41,43±0,23 | *** | Hojas | Olszewski <i>et al.</i> , 2016 |
| <i>Urtica dioica</i> | Bq/kg | - | 1,52±0,15 | *** | Raíces | Olszewski <i>et al.</i> , 2016 |
| <i>Imleria badia / Marasmius oreades</i> | Bq/kg | - | 0,88±0,04 | 3,06±0,09 | Planta entera | Szymanka <i>et al.</i> , 2020 |
| <i>Puccinellia frígida / Triglochin concinna// Zameioscirpus atacamensis</i> | Bq/kg | - | 3,0±0,70 | 12,0±1,70 | Planta entera | Este estudio |
| Salar Pedernales Zona Inactiva | Bq/kg | - | 1,7±0,17 | 8,2±0,30 | Planta entera | Este estudio |

*** No Registra dato, p.s: peso seco

Nota: Se han incorporado las mediciones preliminares en plantas activas e inactivas recolectadas en el Salar de Pedernales.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Ejecutar un estudio científico, que permita determinar la data y dinámica de muerte de los SVAHT con afectación observable en el Salar de Pedernales.

3.2. Objetivos específicos

- Desarrollar una metodología de preparación de las muestras vegetales para la determinación de ^{210}Pb .
- Determinar el contenido de ^{210}Pb en plantas vivas y plantas muertas en el área de estudio.
- Caracterización del contenido de ^{210}Pb en la parte aérea y subterránea de las plantas.
- Estimar el intervalo de tiempo transcurrido entre las plantas vivas (mantillo) que ocupan la zona de vegas del salar y las plantas muertas (rastrojo) que habitan la zona denudada.



4. Materiales y métodos

El presente estudio, se desarrolló en el Salar de Pedernales a lo largo de un gradiente espacial donde, a priori, se distinguen a lo menos tres zonas en los Sistemas Vegetacionales Hídricos Terrestre (SVAHT); i) una primera zona donde actualmente hay presencia de vegetación viva y activa (Zona Activa), ii) una zona intermedia que presenta vegetación con disminución en la vigorosidad (Zona Intermedia) y iii) una zona con vegetación muerta (Zona Inactiva) (Figura 2).

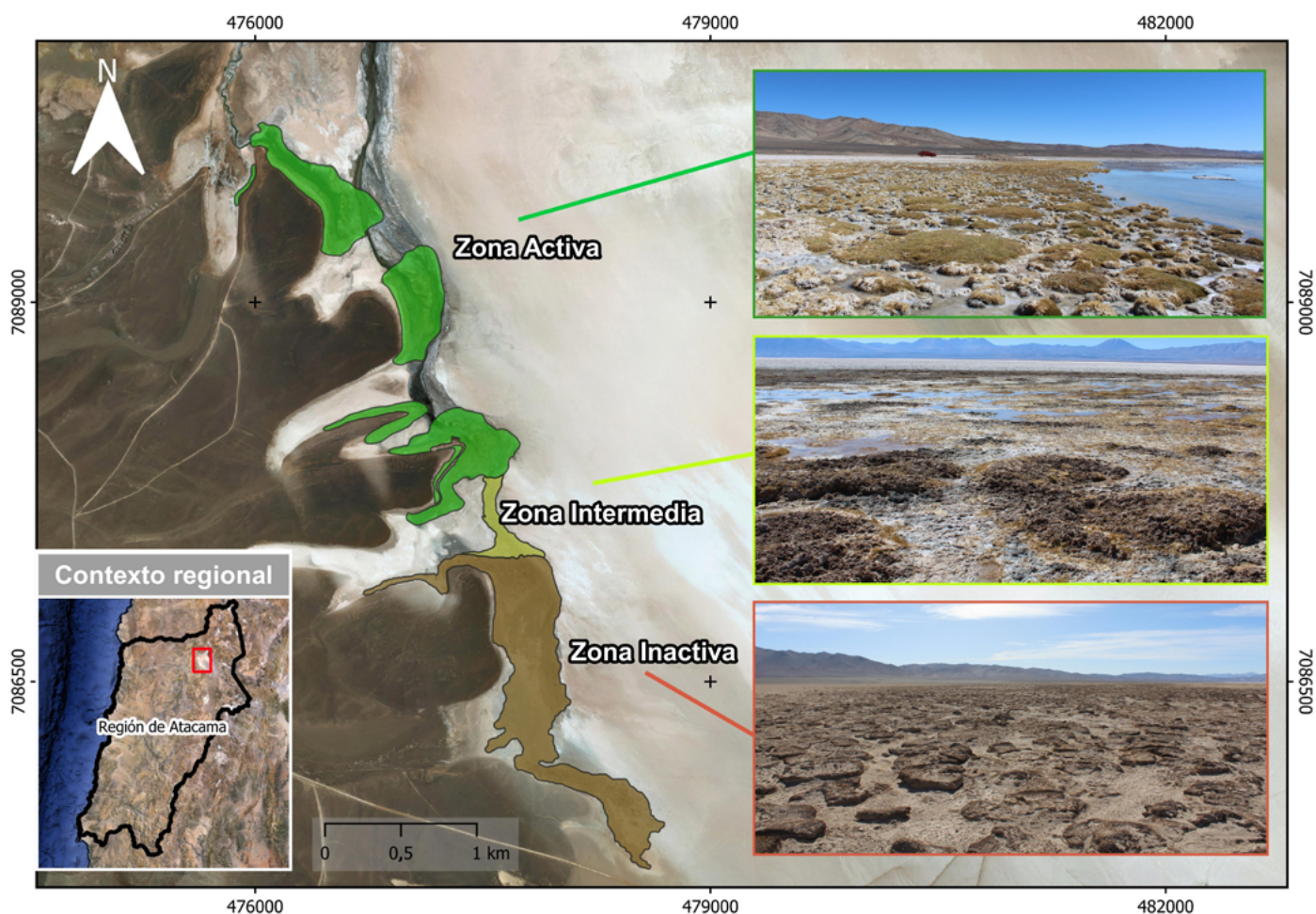


Figura 2. Ubicación geográfica del lugar de obtención de muestras entre 476478,03 m E y 7089377,09 m N por el Norte hasta los 478512,01 m E y 7085339,51 m N por el sur (coordenadas UTM, Datum WGS 84 Huso 19S). Se muestra la Zona Activa, Zona Intermedia y Zona Inactiva de las áreas de muestreo para la recolección de plantas y suelo.

4.1. Fundamentos teóricos de la geocronología utilizando ^{210}Pb

4.1.1. MODELO DE ACTIVIDAD INICIAL CONSTANTE

En la **Figura 1** se presentan las diferentes vías por las cuales el ^{210}Pb circula en el ambiente. En ella, se aprecia que la atmósfera es una fuente importante de este radionúclido, ya que se produce a partir del decaimiento del ^{222}Rn , un gas inerte que emana desde el suelo debido al decaimiento de su padre el ^{226}Ra presente en la corteza terrestre. Esto determina que el ^{210}Pb puede ser incorporado a una planta terrestre a través de dos vías, es decir, i) desde el suelo absorbido por las raíces, y ii) desde la atmósfera, por depositación directa en aerosoles debido al decaimiento de su precursor ^{222}Rn .

Por lo tanto, para estimar la edad de las plantas de la Zona Inactiva del Salar de Pedernales, se puede medir el ^{210}Pb en las plantas de la zona de vegetación viva (Zona Activa), que se asumirá que representa la actividad actual y reciente de ^{210}Pb y se comparará con el ^{210}Pb de la vegetación muerta (Zona Inactiva). Se espera que la vegetación muerta de la Zona Inactiva tenga menores actividades de ^{210}Pb que las plantas vivas, ya que la disminución de la actividad del trazador radioactivo se deberá solo al decaimiento radioactivo natural. En esta aproximación, las plantas de la zona intermedia en estado moribundo deberían tener actividades de ^{210}Pb también menores que las plantas del SVAHT activo, pero mayores que las de la zona denudada. Esto permite aplicar la ecuación de decaimiento radioactivo para estimar el tiempo transcurrido entre las diferentes zonas, lo que representa las dos condiciones de la vegetación del salar, es decir, viva (activa) v/s muerta (inactiva).

Entonces, se puede establecer que el contenido de ^{210}Pb en la planta tendrá dos orígenes, la parte aérea que se relacionará con el aporte atmosférico reciente y el contenido en las raíces que se relaciona con el absorbido por las raíces desde el suelo.

Es decir, se puede escribir la ecuación que considera las dos fuentes que pueden aportar ^{210}Pb a la planta:

$$^{210}\text{Pb})_{\text{planta}} = ^{210}\text{Pb})_{\text{depositado en parte aérea}} + ^{210}\text{Pb})_{\text{absorbido por las raíces}}$$

Así, se espera que exista una diferenciación en el contenido de ^{210}Pb en las plantas de las dos zonas. Las plantas vivas estarán incorporando activamente el ^{210}Pb en sus tejidos, mientras que en las plantas muertas (SVAHT Inactivo) no habrá incorporación activa de ^{210}Pb y conservarán únicamente el ^{210}Pb que tenían al momento de su muerte. Por lo tanto, los cambios en la actividad del ^{210}Pb se deberán solo al decaimiento radioactivo y no a la incorporación de nuevo ^{210}Pb , ya que la planta no puede llevar a cabo ningún proceso de absorción. En esta condición, las plantas muertas no tienen la capacidad de incorporar el ^{210}Pb reciente, y la cantidad de este radionúclido corresponde a la que tenía en el momento en que se detuvo la incorporación activa, ya sea a través de las raíces o de la parte aérea, si este fuera el caso. En ese momento se inicia el tiempo del radiogeocronómetro, que hace variar la actividad del ^{210}Pb en la planta únicamente debido al decaimiento radioactivo.

Así considerando la ecuación de decaimiento radioactivo:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

Donde:

A= actividad en cualquier instante.

A_0 = Actividad inicial.

t= tiempo transcurrido.

λ = constante de decaimiento.

Luego:

$$t = 1/\lambda \ln (A_0 / A_t)$$

Donde:

t = tiempo transcurrido desde la muerte.

λ = constante de decaimiento del ^{210}Pb (22,3 años).

A_0 = actividad inicial (Zona Activa).

A_t = actividad de la muestra t años después de muerte (Zona Inactiva).

La estimación de la fecha de muerte requiere que la actividad del radionúclido que se está midiendo sea solo la que está al interior de la planta y que fue absorbida por los mismos procesos fisiológicos en toda el área de estudio y en todas las épocas. Es decir, no hay aportes de otras fuentes como por ejemplo de la depositación atmosférica seca que puede existir en el área, o bien de material del suelo resuspendido, ni del polvo del ambiente.

4.1.2. MÉTODO DE DESEQUILIBRIO RADIOACTIVO (RAZÓN $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$)

Otro método utilizado para medir edad en organismos, aplicado en organismos marinos (vertebrados e invertebrados) ha sido emplear el desequilibrio entre el ^{210}Pb y ^{226}Ra (Turekian *et al.*, 1978; Smith *et al.*, 1991). En la presente investigación se ha utilizado una variante de este método para estimar una edad de muerte de vertebrados superiores (Shuller *et al.*, 2004), pero aplicado a las plantas del SVAHT Inactivo del Salar de Pedernales. El modelo supone que el ^{226}Ra , que tiene una vida media ($t_{1/2}$) de 1600 años, es absorbido desde el agua del salar por las raíces y después de la muerte de las plantas quedan retenidos los productos del decaimiento, i.e., ^{210}Pb ($t_{1/2}$ 22,3 años) en un sistema químico cerrado que tiende al equilibrio secular entre ambos radioisótopos en una escala de tiempo que depende por los productos de decaimiento (i.e., 80-100 años). Dentro de este lapso la razón padre/hija está en desequilibrio, de tal forma que midiendo las actividades de los dos radioisótopos se puede estimar el grado de desequilibrio y, por lo tanto, el tiempo transcurrido desde la muerte de la planta. La ecuación que gobierna este desequilibrio esta descrita en Ivanovich & Harmon (1992):

$$(^{210}\text{Pb}) = [\lambda_{\text{Pb}} / (\lambda_{\text{Pb}} - \lambda_{\text{Ra}})] (^{226}\text{Ra}) [1 - e^{-(\lambda_{\text{Pb}} - \lambda_{\text{Ra}}) t}]$$

Cuando t es mucho mayor que la vida media de ^{210}Pb , la razón isotópica ($^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$) tiende a un equilibrio secular igual a $\lambda_{\text{Pb}} / (\lambda_{\text{Pb}} - \lambda_{\text{Ra}})$ i.e., 1,014. Dado que el ^{226}Ra tiene una vida media mucho mayor que el ^{210}Pb , esta expresión se escribe simplificada como:

$$(^{210}\text{Pb}) / (^{226}\text{Ra}) = [1 - e^{-\lambda_{\text{Pb}} t}]$$

Donde:

$(^{210}\text{Pb}) / (^{226}\text{Ra})$ = razón de actividad isotópica.

λ_{Pb} = constante de decaimiento del ^{210}Pb = 0,031 años⁻¹.

t = tiempo transcurrido desde la muerte de las plantas.

Las suposiciones de este modelo adaptado al tejido vegetal consideran que la actividad isotópica inicial entre el padre y la hija es cercana a 1, es decir, tiende al equilibrio secular ($R_0 \sim 1$). Sin embargo, después de la muerte de la planta, se genera un sistema cerrado química y fisiológicamente, y la razón isotópica se aleja de 1. Esto implica la ausencia de incorporación de nuevos radioisótopos, y los cambios en la actividad solo se producen por decaimiento radioactivo.

Esta aproximación supone que todos los radioisótopos de vida media corta, producto del decaimiento del ^{226}Ra , como ^{222}Rn (vida media 3,89 días), ^{214}Pb (vida media 26,8 minutos), ^{214}Bi (vida media 19,7 minutos), alcanzan el equilibrio secular dentro de la planta y permanecen como un sistema cerrado, sin intercambio con el exterior. Por lo tanto, a medida que la razón isotópica se aleja más del valor 1, ha transcurrido más tiempo, proporcional a la vida media de la hija ^{210}Pb .

4.2. Obtención de muestras

4.2.1. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

Durante el periodo de estudio, se realizaron dos campañas de muestreo en estaciones contrastantes (otoño y primavera), con el fin de investigar la posible variabilidad intra-anual en el contenido de ^{210}Pb en las plantas de las zonas identificadas inicialmente. Para ello, se obtuvieron muestras vegetales vivas de la Zona Activa, plantas vivas y muertas de la Zona Intermedia, y restos de plantas muertas en la Zona Inactiva (**Figura 3**).

La metodología empleada para la recolección de muestras de plantas y suelo consistió en el uso de un cuadrante de 1 m² subdividido en cuadrantes de 20 cm x 20 cm, como se muestra en la **Figura 3** y **Figura 4**. Este procedimiento implica colocar un cuadrado sobre la vegetación para extraer una muestra en triplicado desde el cuadrante de muestreo. Adicionalmente, se recolectaron muestras de suelo en cada punto de muestreo, las cuales fueron almacenadas en bolsa de polietileno, etiquetadas y enviadas al Laboratorio de Radioquímica Ambiental de la Universidad de Concepción.

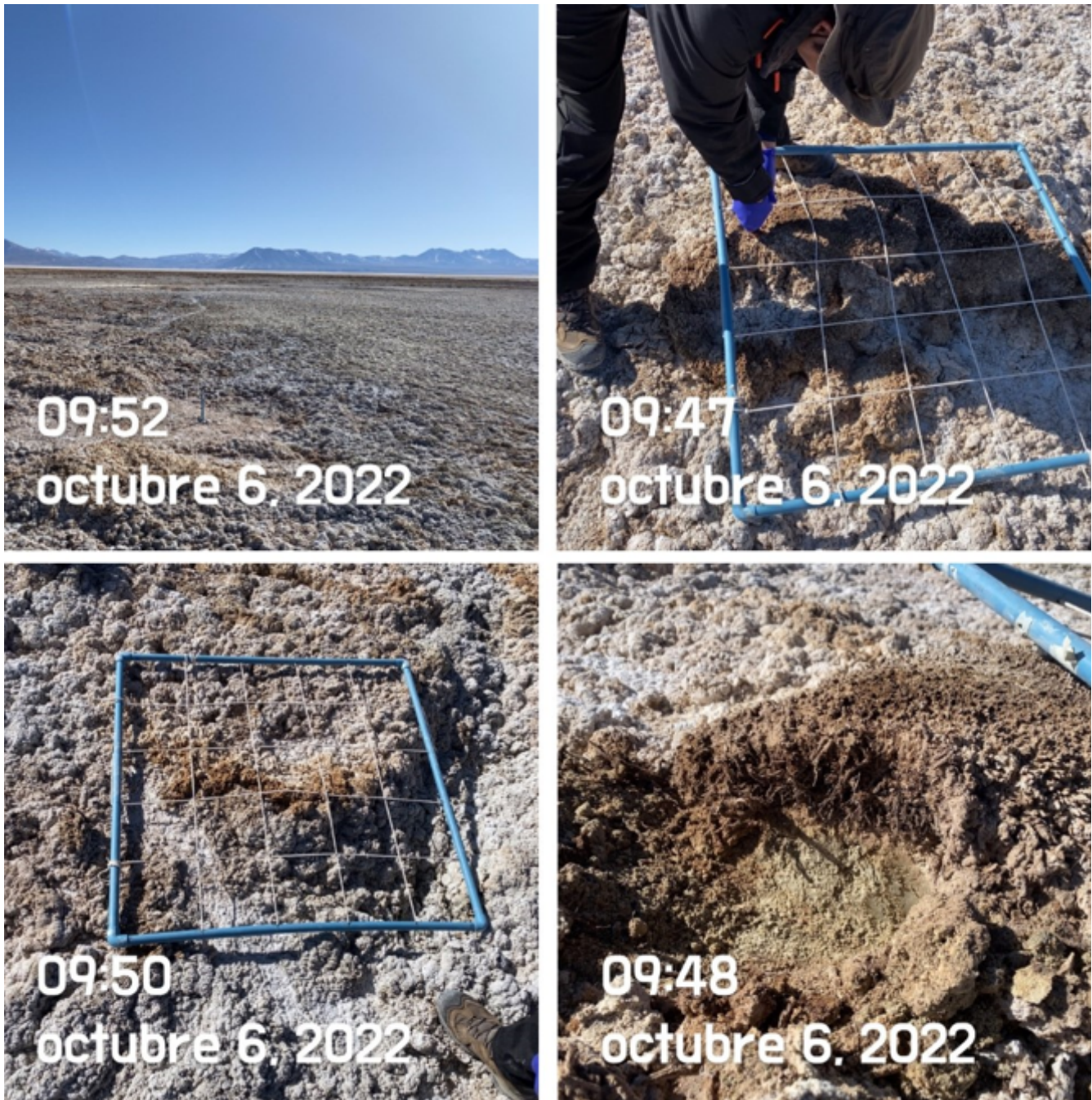


Figura 3. Extracción de muestra en la Zona Inactiva (478512,84 m E, 7085337,66 m N; coordenadas UTM, Datum WGS 84 Huso 19S) desde cuadrante de 1m² subdividido en cuadrantes de 400 cm² para la recolección de las muestras en la campaña de muestreo de primavera 2022.



Figura 4. Extracción de muestra en la Zona Activa (476478,30 m E ; 7089376,47 m N, coordenadas UTM, Datum WGS 84 Huso 19S) desde cuadrante de 1m² subdividido en cuadrantes de 400 cm² para la recolección de las muestras en la campaña de muestreo de primavera 2022.

4.2.2. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Las muestras de planta recolectadas para el análisis del radionúclido ²¹⁰Pb fueron procesadas en el Laboratorio de Radioquímica Ambiental del Laboratorio Oceanografía Química de la Universidad de Concepción para la cuantificación del contenido de ²¹⁰Pb mediante Espectrometría Alfa. El tratamiento inicial para las muestras vegetales (plantas) consistió en sonicación, lavado y liofilización. Estos pasos se realizaron con el objetivo de obtener muestras de tejido vegetal libres de impurezas. Posteriormente, se llevó a cabo un ataque ácido utilizando una mezcla de H₂O₂, HNO₃ y HCl para disolver completamente las muestras, permitiendo obtener una solución homogénea que contiene el radionúclido ²¹⁰Pb. Esta solución resultante se sometió a una depositación en placas de plata y se procedió al conteo durante 24 horas en un espectrómetro alfa. La solución remanente fue guardada para la medición de ²²⁶Ra mediante la técnica de emanación de ²²²Rn por centelleo gaseoso.

Adicionalmente, el agua de lavado sobrante se sometió a un secado de 30°C en una estufa, permitiendo que el agua se evapore por completo. De esta manera, se obtuvieron muestras

de suelo a partir del residuo sólido resultante (Figura 5). Para el análisis de las muestras de suelo, se aplicó un proceso de digestión ácida basado en la metodología propuesta por Flynn (1968). Una porción de la muestra obtenida se sometió a un ataque ácido fuerte utilizando una mezcla de HF, HNO₃ y HCl. Este proceso de digestión ácida permitió obtener una solución adecuada para el análisis del radionúclido ²¹⁰Pb en las muestras de suelo. El objetivo principal de estos tratamientos y procesos de digestión es garantizar la completa eliminación de la materia orgánica y los silicatos presentes en las muestras, lo que resulta crucial para obtener resultados precisos y confiables en la determinación del radionúclido ²¹⁰Pb presente en planta y suelos.

Para evitar lecturas incorrectas de ²¹⁰Pb debido a la presencia de cristales de sal en algunas muestras de suelo, se llevó a cabo la separación de la fracción suelo/sal. Para ello, se utilizó la misma agua de lavado aplicada a las muestras vegetales, siguiendo un protocolo donde se transfirió la mezcla de suelo y sal en una botella de polipropileno, la cual se mantuvo en agitación constante en una mesa vibratoria durante un tiempo preestablecido de 24 horas para disolver por completo la sal presente en la mezcla (Figura 5).

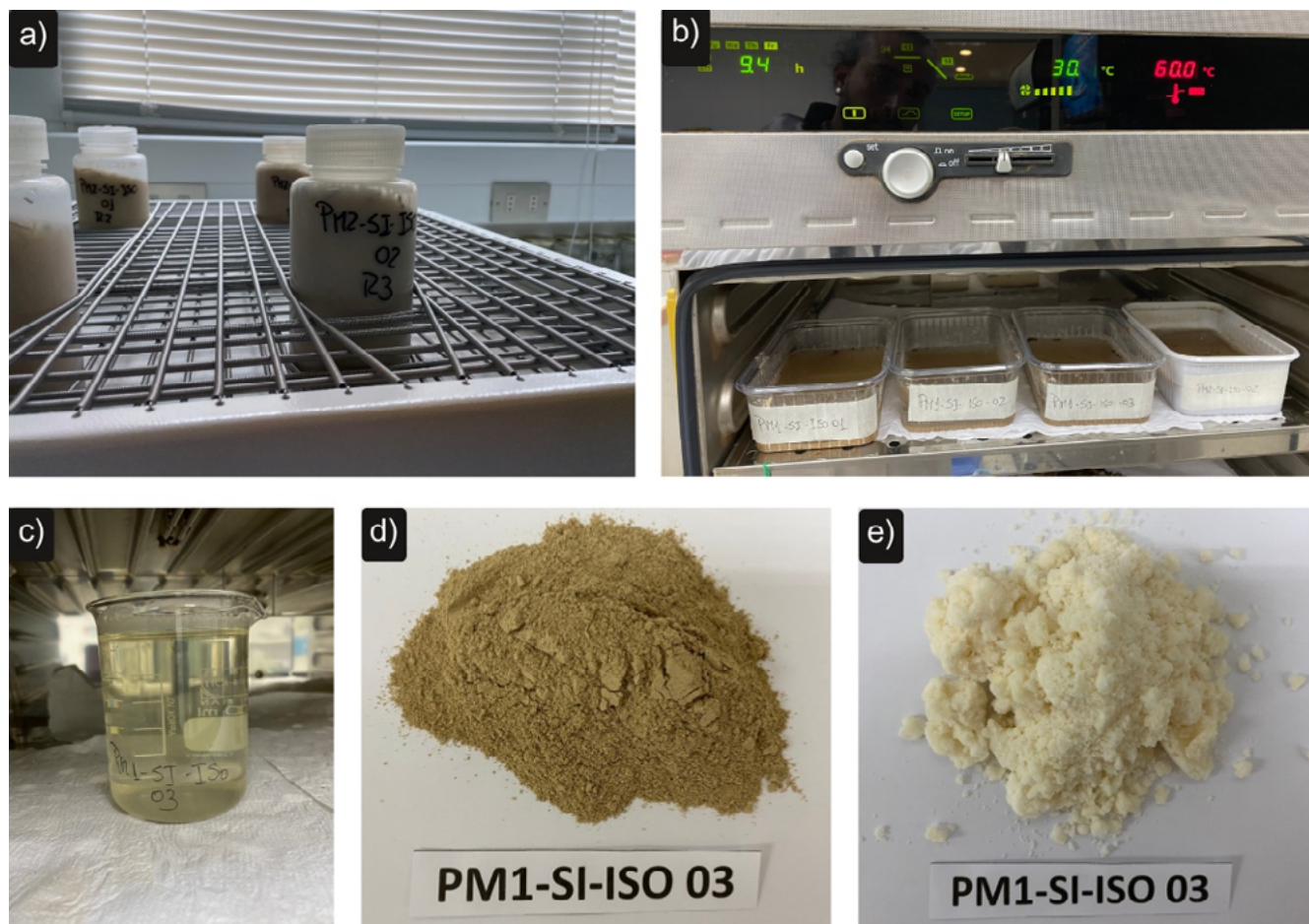


Figura 5. Resumen del proceso de separación de sal y suelo donde en a) Muestra en oscilación, b) secado del material decantado, c) evaporación de agua con sal disuelta en ella, d) muestra de suelo recuperado e) muestras de sal recuperada.

Después de finalizar el proceso de agitación, las muestras se dejaron en reposo para permitir que todo el material particulado decantara, así la sal se disolvía en el agua y el material particulado (suelo) se depositaba en el fondo de la botella. Una vez decantado el material, todo el líquido que contenía la sal disuelta, se transfirió a un vaso precipitado para obtener la sal que estaba presente en la muestra. Por otro lado, el material que decantó, que correspondía al suelo, fue secado en una estufa a 30°C hasta peso constante. Esto permitió obtener una muestra del suelo presente en el material analizado en forma de material seco. Con este protocolo, se logró separar de manera efectiva la fracción suelo de la sal, con el objetivo de eliminar cualquier interferencia que pudiera afectar las mediciones de ^{210}Pb . Tanto las muestras de suelo como las muestras de sal obtenidas fueron procesadas de la misma manera para realizar las lecturas de ^{210}Pb .

4.2.3. LECTURAS DE ^{210}Pb

La actividad del ^{210}Pb se midió mediante espectrometría alfa, utilizando un Espectrómetro Alfa marca CANBERRA modelo Integrated Alpha Analyst de 8 cámaras de conteo y 4096 canales, equipado con detectores PIPs y manejado por Apex-Alpha™ software.

4.2.4. LECTURAS DE ^{226}Ra

El ^{226}Ra tiene una vida media de 1600 años, proviene de la serie de desintegración del ^{238}U , que decae para producir el gas noble ^{222}Rn ($t_{1/2} = 3,82$ días). La actividad del ^{226}Ra se determinó mediante centelleo gaseoso utilizando una línea de extracción de Rn, atrapando el gas en celdas de conteo y cuantificando la actividad en un sistema de conteo gaseoso Modelo DRC-MK6 (Mathieu *et al.*, 1988) con un fotomultiplicador como detector.

4.2.5. CONCENTRACIÓN DE Pb TOTAL EN PLANTAS

Las muestras de tejido vegetal fueron sometidas a una digestión ácida fuerte, utilizando aproximadamente 1 g de tejido, los que se introdujeron en vasos de teflón previamente lavados con detergente no iónico y descontaminados. El ataque total se realizó utilizando una mezcla de ácido nítrico, ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico (HNO_3 , HCl y HF) sobre una placa calefactora Thermo Scientific Type 2200, manteniendo un control continuo de la temperatura ($\sim 90^\circ\text{C}$) llevados hasta sequedad. Las muestras digeridas fueron recuperadas con agua mili-Q y posteriormente analizadas por Espectrometría de Absorción Atómica de Llama (EAA, Thermo Scientific, Modelo ICE 3500 AA System).

Las mediciones analíticas de Pb se realizaron de acuerdo a un plan de control de la calidad (QC) y aseguramiento de la calidad (QA) en todas las etapas del proceso analítico, utilizando las herramientas estadísticas que se aplican en la evaluación de los datos derivados del control de calidad para establecer la exactitud y precisión de sus mediciones, los que incluyen muestras en duplicado, blancos analíticos y uso de Material de Referencia Certificado MESS-4 y DORM-5 del National Research Council de Canadá.

5. Resultados y Discusión

5.1. Desarrollo de una metodología para la preparación de muestras vegetales para la determinación de la actividad de ^{210}Pb

Para lograr este objetivo, se llevó a cabo una comparación detallada de los resultados obtenidos mediante diversas técnicas analíticas utilizadas para determinar la actividad específica de ^{210}Pb . El enfoque incluyó la integración de técnicas analíticas encontradas en la literatura para la preparación de muestras vegetales destinadas a la determinación de ^{210}Pb . Fundamentalmente, se buscó optimizar la etapa de digestión ácida en el tratamiento de las muestras. En cuanto al pre-tratamiento de las muestras, se emplearon varios métodos de digestión química en las muestras vegetales, las que se muestran en la **Figura 6**. La diversidad de métodos tuvo como objetivo principal lograr una digestión ácida exhaustiva en las muestras.



Figura 6. Muestras utilizadas para evaluar eficiencia de digestión ácida de tejido vegetal.

Para la preparación de las muestras, se utilizó la estructura completa de la planta siguiendo el siguiente procedimiento. En primera instancia, las muestras fueron sometidas a un proceso de sonicación utilizando agua ultrapura Tipo II durante un período de 30 minutos. El objetivo principal de esta etapa fue eliminar todas las partículas que pudieran estar adheridas a la superficie de las muestras vegetales. Tras completar el proceso de sonicación, cada muestra fue sometida a un lavado individual con agua ultrapura Tipo II. Este proceso de lavado se repitió según fuera necesario hasta que el agua de enjuague se volviera translúcida, lo que indicaba la efectiva eliminación de cualquier impureza presente.

Una vez que las muestras estuvieron completamente limpias, se procedió a congelarlas durante un período de 12 horas, para ser sometidas a un proceso de liofilización, que permite preservar la integridad y características originales del material tratado.

Para cumplir con este objetivo específico, se procedió inicialmente a implementar los procedimientos recomendados por Hovmand *et al.*, (2009) y el propuesto por Al-Masri *et al.*, (2015), ambos siendo comparados con el proceso de digestión ácida basado en el método de Flynn (1968) para muestras de suelo.

Estos protocolos incluyen diversas técnicas, como la aplicación de peróxido de hidrógeno al 30%, una extensión de los tiempos de digestión y la depositación espontánea en discos de plata, entre otros procedimientos.

Las muestras se sometieron a un proceso de molienda con el fin de reducir su tamaño y garantizar la homogeneidad de ésta. Las cantidades de muestra utilizadas para cada método en estas pruebas están detalladas en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Muestras sometidas a protocolos propuestos por Hovmand, *et al.*, (2009); Al-Masri *et al.*, (2015) y Flynn (1968).

| Identificación de Muestra | Método Utilizado | Peso Muestra(g) |
|---------------------------|--------------------------------|-----------------|
| L09 | Hovmand, <i>et al.</i> , 2009 | 0,5531 |
| L-26 Po | | 0,5325 |
| L-26 Po (D) | | 0,5226 |
| L-26 | | 0,5579 |
| MH-08 | | 0,5193 |
| L09 | Al-Masri, <i>et al.</i> , 2015 | 0,5091 |
| L-26 Po | | 0,5281 |
| L-26 Po (D) | | 0,5114 |
| L26 | | 0,5202 |
| MH-08 | | 0,5109 |
| L09 | Flynn,1968 | 0,5142 |
| L-26 Po | | 0,5353 |
| L-26 Po (D) | | 0,5240 |
| L26 | | 0,5157 |
| MH-08 | | 0,5123 |

5.1.1. PROTOCOLOS DE DIGESTIÓN DE MUESTRAS

5.1.1.1. Protocolo propuesto por Hovmand et al. (2009)

En este método se utilizó exclusivamente ácido nítrico (HNO_3) al 65%. Para llevar a cabo estas pruebas, se emplearon 50 ml de HNO_3 al 65%, además de la incorporación de un trazador interno de ^{209}Po a una concentración de 2,22 dpm/g. En este proceso, se llevó a cabo una digestión en frío durante un período de 48 horas, realizada bajo una campana extractora para asegurar condiciones seguras.

5.1.1.2. Protocolo propuesto por Al-Masri et al. (2015)

Este método se basa en la utilización de ácido nítrico (HNO_3) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) que facilita la degradación de la fracción orgánica de la planta. Para el conjunto de muestras en cuestión, se empleó una relación de 3 partes de ácido por 1 parte de peróxido, es decir, 15 ml de HNO_3 al 65% y 5 ml de H_2O_2 al 30%. Además, se incorporó un trazador interno de ^{209}Po a una concentración de 2,22 dpm/g. El proceso de preparación comienza con una primera digestión en frío durante 24 horas. Esta etapa se llevó a cabo bajo una campana extractora debido a que la combinación de HNO_3 al 65% y H_2O_2 al 30% genera vapores de NO_2 .

Para ambos métodos descritos anteriormente, una vez transcurrido el tiempo requerido para la digestión en frío, la solución resultante se sometió a un proceso de evaporación controlada. Esta evaporación se llevó a cabo a una temperatura constante de 60°C , continuando hasta lograr la completa desecación de la muestra.

Adicionalmente, después de finalizar la evaporación del ácido nítrico (HNO_3) al 65%, se procedió a una segunda etapa de digestión ácida, utilizando ácido clorhídrico (HCl) al 37%. El propósito de añadir esta segunda etapa con HCl fue garantizar la efectiva eliminación de la materia orgánica residual presente en las muestras.

5.1.1.3. Protocolo propuesto por Flynn (1968)

Este método se basa en la utilización de ácidos fuertes en una mezcla de ácido fluorhídrico (HF), ácido nítrico (HNO_3) al 65% y ácido clorhídrico (HCl) al 37% estos dos últimos ácidos en partes iguales en volumen, es decir 10 ml de HF 15 ml de HNO_3 y 15 ml HCl , además se incorporó un trazador interno de ^{209}Po a una concentración de 2,22 dpm/g. El proceso de preparación comienza con una primera digestión en frío que dura 24 horas. Esta etapa se llevó a cabo bajo una campana extractora para asegurar condiciones seguras.

Una vez concluido el período de digestión en frío, la solución resultante se sometió a un proceso de evaporación controlada a una temperatura constante de 60°C hasta lograr la completa evaporación completa de los ácidos HF , HNO_3 y HCl de la muestra, donde el ácido Nítrico (HNO_3) al 65%, y el ácido clorhídrico (HCl) al 37% eliminan la materia orgánica y el HF elimina los silicatos presentes en la muestra. Posterior a esto, se realiza una segunda digestión ácida esta vez con HNO_3 y HCl llevando a sequedad a una temperatura constante de 60°C hasta

lograr la completa evaporación de estos ácidos, finalizando con una tercera etapa de digestión ácida, esta vez solo con ácido clorhídrico (HCl) al 37% llevando a sequedad a una temperatura constante de 60 °C hasta lograr la completa evaporación de este ácido.

Para los tres protocolos ensayados, se mantuvo una estandarización en el proceso de deposición y lectura del ^{210}Pb , el que se describe a continuación.

5.1.2. DEPOSITACIÓN

Una vez completada la etapa de digestión ácida de la muestra, se procedió a recuperar el residuo resultante. Para ello, se utilizó una solución de HCl 1,5 N, ajustando el volumen final a 50 ml. Se añade ácido ascórbico con el propósito de reducir el hierro Fe^{+3} a Fe^{+2} , lo que ayuda a prevenir su interferencia en el proceso de deposición. La deposición espontánea se realiza en un disco de plata giratorio que ha sido previamente preparado.

Este proceso de deposición se lleva a cabo en una Multi-Placa calefactora con un Agitador Magnético durante un período de 4 horas. La temperatura se mantiene constante a 80°C para un control adecuado. Una vez concluido este intervalo, los discos de plata se lavan con agua ultrapura Tipo II y se dejan secar a temperatura ambiente.

El ácido que no se haya evaporado durante las 4 horas de deposición se almacena en viales plásticos para su uso en futuras mediciones de ^{226}Ra .

5.1.3. LECTURA DE ^{210}Pb

Al finalizar el proceso de deposición del ^{210}Po (en equilibrio secular con ^{210}Pb) en las placas de plata, estas se etiquetan y transportan para su análisis en un Espectrómetro Alfa de la marca CANBERRA, modelo 7200-08. Este espectrómetro está equipado con 8 cámaras de conteo y detectores PIPS (Passivated Implanted Planar Silicon detectors) diseñados específicamente para la detección de radionúclidos emisores alfa. Cada muestra se cuenta durante 48 horas registrando el número de cuentas y las integrales de la muestra y del trazador interno.

Resultados de métodos para la preparación de muestras

En la **Tabla 3** se han recopilado los resultados obtenidos para el radioisótopo ^{210}Pb correspondientes a las muestras seleccionadas del Salar de Pedernales para hacer las pruebas de preparación de muestras indicando los protocolos basados en los trabajos de Hovmand *et al.*, (2009), Al-Masri *et al.*, (2015) y Flynn (1968) respectivamente. Además, la **Figura 7** muestra la representación gráfica de estos resultados. Como control de calidad, se llevó a cabo la duplicación de cada protocolo y también se incluyó un blanco analítico. Estos procedimientos de duplicación y la inclusión de un blanco aseguran la confiabilidad y precisión de los resultados de la actividad del ^{210}Pb en las muestras seleccionadas del Salar Pedernales.

Para garantizar la estandarización de los métodos en los protocolos utilizados, se tomaron las siguientes consideraciones clave:

- La masa de muestra empleada en todos los protocolos fue de 0,5 gramos, lo que proporciona uniformidad en las cantidades analizadas.
- Se incorporó una etapa adicional de digestión ácida utilizando 10 ml de HCl al 37%, en los protocolos basados en los trabajos de Hovmand, et al., (2009), Al-Masri, et al., (2015) con el propósito de asegurar una digestión completa y exhaustiva de las muestras.
- Se mantuvo constante la temperatura utilizada durante el proceso de digestión en la placa calefactora, que se estableció en 60 °C, para mantener condiciones comparables a lo largo del análisis.

Tabla 3. Lecturas de actividad de ^{210}Pb para muestras tratadas con protocolo según Hovmand, et al., (2009), Al-Masri, et al., (2015) y Flynn (1968).

| Identificación de Muestra | Método utilizado | Peso Muestra (g) | Actividad ^{210}Pb |
|---|----------------------------------|------------------|-----------------------------|
| | | | (dpm/g) |
| L09 | Hovmand <i>et al.</i> , 2009 | 0,5531 | 0,79 |
| L-26 Po | | 0,5325 | 0,66 |
| L-26 Po (D) | | 0,5226 | 0,69 |
| L26 | | 0,5579 | 0,23 |
| MH-08 | | 0,5193 | 0,75 |
| Blanco (Solo Trazador ^{209}Po) | | *** | *** |
| L09 | Al-Masri <i>et al.</i> , 2015 | 0,5091 | 0,89 |
| L-26 Po | | 0,5281 | 0,73 |
| L-26 Po (D) | | 0,5114 | 0,73 |
| L26 | | 0,5202 | 0,31 |
| MH-08 | | 0,5109 | 0,81 |
| Blanco (Solo Trazador ^{209}Po) | | *** | *** |
| L09 | Flynn,1968 | 0,5142 | 0,74 |
| L-26 Po | | 0,5353 | 0,61 |
| L-26 Po (D) | | 0,5240 | 0,61 |
| L26 | | 0,5157 | 0,12 |
| MH-08 | | 0,5123 | 0,62 |
| Blanco (Solo Trazador ^{209}Po) | | *** | *** |

D: Duplicado de muestra

*** No Registra dato.

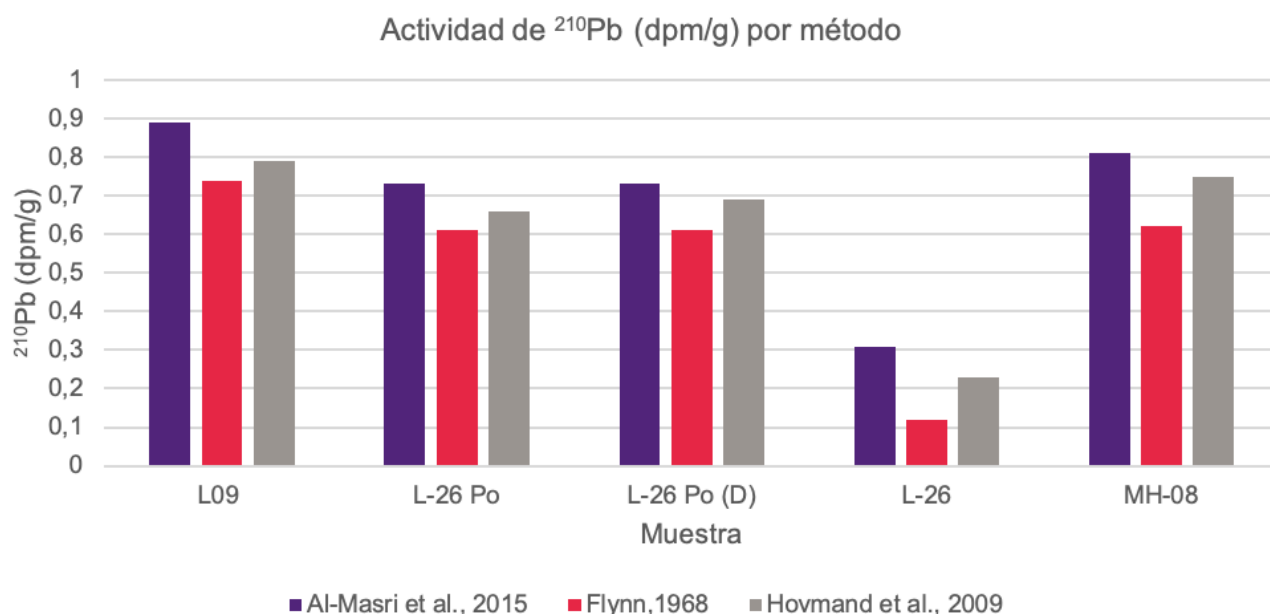


Figura 7. Actividad de ^{210}Pb según diferentes métodos empleados.

Los resultados obtenidos (**Tabla 3**) revelan una diferencia en los valores de actividad de ^{210}Pb entre los métodos propuesto por Al-Masri, *et al.*, (2015), Hovmand, *et al.*, (2009) y Flynn (1968). Se puede atribuir esta disparidad a la efectividad de la digestión de las muestras en el método de Al-Masri, *et al.*, (2015), que emplea la combinación de HNO_3 al 65% y H_2O_2 al 30%. Esta combinación logra una digestión completa de la muestra sin necesidad de repetir o añadir más ácido, como sucedió en los protocolos de Hovmand, *et al.*, (2009) y Flynn (1968). En donde para Hovmand, *et al.*, (2009), una vez consumidos los primeros 50 ml de HNO_3 al 65%, gran parte de la muestra seguía sin digerir, lo que requirió la adición de más ácido y una segunda digestión en la placa calefactora para lograr la completa digestión. Mientras que para Flynn (1968) una vez finalizadas las tres etapas antes descritas, gran parte de la muestra se encontraba sin digerir, lo que requirió repetir la segunda etapa de este protocolo dos veces más en la placa calefactora para lograr la completa digestión.

Al comparar los resultados de las tres técnicas utilizadas, se observó que el método propuesto por Al-Masri, *et al.*, (2015) mostró el promedio de valores más altos en la actividad de ^{210}Pb . Esto se atribuyó a la utilización de H_2O_2 al 30%, que permitió una digestión completa de las muestras vegetales analizadas.

Con base en estos resultados, se establecieron las siguientes recomendaciones en el tratamiento de las muestras:

1. La utilización de H_2O_2 al 30%, asegurando una mejor digestión, especialmente en las muestras de material vivo. Las primeras mediciones indicaron la necesidad de repetir etapas en la digestión, lo que consumió el doble de ácido y aumentó el tiempo de laboratorio para lograr una digestión adecuada.
2. Para la digestión de las muestras de suelo se utilizó HF al 40%, el cual es efectivo para eliminar los silicatos presentes en la muestra sin requerir pasos adicionales o repetidos en la digestión.

Estas consideraciones se derivan desde los resultados obtenidos utilizando el procedimiento propuesto por Al-Masri, *et al.*, (2015), los cuales buscaron la optimización de las metodologías para este y futuros estudios que se deba aplicar la lectura del radioisótopo natural ^{210}Pb .

5.2. Contenido de ^{210}Pb en plantas vivas y plantas muertas del Salar de Pedernales

Una vez desarrollada y verificada la metodología antes descrita para determinar el contenido de ^{210}Pb en plantas vivas y muertas del área de estudio, se procedió al análisis de las muestras de las dos campañas de muestreo realizadas en dos temporadas distintas, la primera con fecha 18 de abril de 2022, correspondiente a la campaña de otoño y la segunda los días 5 y 6 de octubre del 2022 correspondiente a la campaña de muestreo realizada en primavera. Las coordenadas de las estaciones de estas campañas de muestreo se presentan en **Tabla 4** y **Tabla 5**, respectivamente.

Tabla 4. Ubicación de muestras del Salar Pedernales obtenidas en la campaña de otoño 2022.

| Identificación de muestra | Zona de Muestreo | Material vegetal/Especie | Coordenadas* | |
|---------------------------|------------------|----------------------------------|--------------|------------|
| | | | UTM E | UTM N |
| PM3-SI-ISO-01 | Inactiva | *** | 478511,17 | 7085339,50 |
| PM3-SI-ISO-02 | | *** | | |
| PM3-SI-ISO-03 | | *** | | |
| PM2-SI-ISO-01 | | *** | | |
| PM2-SI-ISO-02 | | *** | | |
| PM2-SI-ISO-03 | | *** | | |
| PM1-SI-ISO-01 | Intermedia | *** | 477547,33 | 7087813,12 |
| PM1-SI-ISO-02 | | *** | | |
| PM1-SI-ISO-03 | | *** | | |
| PM3-SA-ISO-tc-01 | Activa | <i>Triglochin concinna</i> | 476478,30 | 7089376,47 |
| PM3-SA-ISO-tc-02 | | <i>Triglochin concinna</i> | | |
| PM3-SA-ISO-tc-03 | | <i>Triglochin concinna</i> | | |
| PM3-SA-ISO-za-01 | | <i>Zameioscirpus atacamensis</i> | | |
| PM3-SA-ISO-za-02 | | <i>Zameioscirpus atacamensis</i> | | |
| PM3-SA-ISO-za-03 | | <i>Zameioscirpus atacamensis</i> | | |
| PM3-SA-ISO-pf-01 | | <i>Puccinellia frigida</i> | | |
| PM3-SA-ISO-pf-02 | | <i>Puccinellia frigida</i> | | |
| PM3-SA-ISO-pf-03 | | <i>Puccinellia frigida</i> | | |
| PM6-SA-ISO-tc-01 | | <i>Triglochin concinna</i> | | |
| PM6-SA-ISO-tc-02 | | <i>Triglochin concinna</i> | | |
| PM6-SA-ISO-tc-03 | | <i>Triglochin concinna</i> | | |

* Coordenadas UTM, Datum WGS 84 Huso 19S.

*** No se identifican especies.

Tabla 5. Muestras Salar de Pedernales obtenidas en la campaña de primavera 2022.

| Identificación de muestra | Zona de muestreo | Especie | Coordenadas* | |
|---------------------------|------------------|----------------------------------|--------------|------------|
| | | | UTM E | UTM N |
| PM3-SI-ISO-01 | Inactiva | *** | 478512,84 | 7085337,66 |
| PM3-SI-ISO-02 | | *** | | |
| PM3-SI-ISO-03 | | *** | | |
| PM2-SI-ISO-01 | | *** | | |
| PM2-SI-ISO-02 | | *** | | |
| PM2-SI-ISO-03 | | *** | | |
| PM1-SI-ISO-01 | | *** | | |
| PM1-SI-ISO-02 | | *** | | |
| PM1-SI-ISO-03 | | *** | | |
| PM1-SI-ISO-tc-01 (**) | Intermedia | <i>Triglochin concinna</i> | 477547,33 | 7087813,12 |
| PM1-SI-ISO-tc-02 (**) | | <i>Triglochin concinna</i> | | |
| PM1-SI-ISO-tc-03 (**) | | <i>Triglochin concinna</i> | | |
| PM1-SI-ISO-za-01 (**) | | <i>Zameioscirpus atacamensis</i> | | |
| PM1-SI-ISO-za-02 (**) | | <i>Zameioscirpus atacamensis</i> | | |
| PM1-SI-ISO-za-03 (**) | | <i>Zameioscirpus atacamensis</i> | | |
| PM3-SA-ISO-tc-01 | Activa | <i>Triglochin concinna</i> | 476478,30 | 7089376,47 |
| PM3-SA-ISO-tc-02 | | <i>Triglochin concinna</i> | | |
| PM3-SA-ISO-tc-03 | | <i>Triglochin concinna</i> | | |
| PM3-SA-ISO-za-01 | | <i>Zameioscirpus atacamensis</i> | | |
| PM3-SA-ISO-za-02 | | <i>Zameioscirpus atacamensis</i> | | |
| PM3-SA-ISO-za-03 | | <i>Zameioscirpus atacamensis</i> | | |
| PM3-SA-ISO-pf-01 | | <i>Puccinellia frígida</i> | | |
| PM3-SA-ISO-pf-02 | | <i>Puccinellia frígida</i> | | |
| PM3-SA-ISO-pf-03 | | <i>Puccinellia frígida</i> | | |
| PM6-SA-ISO-tc-01 | | <i>Triglochin concinna</i> | | |
| PM6-SA-ISO-tc-02 | | <i>Triglochin concinna</i> | | |
| PM6-SA-ISO-tc-03 | | <i>Triglochin concinna</i> | | |
| PM6-SA-ISO-ZA-01 (**) | | <i>Zameioscirpus atacamensis</i> | | |
| PM6-SA-ISO-ZA-02 (**) | | <i>Zameioscirpus atacamensis</i> | | |
| PM6-SA-ISO-ZA-03 (**) | | <i>Zameioscirpus atacamensis</i> | | |

* Coordenadas UTM, Datum WGS 84 Huso 19S.

** Muestras obtenidas solo en campaña de primavera 2022.

*** No se identifican especies.

Los resultados obtenidos para las muestras del Salar de Pedernales según su zona de recolección en ambas campañas de muestreo son presentados en la **Tabla 6** y **Figura 8** (Zona Inactiva), **Tabla 7** y **Figura 9** (Zona Intermedia), **Tabla 8** y **Figura 10** (Zona Activa) y **Anexo 1**.

Tabla 6. Lecturas ^{210}Pb obtenidas para Zona Inactiva para campañas de otoño y primavera 2022.

| Identificación de Muestra | Campaña | Peso Muestra(g) | Actividad ^{210}Pb |
|---|-----------|-----------------|-----------------------------|
| | | | (dpm/g) |
| PM3-SI-ISO-01 | Otoño | 0,5337 | 0,587 |
| PM3-SI-ISO-02 | | 0,512 | 0,055 |
| PM3-SI-ISO-03 | | 0,5027 | 0,124 |
| PM3-SI-ISO-03 (D) | | 0,5221 | 0,130 |
| PM2-SI-ISO-01 | | 0,5486 | 0,585 |
| PM2-SI-ISO-02 | | 0,5762 | 0,549 |
| PM2-SI-ISO-03 | | 0,5827 | 0,260 |
| Blanco (Solo Trazador ^{209}Po) | | *** | *** |
| PM3-SI-ISO-01 | Primavera | 0,5513 | 0,104 |
| PM3-SI-ISO-02 | | 0,5292 | 0,063 |
| PM3-SI-ISO-03 | | 0,5820 | 0,123 |
| PM3-SI-ISO-03(D) | | 0,5868 | 0,121 |
| PM2-SI-ISO-01 | | 0,5667 | 0,178 |
| PM2-SI-ISO-02 | | 0,5064 | 0,193 |
| PM2-SI-ISO-03 | | 0,5600 | 0,228 |
| Blanco (Solo Trazador ^{209}Po) | | *** | *** |

D: Duplicado de muestra

*** No Registra dato.

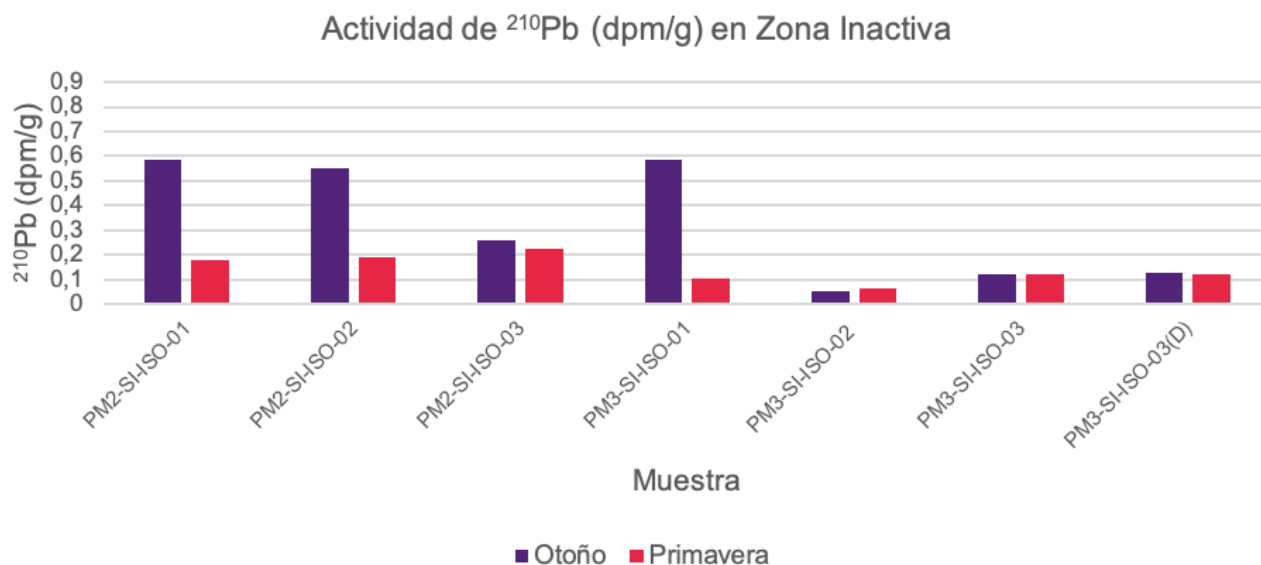


Figura 8. Actividad de ^{210}Pb (dpm/g) en muestras de la Zona Inactiva.

Tabla 7. Lecturas de ^{210}Pb obtenidas para la Zona Intermedia para campañas de otoño y primavera 2022.

| Identificación de muestra | Campaña | Peso Muestra(g) | Actividad ^{210}Pb |
|---|-----------|-----------------|-----------------------------|
| | | | (dpm/g) |
| PM1-SI-ISO-01 | Otoño | 0,5756 | 0,206 |
| PM1-SI-ISO-02 | | 0,5242 | 0,252 |
| PM1-SI-ISO-03 | | 0,5623 | 0,116 |
| Blanco (Solo Trazador ^{209}Po) | | *** | *** |
| PM1-SI-ISO-01 | Primavera | 0,5599 | 0,431 |
| PM1-SI-ISO-02 | | 0,5586 | 0,412 |
| PM1-SI-ISO-03 | | 0,5428 | 0,117 |
| PM1-SI-ISO-tc-01 (**) | | 0,4911 | 0,247 |
| PM1-SI-ISO-tc-02 (**) | | 0,5517 | 0,229 |
| PM1-SI-ISO-tc-03 (**) | | 0,576 | 0,234 |
| PM1-SI-ISO-za-01 (**) | | 0,5802 | 0,060 |
| PM1-SI-ISO-za-02 (**) | | 0,5068 | 0,114 |
| PM1-SI-ISO-za-03 (**) | | 0,5463 | 0,122 |
| Blanco (Solo Trazador ^{209}Po) | | *** | *** |

D: Duplicado de muestra.

** Muestras obtenidas solo en campaña de primavera.

*** No Registra dato.

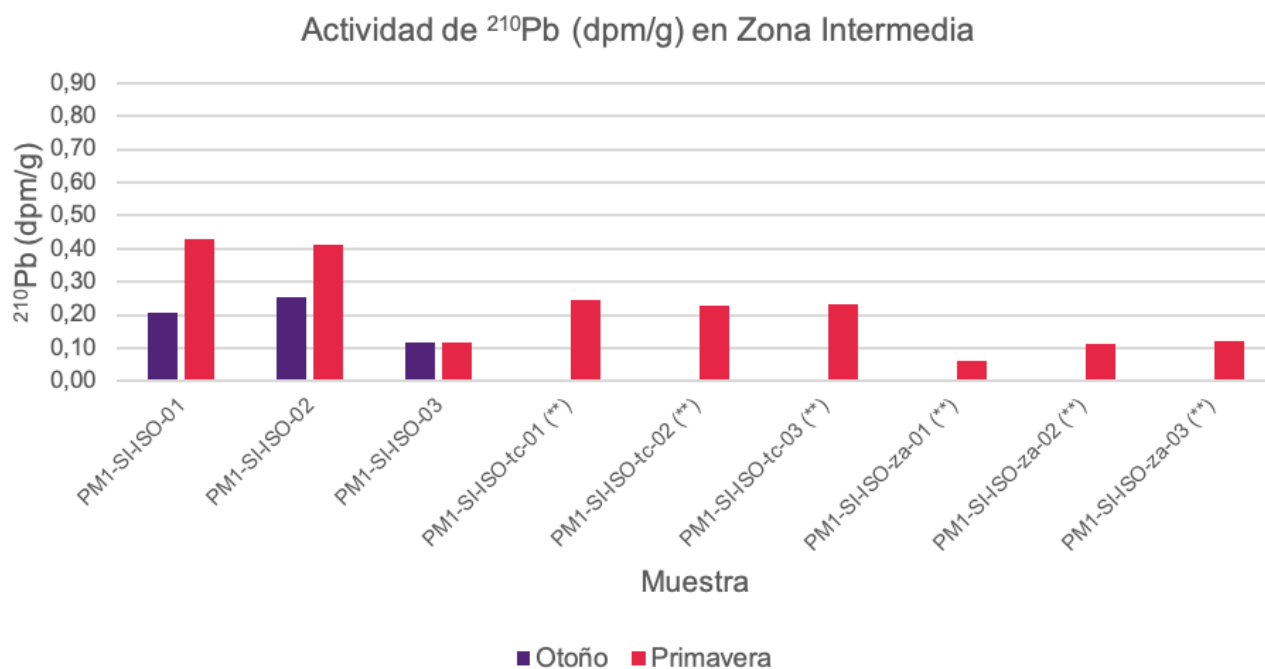


Figura 9. Actividad de ^{210}Pb (dpm/g) en muestras de la Zona Intermedia.

Tabla 8. Lecturas de ^{210}Pb obtenidas para Zona Activa para campañas de otoño y primavera 2022.

| Identificación de Muestra | Campaña | Peso Muestra(g) | Actividad ^{210}Pb |
|---|---------|-----------------|-----------------------------|
| | | | (dpm/g) |
| PM3-SA-ISO-tc-01 | Otoño | 0,5459 | 0,190 |
| PM3-SA-ISO-tc-02 | | 0,5499 | 0,170 |
| PM3-SA-ISO-tc-03 | | 0,5425 | 0,440 |
| PM3-SA-ISO-za-01 | | 0,5974 | 0,170 |
| PM3-SA-ISO-za-02 | | 0,5972 | 0,070 |
| PM3-SA-ISO-za-03 | | 0,5576 | 0,090 |
| PM3-SA-ISO-pf-01 | | 0,5642 | 0,190 |
| PM3-SA-ISO-pf-02 | | 0,5313 | 0,300 |
| PM3-SA-ISO-pf-03 | | 0,5198 | 0,130 |
| PM6-SA-ISO-tc-01 | | 0,5212 | 0,140 |
| PM6-SA-ISO-tc-02 | | 0,5552 | 0,220 |
| PM6-SA-ISO-tc-03 | | 0,5240 | 0,190 |
| PM6-SA-ISO-tc-03 (D) | | 0,5118 | 0,190 |
| Blanco (Solo Trazador ^{209}Po) | | *** | *** |
| PM3-SA-ISO-tc-01 | | Primavera | 0,5201 |
| PM3-SA-ISO-tc-02 | 0,5100 | | 0,372 |
| PM3-SA-ISO-tc-03 | 0,5023 | | 0,386 |
| PM3-SA-ISO-za-01 | 0,5472 | | 0,322 |
| PM3-SA-ISO-za-02 | 0,5301 | | 0,317 |
| PM3-SA-ISO-za-03 | 0,5148 | | 0,328 |
| PM3-SA-ISO-pf-01 | 0,5407 | | 0,190 |
| PM3-SA-ISO-pf-02 | 0,5072 | | 0,206 |
| PM3-SA-ISO-pf-03 | 0,5563 | | 0,205 |
| PM6-SA-ISO-tc-01 | 0,5023 | | 0,387 |
| PM6-SA-ISO-tc-02 | 0,5196 | | 0,389 |
| PM6-SA-ISO-tc-03 | 0,5022 | | 0,391 |
| PM6-SA-ISO-ZA-01 (**) | 0,5073 | | 0,360 |
| PM6-SA-ISO-ZA-02 (**) | 0,5076 | | 0,392 |
| PM6-SA-ISO-ZA-03 (**) | 0,5109 | | 0,371 |
| Blanco (Solo Trazador ^{209}Po) | *** | *** | |

D: Duplicado de muestra.

** Muestras obtenidas solo en campaña de primavera.

*** No Registra dato.

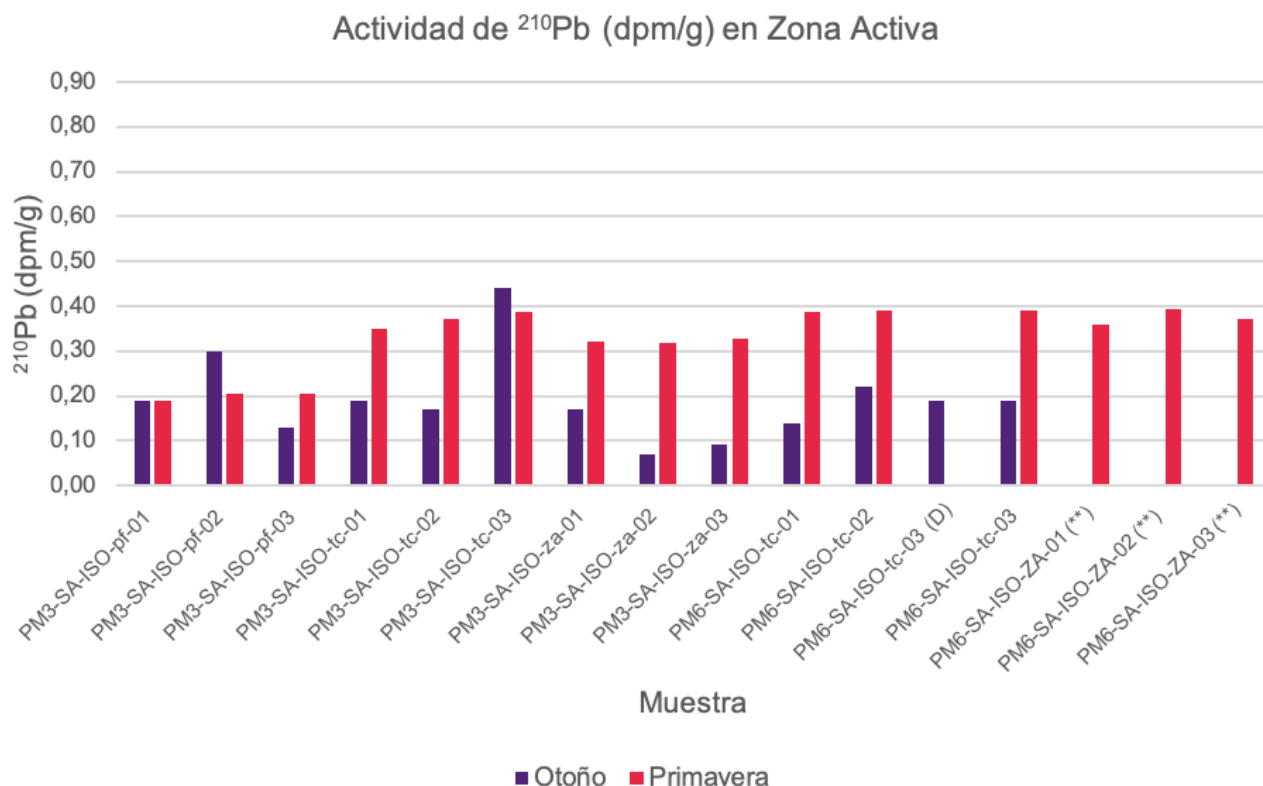


Figura 10. Actividad de ²¹⁰Pb (dpm/g) en muestras de la Zona Activa.

En la **Tabla 9** y **Figura 11** se presenta la estadística básica de las actividades de ²¹⁰Pb de las Zonas Activa, Intermedia e Inactiva. En general, la actividad de este radionúclido fue menor en otoño en las Zonas Activa e Intermedia. Por ejemplo, la actividad promedio en la Zona Activa en otoño fue de 0,19 dpm/g, mientras que en primavera fue de 0,33 dpm/g. Por otro lado, la mayor variabilidad de actividad se observó en la Zona Inactiva en otoño, la cual fue de aproximadamente un 73%.

Tabla 9. Estadística básica de los resultados del contenido de ²¹⁰Pb (dpm/g) en las campañas realizadas y por zona evaluada.

| Campaña | Zona | Promedio | Des. Est. | CV (%) | Máximo | Mínimo |
|-----------|------------|----------|-----------|--------|--------|--------|
| Otoño | Inactiva | 0,33 | 0,24 | 72,97 | 0,59 | 0,06 |
| Otoño | Intermedia | 0,19 | 0,07 | 36,15 | 0,25 | 0,12 |
| Otoño | Activa | 0,19 | 0,07 | 36,68 | 0,44 | 0,07 |
| Primavera | Inactiva | 0,14 | 0,06 | 39,76 | 0,23 | 0,06 |
| Primavera | Intermedia | 0,22 | 0,13 | 60,43 | 0,43 | 0,06 |
| Primavera | Activa | 0,33 | 0,07 | 21,81 | 0,39 | 0,19 |

Des. Est: Desviación estándar.

CV (%): Coeficiente de variación.

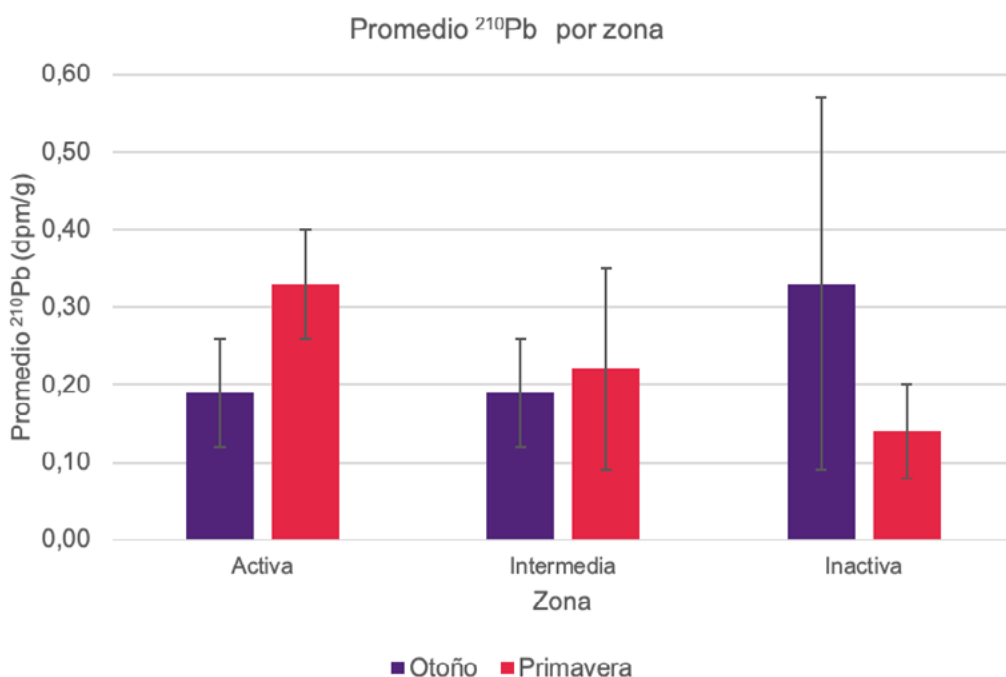


Figura 11. Promedio de ^{210}Pb (dpm/g) para cada zona, por campaña de muestreo.

Los supuestos de la metodología de datación consideran que una vez que la planta muere, los mecanismos fisiológicos de incorporación de sustancias se detienen. Es decir, el geocronómetro se inicia y, por lo tanto, no hay mecanismos propios de la planta que puedan modificar el contenido de ^{210}Pb , el cual solo cambiará su actividad debido al decaimiento radiactivo.

Por lo tanto, al comparar el contenido de ^{210}Pb en una planta viva con respecto a una planta muerta, se podrá conocer el tiempo transcurrido desde que la planta detuvo sus mecanismos fisiológicos de crecimiento en la Zona Inactiva. Posteriormente, para la estimación de las edades de muerte, sólo se utilizaron aquellas plantas que mostraron diferencias de actividades de ^{210}Pb inferiores al 100% entre los muestreos de primavera y otoño. Este aspecto se discute con mayor detalle en los resultados de la estimación de las edades.

5.3. Contenido de ^{210}Pb en la parte aérea y raíces de plantas

Con el objeto de verificar la principal vía de incorporación de ^{210}Pb a la planta, se evaluó el contenido de este radionúclido en las diferentes estructuras de las plantas vivas de la Zona Activa. Para ello, se comparó la actividad de ^{210}Pb en los diferentes tejidos de las plantas en las que eran posible su identificación.

En la Zona Activa, se seleccionaron dos especies de plantas vivas en ambas campañas de muestreo (otoño y primavera 2022): i) *Zameioscirpus atacamensis* y ii) *Puccinellia frígida*. Las muestras evaluadas fueron: PM3-SA-ISO-za-01 y PM3-SA-ISO-pf-02.

Los tejidos analizados para *Zameioscirpus atacamensis* fueron la raíz, el tallo y las hojas, mientras que para *Puccinellia frigida* fueron la raíz y el tallo (Tabla 10). Con este propósito, se determinó la actividad de ^{210}Pb en cada una de las estructuras seleccionadas. Estas fueron preparadas utilizando el mismo protocolo que se utilizó previamente para las plantas enteras (Al-Masri, *et al.*, 2015), garantizando así la correcta y completa digestión de las estructuras de las muestras que fueron analizadas para este objetivo, así como la comparación de las lecturas.

Los resultados muestran que la mayor actividad absoluta de ^{210}Pb se encontró en las raíces de *Zameioscirpus atacamensis* y *Puccinellia frigida*, en la campaña de otoño (Figura 12).

Tabla 10. Tejidos analizados en las especies de plantas identificadas en la Zona Activa.

| Identificación de Muestra | Especie | Estructura analizada |
|---------------------------|----------------------------------|----------------------|
| PM3-SA-ISO-za-01 | <i>Zameioscirpus atacamensis</i> | Raíz |
| | | Tallo |
| | | Hojas |
| PM3-SA-ISO-pf-02 | <i>Puccinellia frigida</i> | Raíz |
| | | Hojas |

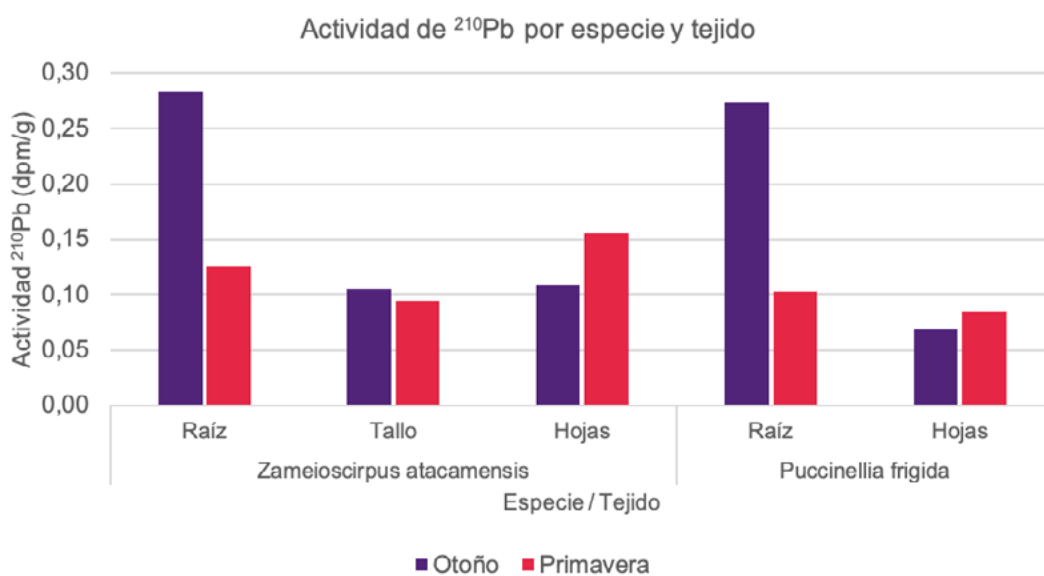


Figura 12. Variación anual de la actividad de ^{210}Pb por especie y estructura plantar.

Adicionalmente, con la información obtenida de la actividad del ^{210}Pb en las plantas y la obtenida desde el suelo, se calculó el Factor de Transferencia (FT) que representa la cantidad de radionúclido que ha entrado a las plantas a partir del suelo, lo que es una indicación de la absorción de radionúclidos desde el suelo a la planta en condiciones de equilibrio (Sheppard & Sheppard, 1985). El FT se ha calculado para las plantas evaluadas de la Zona Activa utilizando la siguiente ecuación (IAEA, 1994; Vera, 2003; Bilgici Cengiz, 2019).

$$\text{Factor de Transferencia} = \frac{\text{Actividad radionúclido}_{(\text{planta})}}{\text{Actividad radionúclido}_{(\text{suelo})}}$$

Se debe indicar que la actividad de un elemento radioactivo en el suelo no es el único factor que determina su contenido en las diferentes partes de una planta. La absorción de elementos y minerales desde el suelo, en general, se caracteriza principalmente por su metabolismo, características fisicoquímicas, biodisponibilidad para las plantas, textura del suelo, contenido de materia orgánica, tipo de planta, edad de la planta, partes de la planta, condiciones climáticas y el efecto de las especies competitivas, todos los cuales pueden influir en los valores del Factor de Transferencia (Bettencourt *et al.*, 1988; Paul & Pillai, 1986; Noordijk *et al.*, 1992).

Para el cálculo de este factor en algunas muestras analizadas es necesario contar con la actividad de ^{210}Pb en la planta y en el suelo de donde fue extraída la muestra de material vegetal, en este caso *Puccinellia frígida* y *Zameioscirpus atacamensis*. La actividad de ^{210}Pb para el suelo se obtuvo con el tratamiento descrito anteriormente basado en el método de Flynn (1968).

En la **Tabla 11** se informan los resultados del Factor de Transferencia (FT) expresado como peso seco de la muestra, i.e., sobre la base de tejido sin humedad residual, es decir corresponde solo a tejido vegetal orgánico. Como se aprecia en esta tabla, los FT son comparables para las diferentes estructuras analizadas, lo que da cuenta de un patrón común de absorción de ^{210}Pb , independiente de la estructura, por lo que el uso de una muestra compuesta de las diferentes estructuras refleja la condición del ^{210}Pb presente en las plantas.

Tabla 11. Factores de Transferencia obtenidos en muestras analizadas para las estructuras de *Zameioscirpus atacamensis* y *Puccinellia frígida* para las campañas de otoño y primavera 2022.

| Identificación de Muestra | Campaña | Especie | Estructura Analizada | Actividad | Actividad | Factor de Transferencia (FT) |
|---------------------------|-----------|----------------------------------|----------------------|----------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| | | | | ^{210}Pb (dpm/g) Planta | ^{210}Pb (dpm/g) Suelo | |
| PM3-SA-ISO-za-01 | Otoño | <i>Zameioscirpus atacamensis</i> | Raíz | 0,283 | 0,430 | 0,659 |
| | | | Tallo | 0,106 | 0,430 | 0,246 |
| | | | Hojas | 0,109 | 0,430 | 0,253 |
| PM3-SA-ISO-pf-02 | | <i>Puccinellia frígida</i> | Raíz | 0,274 | 0,460 | 0,595 |
| | | | Hojas | 0,069 | 0,460 | 0,149 |
| PM3-SA-ISO-za-01 | Primavera | <i>Zameioscirpus atacamensis</i> | Raíz | 0,126 | 0,399 | 0,316 |
| | | | Tallo | 0,094 | 0,399 | 0,236 |
| | | | Hojas | 0,155 | 0,399 | 0,389 |
| PM3-SA-ISO-pf-02 | | <i>Puccinellia frígida</i> | Raíz | 0,102 | 0,385 | 0,266 |
| | | | Hojas | 0,085 | 0,385 | 0,221 |

Los FT calculados oscilaron entre 0,659 y 0,149, siendo los de mayor valor para las raíces de *Zameioscirpus atacamensis* y *Puccinellia frígida* en la campaña de otoño. Estos valores están en el rango de FT reportados en la literatura para algunos productos agrícolas, tales como malvas (0,47-0,30); porotos (0,16-0,20), tomates (0,22), nabos (0,22-0,21) (El Aouidi, *et al.*, 2021).

5.4. Intervalo de tiempo transcurrido entre las plantas vivas que ocupan la Zona Activa y las plantas muertas de la Zona Inactiva

5.4.1. ESTIMACIÓN DEL TIEMPO TRANSCURRIDO DESDE LA MUERTE DE LAS PLANTAS

Es importante mencionar que no fue posible distinguir tejidos (i.e., raíz, tallo y hoja) en las plantas muertas de la Zonas Inactiva e Intermedia. Por lo tanto, para estimar el tiempo transcurrido desde la muerte de las plantas se utilizó la planta muerta entera. Esto permitió utilizar una matriz analítica comparable y realizar mediciones de la actividad del ^{210}Pb en un material uniforme.

Para estimar el tiempo transcurrido desde la muerte de las plantas muertas de la Zona Inactiva y de la Zona Intermedia del SVAHT, se utilizó la actividad de ^{210}Pb de las plantas vivas de la Zona Activa. En este proceso, se asumió que la actividad de las plantas vivas refleja el contenido actual y reciente de ^{210}Pb , es decir, el $^{210}\text{Pb}_0$ (i.e., actividad inicial) en la ecuación de decaimiento. Utilizando este valor, se determinó la razón $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Pb}_0$, que representa la actividad en el momento de la muerte de la planta en relación con el tiempo reciente y/o actual. Esta evaluación se basó en la actividad de ^{210}Pb presente en la vegetación muerta.

Además, esta estimación se basó en el supuesto de que en las plantas muertas de la Zona Inactiva y Zona Intermedia la razón $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Pb}_0$ actúa como un sistema cerrado química y fisiológicamente. Esto implica que la actividad de la vegetación en la Zona Inactiva y Zona Intermedia disminuye únicamente debido al decaimiento natural del ^{210}Pb a lo largo del tiempo en comparación con la de la Zona Activa.

De esta manera, para estimar el tiempo transcurrido desde la muerte de las plantas, se seleccionaron aquellas plantas de la Zona Inactiva y Zona Intermedia que mostraron diferencias de actividad inferiores al 100% entre los muestreos de primavera y otoño. Por otro lado, aquellas plantas que presentaron diferencias en las actividades medidas en ambas campañas superiores al 100% no fueron consideradas en el cálculo de la edad, ya que se obtendrían edades negativas.

Las ecuaciones utilizadas en los dos modelos radioquímicos empleados para el cálculo del tiempo transcurrido desde la muerte de las plantas respecto al tiempo actual (i.e., tiempo de muestreo, equivalente al año 2022) se describieron en la sección 3 (Materiales y Métodos) de este informe. Las actividades de ^{210}Pb medidas en las plantas de la Zona Inactiva e Intermedia se presentan en la Tabla 12.

Desequilibrio radioactivo, razón $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$.

Adicionalmente se utilizó el método basado en el desequilibrio radioactivo de la razón hija/padre asumiendo equilibrio secular ($^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$). Dentro de este modelo se consideraron los siguientes supuestos; i) la planta muerta se trató como un sistema químicamente cerrado. Esto se debe a que el ^{226}Ra (vida media 1600 años), una vez absorbido por las raíces de la planta, queda retenido en el interior de esta, incluso después de su muerte, por lo tanto, se

inicia el decaimiento radioactivo natural hacia la generación radioquímica de la hija ^{210}Pb (vida media 22,3 años) y el geocronómetro se inicia. Así la razón $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ tenderá al equilibrio radioquímico con el tiempo en función de la vida media de la hija. Por otro lado, si el sistema estuviera abierto, esta razón se mantendría cerca de 1, lo que indicaría que el sistema está en equilibrio (plantas vivas) y que existe una migración constante de sustancias entre la planta y su entorno. La ecuación que rige este desequilibrio se encuentra descrita en Ivanovich & Harmon (1992):

$$(^{210}\text{Pb}) / (^{226}\text{Ra}) = [1 - e^{-\lambda_{\text{Pb}} t}]$$

Donde:

$(^{210}\text{Pb}) / (^{226}\text{Ra})$ = razón de actividad isotópica.

λ_{Pb} = constante de decaimiento del ^{210}Pb = 0,031 años⁻¹.

t = tiempo transcurrido desde la muerte de las plantas.

Para estimar la razón isotópica se utilizó el contenido de ^{210}Pb en cada muestra y la actividad del padre ^{226}Ra presente en la planta, el cual se obtiene del remanente ácido resultante de la depositación del ^{210}Pb en las placas de plata, utilizadas para la lectura de ^{210}Pb . Las actividades de ^{226}Ra medidas en las plantas de la Zonas Inactiva e Intermedia se presentan en la **Tabla 12**.

Los resultados de los cálculos del tiempo transcurrido desde la muerte de las plantas de SVAHT se presentan de manera agrupada en la **Tabla 12** y **Figura 13**.

Tabla 12. Resultados de lecturas de actividad de ^{226}Ra y ^{210}Pb utilizados en el cálculo de tiempo transcurrido desde muerte de plantas en la Zona Inactiva e Intermedia

| Identificación | Zona | Campaña | Actividad (dpm/g) | | Tiempo transcurrido (Años) | | Año de muerte ¹ | |
|------------------------|------------|-----------|-------------------|-------------------|----------------------------|-----------|----------------------------|------|
| | | | ^{210}Pb | ^{226}Ra | MCI | DER | MCI | DER |
| PM3-SI-ISO-02 | Inactiva | Otoño | 0,055 | 0,506 | 60,8 | 71,5 | 1961 | 1951 |
| PM3-SI-ISO-03 | | | 0,124 | 0,545 | 34,7 | 47,8 | 1987 | 1974 |
| PM2-SI-ISO-03 | | | 0,260 | 0,435 | 10,8 | 16,6 | 2011 | 2005 |
| PM3-SI-ISO-01 | | Primavera | 0,104 | 0,539 | 40,5 | 53,2 | 1982 | 1969 |
| PM3-SI-ISO-02 | | | 0,063 | 0,546 | 56,9 | 69,8 | 1965 | 1952 |
| PM3-SI-ISO-03 | | | 0,123 | 0,495 | 35,0 | 45,0 | 1987 | 1977 |
| PM2-SI-ISO-01 | | | 0,178 | **** | 23,1 | 34,2 (*) | 1999 | 1988 |
| PM2-SI-ISO-02 | | | 0,193 | 0,541 | 20,5 | 33,3 | 2002 | 1989 |
| PM2-SI-ISO-03 | | | 0,228 | 0,509 | 15,1 | 25,0 | 2007 | 1997 |
| PM1-SI-ISO-01 | | | Otoño | 0,206 | 0,346 | 18,3 | 16,7 | 2004 |
| PM1-SI-ISO-02 | 0,252 | **** | | 11,9 | 16,9 (**) | 2010 | 2005 | |
| PM1-SI-ISO-03 | 0,116 | 0,485 | | 36,8 | 46,1 | 1985 | 1976 | |
| PM1-SI-ISO-03 | 0,117 | 0,510 | | 36,6 | 47,5 | 1985 | 1975 | |
| PM1-SI-ISO-tc-01 (***) | Intermedia | | 0,247 | **** | 12,5 | 17,5 (**) | 2010 | 2005 |
| PM1-SI-ISO-tc-02 (***) | | | 0,229 | **** | 14,9 | 19,9 (**) | 2007 | 2002 |
| PM1-SI-ISO-tc-03 (***) | | Primavera | 0,234 | 0,398 | 14,2 | 19,2 (**) | 2008 | 2003 |
| PM1-SI-ISO-za-01 (***) | | | 0,060 | **** | 58,0 | 62,9 (**) | 1964 | 1959 |
| PM1-SI-ISO-za-02 (***) | | | 0,114 | 0,396 | 37,4 | 42,4 (**) | 1985 | 1980 |
| PM1-SI-ISO-za-03 (***) | | 0,122 | **** | 35,1 | 40,1 (**) | 1987 | 1982 | |

* Muestra para la cual el cálculo de Tiempo se realiza con el promedio de actividad de ^{226}Ra de la Zona Inactiva.

** Muestras para las cuales el cálculo de Tiempo se realiza con el promedio de actividad de ^{226}Ra de la Zona Intermedia.

*** Muestras obtenidas solo en campaña de muestreo de primavera 2022.

**** No se registran datos.

¹ Calculado en base a la resta de la fecha de muestreo (2022) menos el tiempo transcurrido estimado por cada método de datación.

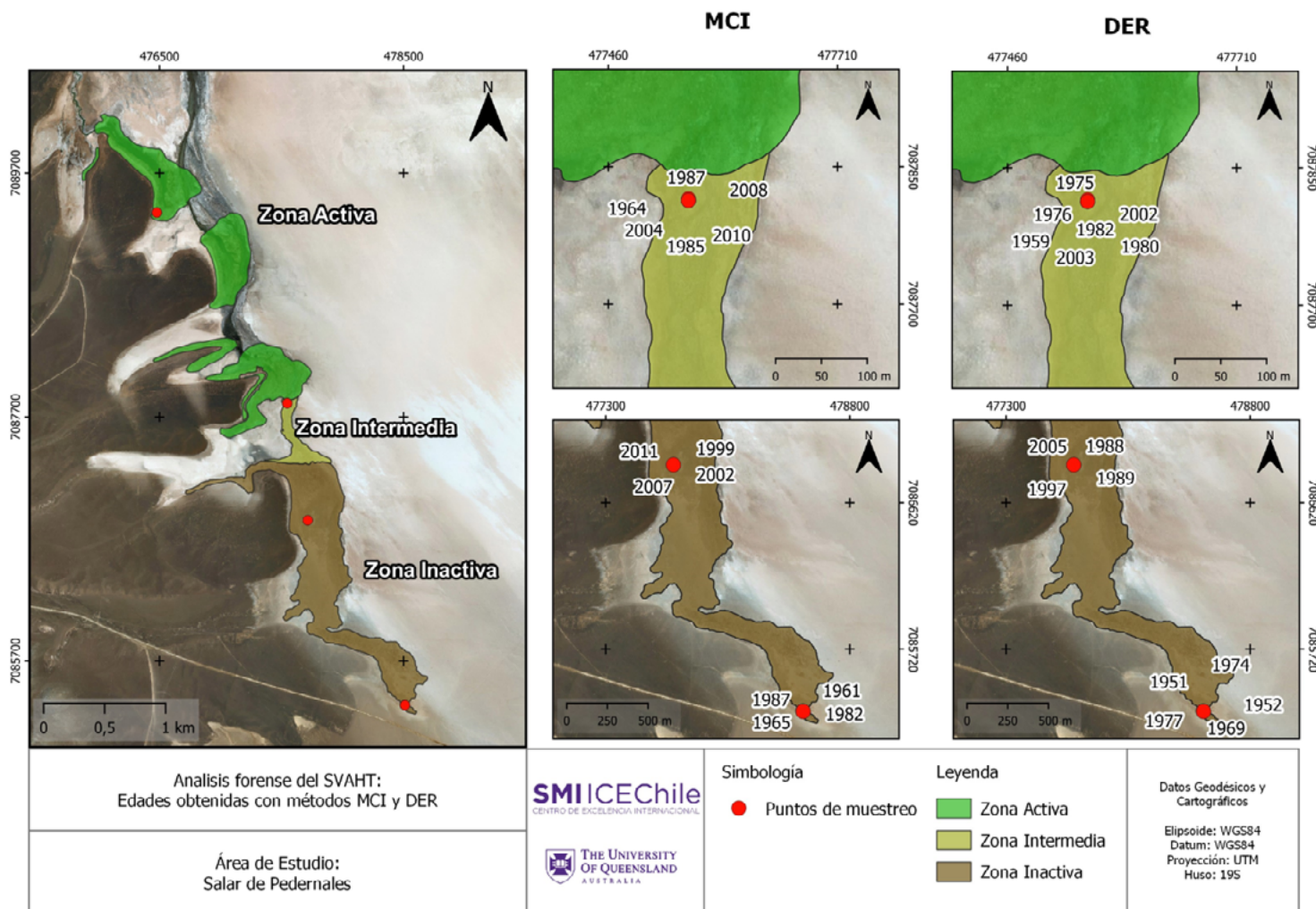


Figura 13. Años de muerte estimados por los métodos MCI y DER en los diferentes puntos de muestreo de las zonas Intermedia e Inactiva

Se han incorporado los dos métodos utilizados para este cálculo, es decir, el método de actividad inicial constante (MCI) y el método de desequilibrio radioactivo (DER). Se observa que existen diferencias en los tiempos estimados, siendo levemente mayores los estimados con el método DER en comparación con el método MCI. No obstante, el rango de tiempo se encuentra dentro del mismo orden de magnitud con ambos métodos.

Para calcular la estimación del tiempo transcurrido desde la muerte de las plantas hasta el año de muestreo (2022) en la Zona Inactiva y la Zona Intermedia, se realizaron las siguientes consideraciones:

- La actividad actual de ^{210}Pb corresponde a la vegetación viva y reciente, y se comparó con la actividad de ^{210}Pb presente en la vegetación muerta (Zona Inactiva).

- Se estudiaron todas las muestras en las cuales, en ambas campañas de muestreo, los valores de actividad de ^{210}Pb fueran comparables, es decir, actividades del mismo orden de magnitud.
- El desequilibrio radioactivo, basado en la razón $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$, para aquellas muestras que presentan valores alejados a 1, se interpretó como la ausencia de incorporación de nuevos radioisótopos y que los cambios en la actividad solo están ocurriendo por decaimiento radiactivo. Esto se observó en un grupo de muestras de la Zona Inactiva y de la Zona Intermedia del Salar de Pedernales. Para las demás muestras el desequilibrio radioactivo del par hija/padre se acercó al valor 1, indicando que tienden al equilibrio secular entre $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$.

El intervalo de tiempo transcurrido desde la muerte de las plantas de la Zona Inactiva varía entre 16,6 y 71,5 años con el método DER, y entre 10,8 y 60,8 años con el método MCI. Por otro lado, el intervalo de tiempo transcurrido desde la muerte de las plantas de la Zona Intermedia fluctúa entre 16,7 y 62,9 años con el método DER, y entre 11,9 y 58,0 años con el método MCI. La zona situada más lejos de la Zona Activa (i.e., el extremo sur de la Zona Inactiva) tiene un intervalo de muerte que va desde los 45,0 hasta los 71,5 años, según el método DER y desde 34,7 a 60,8 años según el método MCI, mientras que la Zona Inactiva cercana a la Zona Intermedia, registra una fecha de muerte que oscila entre los 16,6 y los 34,2 años según el método DER, y entre 10,8 y 23,1 años según el método MCI. Esto sugiere que el proceso de muerte de las plantas en el área de estudio del Salar de Pedernales comenzó en la zona sur de la Zona Inactiva, donde se encuentran las edades de muerte más antiguas.

5.4.2. CONTENIDO DE PLOMO TOTAL EN PLANTAS

Con el objeto de verificar el comportamiento de la absorción del ^{210}Pb por las plantas en el Salar de Pedernales, se midió la concentración de plomo total no radioactivo en las plantas, utilizado en este estudio como homólogo de ^{210}Pb , respecto a la absorción. Así, en el **Anexo 1** y **Anexo 2**, se presentan los resultados del contenido de plomo total estudiado en las plantas de las Zonas Inactiva y Activas, las cuales representan las condiciones de mínima y máxima absorción esperada de Pb.

Al realizar el análisis de las concentraciones de Pb total como homólogo del comportamiento de la absorción del ^{210}Pb en las muestras vegetales del Salar de Pedernales, se destaca la relación existente entre la actividad del isótopo ^{210}Pb y Pb total, lo que indica que el Pb radioactivo se absorbe igual que el Pb no radioactivo, siendo la correlación mayor entre ambos elementos en la Zona Inactiva ($R^2=0,994$), lo que sugiere que no existen nuevos aportes de ^{210}Pb en el tejido vegetal estudiado que pudiera aportar ^{210}Pb reciente. Esto es una indicación de que en la Zona Activa las plantas se encuentran más vigorosas incorporando Pb (y por ende también ^{210}Pb) lo que introduce mayor variabilidad en los procesos de absorción, en función de los diferentes factores propios de las plantas y los externos ambientales que pueden influir en sus factores de transferencia, aumentando la variabilidad espacial de la absorción (**Figura 14** y **Figura 15**).

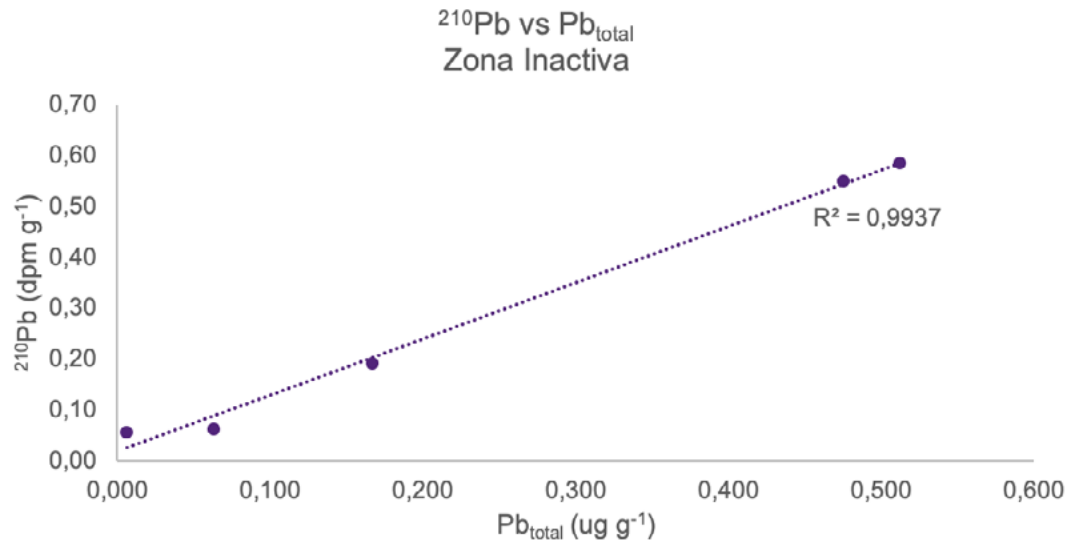


Figura 14. Correlación entre ²¹⁰Pb vs Pb total de las muestras en la Zona Inactiva del SVATH.

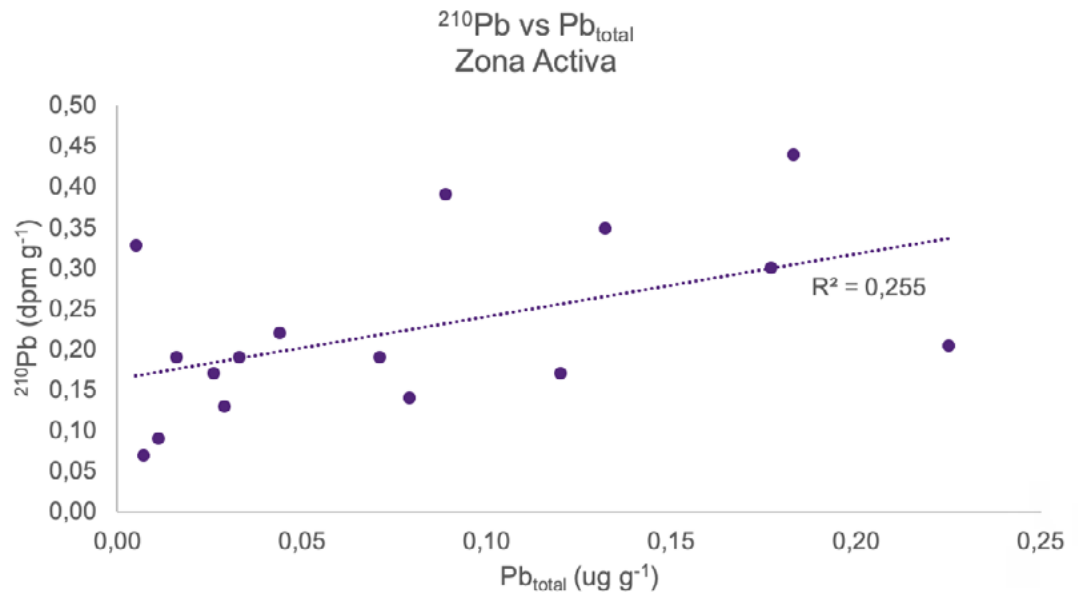


Figura 15. Correlación entre ²¹⁰Pb vs Pb total para muestras de la Zona Activa del SVAHT.

5.5. Modelo de dinámica de muerte de las plantas del SVAHT del Salar de Pedernales

El modelo general de la dinámica de muerte del SVAHT del Salar de Pedernales se presenta en la **Figura 16**. Este representa como habría comenzado a reducirse la superficie del SVAHT, dando lugar a la formación de tres zonas: Zona Inactiva, Zona Intermedia y Zona Activa.

Los resultados obtenidos por ambos métodos de datación (MCI y DER) muestran que la disminución de la superficie del SVAHT habría sido un proceso gradual, donde la muerte de las plantas habría comenzado aproximadamente en el año 1951 en la Zona Inactiva, y alrededor del año 1959 en la Zona Intermedia (**Tabla 12** y **Figura 13**). Este proceso habría durado alrededor de 71,5 años en la Zona Inactiva y 62,9 años en la Zona Intermedia, lo cual se habría estabilizado entre los años 2010 y 2011. La disminución de la superficie del SVAHT habría ocurrido inicialmente desde el extremo sur hacia el norte, ya que las mayores edades de muerte fueron encontradas en las plantas del extremo sur de la Zona Inactiva.

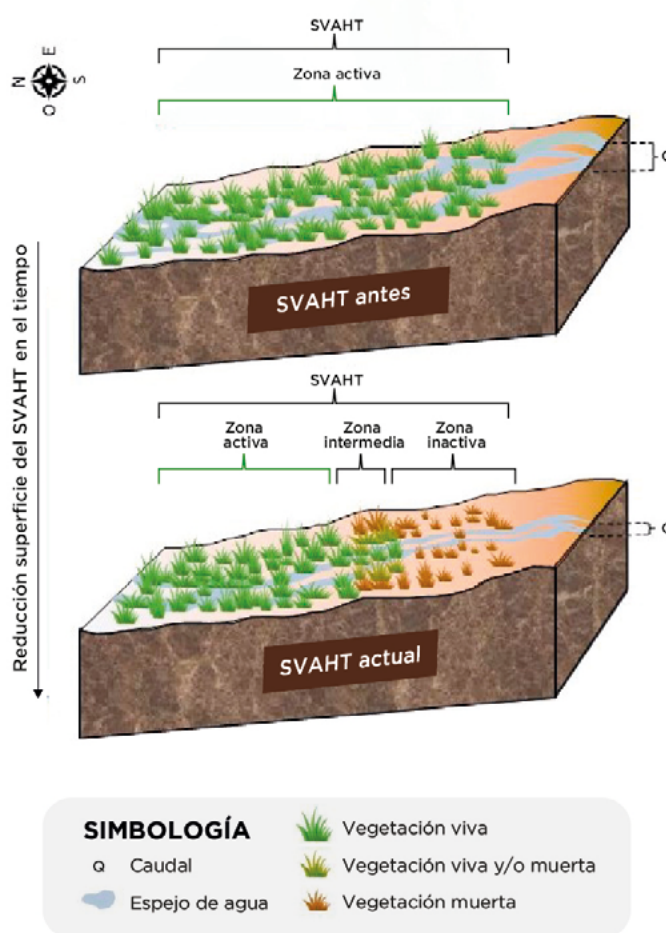


Figura 16. Modelo conceptual de dinámica de muerte del SVAHT del Salar de Pedernales.



6. Conclusiones

- Este estudio ha evaluado un método de preparación de muestras para medir la actividad de ^{210}Pb en plantas vivas y muertas del Salar de Pedernales, a través de tres métodos de digestión de muestras. Los resultados revelan la importancia de la elección de la metodología adecuada en la determinación precisa de la actividad de este radioisótopo natural.
- El método propuesto por Al-Masri *et al.*, (2015) se ha escogido para preparar las muestras de tejido de plantas en este estudio por su eficacia al emplear una combinación de HNO_3 al 65% y H_2O_2 al 30%, logrando una digestión completa de las muestras sin la necesidad de repeticiones o adiciones complementarias de ácido, produciendo valores más altos en la actividad de ^{210}Pb , respecto a los obtenidos por los otros métodos ensayados.
- Los individuos vivos de *Puccinellia frigida* y *Zameioscirpus atacamensis* de la Zona Activa presentaron mayores actividades de ^{210}Pb en sus raíces en comparación con los tejidos aéreos.
- Ambos métodos utilizados ofrecen una estimación de tiempo comparable (mismo orden de magnitud), oscilando entre 16, 6 y 71,5 años para el DER y entre 10,8 y 60,8 años para el MCI. Esto se puede interpretar como que las plantas de la Zona Inactiva no han muerto al mismo tiempo, sino que ha sido un proceso continuo que se inició al menos hace 71,5 años aproximadamente.
- Las mayores edades de muerte de plantas en el SVAHT fueron encontradas en las plantas del extremo sur de la Zona Inactiva, lo que indica que la disminución de la superficie del SVAHT habría ocurrido inicialmente desde el extremo sur hacia el norte.
- La alta correlación entre la actividad del ^{210}Pb y el Pb no radiactivo (estable) en la Zona Inactiva muestra que los procesos de absorción del ^{210}Pb en las plantas se comporta químicamente como el del Pb estable, lo que permite utilizar este radionúclido como trazador de procesos fisiológicos (absorción) de las plantas estudiadas.

7. Referencias

Al-Masri, M., Y. Amin, S. Ibrahim, M. Nassri. (2015). Transfer of ^{210}Po , ^{210}Pb and ^{238}U from medicinal plants to their essential oils. *Journal of Environmental Radioactivity* 141: 51-56.

AMPHOS21. (2018). Anexo 4-6: MODELOS HIDROLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS SALAR DE PEDERNALES. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Rajo Inca.

Appleby, P. G., & Oldfield, F. (1978). The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. *Catena*, 5(1), 1–8. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(78\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(78)80002-2)

Azevedo, H. L. (1988). Study of heavy metal pollution in the tributary rivers of the Jacarepagua Lagoon, Río de Janeiro State, Brazil, through sediment analysis. En: Seeliger, U., De Lacerda, L. D., Patchineelam, S. R. (ed.). *Metals in Coastal, Environments of Latin American*. Springer-Verlag. 297 pp.

Bettencourt António O., Maria M.G.R. Teixeira, Maria D.T. Elias, Maria C. Faisca. (1988). Soil to plant transfer of Radium-226. *Journal of Environmental Radioactivity* Volume 6, Issue 1, Pages 49-60 [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(88\)90067-7](https://doi.org/10.1016/0265-931X(88)90067-7).

Bilgici Cengiz, G. (2019). Transfer factors of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K from soil to pasture-grass in the northeastern of Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 319, 83-89, <https://doi.10.1007/s10967-018-6337-8>

Centro de Ecología Aplicada (CEA). (2020). Análisis de SVAHT Salar de Pedernales y la Ola mediante descripción cualitativa y análisis de imágenes. 90 pp.

Comité Regional de Cambio Climático (CORECC). (2023). Propuesta Plan de Acción Regional de Cambio Climático. Región de Atacama. Ministerio del Medio Ambiente. Chile.112 pp.

Contreras, C. (s.f.). El Cambio Climático en la Región de Atacama. Ministerio del Medio Ambiente. Chile. https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/12/Atacama_.pdf

Daniel Schuller, David Kadko, Craig R. Smith, Use of $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ disequilibria in the dating of deep-sea whale falls, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 218, Issues 3–4, 2004, Pages 277-289.

El Aouidi Samira, Ayub Benmhammed, Azzouz Benkdad, Nezha Mejjad, Edit Toth-Bodrogi, Tibor Kovacs (2021) Transfer of ^{40}K , ^{226}Ra and ^{210}Pb from soil to plants in various locations of El-Jadida agricultural area (north-western Morocco) *E3S Web of Conferences* 314, 01004 (2021) WMAD21.

Flynn, WW., (1968). The determination of low levels of polonium-210 in environmental materials. *Analytica chimica acta*, 43, 221-227.

Graustein and Turekian, (1996) ^7Be and ^{210}Pb indicate an upper troposphere source for elevated ozone in the summertime subtropical free troposphere of the eastern North Atlantic *Geophys. Res. Lett.*, 23 (5), pp. 539-542.

Horvatini, N., Barej, J., Babinka, S., Obeli, B., Krajcar Broni, I., Vrea, P. & Suckow, A. (2008). Towards a Deeper Understanding of How Carbonate Isotopes (^{14}C , ^{13}C , ^{18}O) Reflect Environmental Changes: A Study with Recent ^{210}Pb -Dated Sediments of the Plitvice Lakes, Croatia. *Radiocarbon*, 50(2), 233-253. <https://doi.org/10.1017/S0033822200033543>

Hovmand M.F., S.P. Nielsen, I. Johnsen, (2009) Root uptake of lead by Norway spruce grown on ^{210}Pb spiked soils, *Environmental Pollution*, Volume 157, Issue 2, Pages 404-409, ISSN 0269-7491.

IAEA (1994) International Atomic Energy Agency Handbook of Parameter Values for Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environment. IAEA, Vienna.

Ivanovich M., R.S. Harmon (1992), Uranium series disequilibrium: applications to earth, marine and environmental sciences, Clarendon Press, Oxford, pp. 731-778.

Krishnaswami, S. & Lal, D. (1978). Radionuclide Limnology. In A. Lerman (Ed.), *Lakes* (pp. 153-177). Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1152-3_6.

Laissaoui A, Benmansour M, Ziad N, Majah MI, Abril JM, Mulsow S (2008) Anthropogenic radionuclides in the water column and a sediment core from the Alboran Sea: application to radiometric dating and reconstruction of historical water column radionuclide concentration. *J. Paleolimn.* 40(3):823–833.

Luque Marín, José Antonio. (2003). Lago de Sanabria: un sensor de las oscilaciones climáticas del Atlántico Norte durante los últimos 6.000 años, *El: Universitat de Barcelona*.

Lima, V.L.B. Souza, R.K. Nascimento, P.N.C. Santos, M.G.O. Almeida, C.A. Hazin, (2014) Metal fractionation in sediments as a tool for assessing the availability of trace metals: The case of Apipucos Reservoir, *Radiation Physics and Chemistry*, Volume 95, 2014, Pages 329-332,

Mathieu, G.G., P.E. Biscaye, R.A. Lupton, and D.E. Hammond, (1988). System for measurement of ^{222}Rn at low levels in natural waters. *Health Phys.* 55:989-992.

Meriguetti Pinto, V., Fernando Pires, L., Oliveira Santos Bacchi, O., Robson Clayton, J.A., Pereira Bruno, I., Reichardt, K., (2013). Spatial variability of ^7Be fallout for erosion evaluation. *Radiat. Phys. Chem.* 83, 1–7.

Noordijk H., K.E. Van, J. Lembrechts, M.J. Frissel (1992) Impact of ageing and weather conditions on soil-to-plant transfer of radiocesium and radiostrontium. *J. Environ. Radioact*, 15, pp. 277-286.

Paul, A.C., Pillai, K.C. (1986) Distribution and transport of radium in a tropical river. *Water Air Soil Pollut* 29, 261-272. <https://doi.org/10.1007/BF00158758>.

Robbins, John A, & Edgington, David N. (1975). Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(3), 285-304.

Salamanca M. & A. Camaño, (1994). Historia de la contaminación por metales traza en dos áreas costeras del norte y centro-sur de Chile. *Gayana Oceanológica*, 2, 31-48.

Salamanca, M. (2001). Asignación de Edades y Crecimiento del Bacalao de Profundidad. Subproyecto: Determinación Radiométrica de la edad del "Bacalao de Profundidad" *Disostichus eleginoides*, Smitt 1998. Proyecto Fip No. 2001-17. Informe Final. Noviembre 2002.

Salamanca, M. (2007). Edad, Crecimiento y Mortalidad natural del Besugo. Subproyecto: Validación del procedimiento de determinación de la edad en Besugo. Proyecto Fip No. 2007-36. Informe Final. Diciembre 2008.

Sarricolea, P., Meseguer Ruiz, O., & Romero-Aravena, H. (2017). Tendencias de la precipitación en el norte grande de Chile y su relación con las proyecciones de cambio climático. *Diálogo andino*, (54), 41-50.

Sarricolea Espinoza, P., & Romero Aravena, H. (2015). Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, (62), 169-183.

Sheppard M.I., S.C. Sheppard (1985). The plant concentration ratio concept as applied to natural uranium *Health Phys.*, 48, pp.494-500.

Shuller D., Kadko D., Smith C.R. (2004) Use of $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ disequilibria in the dating of deep-sea whale falls. *Elsevier Earth and Planetary Science Letters* 218. 277-289.

Smith J.N, R. Nelson, S.E. (1991) Campana, The use of Pb-210/Ra-226 and Th-228/Ra-228 disequilibria in the ageing of otoliths of marine fish, in: P.J. Kershaw, D.S. Woodhead (Eds.), *Radionuclides in the Study of Marine Processes*, Elsevier Science, New York, pp. 350-359.

Turekian K.K, L.K. Benninger, R.C. Aller, J.K. Cochran (1978) Effects of biological sediment mixing on the ^{210}Pb chronology and trace metal distribution in a Long Island Sound sediment core, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 43, Issue 2, 1979, Pages 241-259.

Vera F. Tome, M. P. Blanco Rodríguez and J. C. Lozano (2003) "Soil-to-Plant Transfer Factors for Natural Radionuclides and Stable Elements in a Mediterranean Area" *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 65, pp. 161-175. [http://dx.doi.org/10.1016/S0265-931X\(02\)00094](http://dx.doi.org/10.1016/S0265-931X(02)00094).

Walling, D.E., Collins, A.L., Sickingabula, H.M., (2003). Using unsupported lead-210 measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in small Zambian catchment. *Geomorphology* 52, 193–213.

Ziad, N., R. Zarki, M. Benmansour, T. Sayerh and A. Laissaoui. (2011). Determination of ^{210}Pb in human skeletal remains from Morocco: implications for time since death assessment. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 292:315–319.



8. Anexos

8.1. Anexo 1. Informes de resultados

| | | | | |
|---|--|-------------------------------|------------------|------------------|
| | INFORME DE RESULTADOS N° 605/2023-1 | | | |
| | Formulario N° REG-PIR-28 | Fecha de vigencia 02.01.13 | Versión N° 03 | Página Inicio |
| Aplicable a: LABORATORIO DE OCEANOGRAFÍA QUÍMICA | | | | |


IR LOQ N° 605/2023-1 MODIFICA Y REEMPLAZA AL IR LOQ 605/2023.

| ANTECEDENTES GENERALES | | | | | |
|--|---|------------|----------------------|----------------------|-------------|
| Cliente | SMI Chile. | | | | |
| Contacto | Sr (a) Felipe Saavedra. | | | | |
| Proyecto | Estudio Forense Salar Pedernales. | | | | |
| Identificación del Instrumento Ambiental | No aplica. | | | | |
| Dirección | No informado. | | | | |
| Ciudad | No informado. | | | | |
| N° Cotización | No aplica. | | | | |
| Fecha Emisión Informe | 23 de enero de 2024. | | | | |
| Total N° de Páginas IR-LOQ | 06 (Incluye páginas de inicio y final del informe). | | | | |
| N° IR LADIOX (asociado). | No aplica. | | | | |
| N° IR MUESTREO (asociado). | No aplica. | | | | |
| INFORMES INTERNOS (IR-LOQ) | | | | | |
| Sección | Código interno | N° Páginas | Nombre I.A. Análisis | | Código I.A. |
| LET-SA | 046-2023-1 | 02 | No aplica. | | No aplica. |
| LRQ | 001-2023-1 | 02 | No aplica. | | No aplica. |
| INFORMES LABORATORIOS EXTERNOS (IR-LABEX) | | | | | |
| Laboratorio | N° Informe | N° Páginas | Código ETFA | Nombre I.A. Análisis | Código I.A. |
| No aplica | No aplica | No aplica | No aplica | No aplica | No aplica |
| ACTIVIDADES DE MUESTREO | | | | | |
| Tipo de Matriz / Tipo de Muestra | Material Vegetal / No aplica. | | | | |
| Entidad(es) Muestreadora (s) / Código(s) ETFA | No informado. | | | | |
| N° Informe | No aplica. | | | | |
| Nombre I.A. Muestreo / Código I.A. | No aplica. | | | | |
| Lugar de Muestreo | No informado. | | | | |
| Fecha de Muestreo | 18 de abril de 2022. | | | | |
| | 05 y 06 de octubre de 2022. | | | | |
| SERVICIO SOLICITADO | | | | | |
| Orden de Compra | No aplica. | | | | |

Los resultados de este informe se relacionan sólo con los ítems sometidos a ensayo.

Documento controlado por el SGC. Prohibida su reproducción total o parcial sin la autorización del LOQ. Este documento es válido sólo con timbre y firma oficial del LOQ.
Cajina 5, Barrio Universitario S/N, Casilla 150-C, Concepción-CHILE.
(56) 412204600 www.loq.cl loq@udec.cl



| | | | |
|---|--|-------------------------------|------------------|
|  | INFORME DE RESULTADOS N° 605/2023-1 | | |
| | Formulario N° IR-LET-SA | Fecha de vigencia 09.11.09 | Versión N° 12 |
| Aplicable a: LABORATORIO DE OCEANOGRAFÍA QUÍMICA | | | |

| | | | | |
|--|--|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| CÓDIGO ETFA: 021-02. | | | | |
| MATRIZ: MATERIAL VEGETAL. | | | | |
| N° Código Cliente: 36. | | | | |
| N° Código Interno: 046-2023-1. | | | | |
| N° de Muestras: 23. | | | | |
| Fecha Informe: 07 de septiembre de 2023. | | | | |
| Parámetros | Metodología | N° de Registros Internos | Fecha Inicio Análisis | Fecha Término Análisis |
| ⁽¹⁾ Plomo (Pb) | IT-LET-SA-02 Ver.9. ICP-MS. | 2312674 - 2312720 | 30.07.23 | 11.08.23 |
| OBSERVACIONES | | | | |
| (1) | Análisis realizado en Base Seca con digestión total de la muestra. | | | |
| ICP-MS | Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado por Inducción. | | | |

RESULTADOS

| | | |
|---|--------------------|---|
| Fecha de Muestreo: 18 de abril de 2022. | | |
| Fecha de Recepción: 30 de abril de 2022. | | |
| N° | Id. Muestra | Pb ($\mu\text{g g}^{-1}$) |
| 1 | PM3-SI-ISO-02 (*) | 0,006 |
| 2 | PM3-SI-ISO-03 (*) | 3,228 |
| 3 | PM2-SI-ISO-01 | 0,512 |
| 4 | PM2-SI-ISO-02 | 0,475 |
| 5 | PM3-SA-ISO-tc-01 | 0,071 |
| 6 | PM3-SA-ISO-tc-02 | 0,120 |
| 7 | PM3-SA-ISO-tc-03 | 0,183 |
| 8 | PM3-SA-ISO-za-01 | 0,026 |
| 9 | PM3-SA-ISO-za-02 | 0,007 |
| 10 | PM3-SA-ISO-za-03 | 0,011 |
| 11 | PM3-SA-ISO-pf-01 | 0,033 |
| 12 | PM3-SA-ISO-pf-02 | 0,177 |
| 13 | PM3-SA-ISO-pf-03 | 0,029 |
| 14 | PM6-SA-ISO-tc-01 | 0,079 |
| 15 | PM6-SA-ISO-tc-02 | 0,044 |
| 16 | PM6-SA-ISO-tc-03 | 0,016 |
| Límite de Detección | | 0,001 |
| Límite de Cuantificación | | 0,002 |
| Precisión (%) | | 98,23 |
| Exactitud (%) | | 99,17 |

| | | |
|---|--------------------|---|
| Fecha de Muestreo: 05 y 06 de octubre de 2022. | | |
| Fecha de Recepción: 12 de octubre de 2022. | | |
| N° | Id. Muestra | Pb ($\mu\text{g g}^{-1}$) |
| 1 | PM3-SI-ISO-02 (*) | 0,063 |
| 2 | PM3-SI-ISO-03(*) | 3,482 |
| 3 | PM2-SI-ISO-02 | 0,167 |
| 4 | PM3-SA-ISO-tc-01 | 0,132 |
| 5 | PM3-SA-ISO-za-03 | 0,005 |
| 6 | PM3-SA-ISO-pf-03 | 0,225 |
| 7 | PM6-SA-ISO-tc-03 | 0,089 |
| Límite de Detección | | 0,001 |
| Límite de Cuantificación | | 0,002 |
| Precisión (%) | | 98,23 |
| Exactitud (%) | | 99,17 |

Zallex García G.
Encargada Sección LET




Documento controlado por el SCS. Prohibida su reproducción total o parcial sin la autorización del LOQ. Este documento es válido sólo con timbre y firma oficial del LOQ.
Cajina 5, Barrio Universitario S/N, Casilla 160-C, Concepción-CHILE.
(56) 412204966 www.loq.cl loq@udec.cl

| | | | |
|---|--|----------------------------|---------------|
|  | INFORME DE RESULTADOS N° 605/2023-1 | | |
| | Formulario N° IR-LRQ | Fecha de vigencia 06.02.15 | Versión N° 06 |
| Aplicable a: LABORATORIO DE OCEANOGRAFÍA QUÍMICA | | | |

| CÓDIGO ETFA: 021-02. | | | | | |
|--|--|-------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|
| MATRIZ: MATERIAL VEGETAL. | | | | | |
| N° Código Cliente: 36. | | | | | |
| N° Código Interno: 001-2023-1. | | | | | |
| N° de Muestras: 51. | | | | | |
| Fecha Informe: 07 de septiembre de 2023. | | | | | |
| Parámetros | Metodología | Instructivo | N° de Registros Internos | Fecha Inicio Análisis | Fecha Término Análisis |
| ⁽¹⁾ ²¹⁰ Pb (²¹⁰ Pb) | (2) Espectroscopía Alfa | IT-LRQ-01 | 2312673 - 2312723 | 01.06.22 | 20.03.23 |
| ⁽¹⁾ ²²⁶ Ra (²²⁶ Ra) | (3) Centelleo gaseoso | IT-LRQ-02 | 2312673 - 2312723 | 22.06.23 | 23.07.23 |
| REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA | | | | | |
| (2) | - Flynn, W.W. 1966. The determination of low levels of Polonium-210 in environmental materials. Anal. Chem. Acta 43: 221 -227. | | | | |
| (3) | - Lucas, H.F. 1964. A fast and accurate survey technique for both radon-222 and radium-226. In: The Natural Radiation Environment. Chicago: The University of Chicago Press, p. 315-329. | | | | |
| OBSERVACIONES | | | | | |
| (1) | Análisis realizado en Base Seca con digestión total de la muestra. | | | | |
| *** | No se determina el analito en esta muestra. | | | | |

RESULTADOS

| Fecha de Muestreo: 18 de abril de 2022. | | | |
|---|-------------------|--|--|
| Fecha de Recepción: 30 de abril de 2022. | | | |
| N° | Id. Muestra | ²¹⁰ Pb (dpm g ⁻¹) | ²²⁶ Ra (dpm g ⁻¹) |
| 1 | PM3-SI-ISO-01 | 0,587 | *** |
| 2 | PM3-SI-ISO-02 (*) | 0,055 | 0,506 |
| 3 | PM3-SI-ISO-03 (*) | 0,124 | 0,545 |
| 4 | PM2-SI-ISO-01 | 0,585 | 0,498 |
| 5 | PM2-SI-ISO-02 | 0,549 | *** |
| 6 | PM2-SI-ISO-03 | 0,260 | 0,435 |
| 7 | PM1-SI-ISO-01 | 0,206 | 0,346 |
| 8 | PM1-SI-ISO-02 | 0,252 | *** |
| 9 | PM1-SI-ISO-03 (*) | 0,116 | 0,485 |
| 10 | PM3-SA-ISO-tc-01 | 0,190 | *** |
| 11 | PM3-SA-ISO-tc-02 | 0,170 | 0,402 |
| 12 | PM3-SA-ISO-tc-03 | 0,440 | *** |
| 13 | PM3-SA-ISO-za-01 | 0,170 | 0,360 |
| 14 | PM3-SA-ISO-za-02 | 0,070 | *** |
| 15 | PM3-SA-ISO-za-03 | 0,090 | *** |
| 16 | PM3-SA-ISO-pf-01 | 0,190 | *** |
| 17 | PM3-SA-ISO-pf-02 | 0,300 | *** |
| 18 | PM3-SA-ISO-pf-03 | 0,130 | 0,371 |
| 19 | PM6-SA-ISO-tc-01 | 0,140 | *** |
| 20 | PM6-SA-ISO-tc-02 | 0,220 | *** |
| 21 | PM6-SA-ISO-tc-03 | 0,190 | *** |
| Límite de Detección | | - | - |
| Límite de Cuantificación | | - | - |
| Precisión (%) | | - | - |
| Exactitud (%) | | - | - |


| | | | |
|---|--|-------------------------------|------------------|
| | INFORME DE RESULTADOS N° 605/2023-1 | | |
| | Formulario N° IR-LRQ | Fecha de vigencia 06.02.15 | Versión N° 06 |
| Aplicable a: LABORATORIO DE OCEANOGRAFÍA QUÍMICA | | | |

| Fecha de Muestreo: 05 y 06 de octubre de 2022. | | | |
|---|-----------------------|--|--|
| Fecha de Recepción: 12 de octubre de 2022. | | | |
| N° | Id. Muestra | ²¹⁰Pb (dpm g⁻¹) | ²²⁶Ra (dpm g⁻¹) |
| 1 | PM3-SI-ISO-01 | 0,104 | 0,539 |
| 2 | PM3-SI-ISO-02 (*) | 0,063 | 0,546 |
| 3 | PM3-SI-ISO-03(*) | 0,123 | 0,495 |
| 4 | PM2-SI-ISO-01 | 0,178 | *** |
| 5 | PM2-SI-ISO-02 | 0,193 | 0,541 |
| 6 | PM2-SI-ISO-03 | 0,228 | 0,509 |
| 7 | PM1-SI-ISO-01 | 0,431 | 0,393 |
| 8 | PM1-SI-ISO-02 | 0,412 | *** |
| 9 | PM1-SI-ISO-03(*) | 0,117 | 0,510 |
| 10 | PM1-SI-ISO-1c-01 (**) | 0,247 | *** |
| 11 | PM1-SI-ISO-1c-02 (**) | 0,229 | *** |
| 12 | PM1-SI-ISO-1c-03 (**) | 0,234 | 0,398 |
| 13 | PM1-SI-ISO-za-01 (**) | 0,060 | *** |
| 14 | PM1-SI-ISO-za-02 (**) | 0,114 | 0,396 |
| 15 | PM1-SI-ISO-za-03 (**) | 0,122 | *** |
| 16 | PM3-SA-ISO-1c-01 | 0,349 | *** |
| 17 | PM3-SA-ISO-1c-02 | 0,372 | 0,395 |
| 18 | PM3-SA-ISO-1c-03 | 0,386 | *** |
| 19 | PM3-SA-ISO-za-01 | 0,322 | 0,349 |
| 20 | PM3-SA-ISO-za-02 | 0,317 | *** |
| 21 | PM3-SA-ISO-za-03 | 0,328 | 0,401 |
| 22 | PM3-SA-ISO-pf-01 | 0,190 | *** |
| 23 | PM3-SA-ISO-pf-02 | 0,206 | *** |
| 24 | PM3-SA-ISO-pf-03 | 0,205 | 0,339 |
| 25 | PM6-SA-ISO-1c-01 | 0,387 | *** |
| 26 | PM6-SA-ISO-1c-02 | 0,389 | 0,371 |
| 27 | PM6-SA-ISO-1c-03 | 0,391 | 0,409 |
| 28 | PM6-SA-ISO-ZA-01 (**) | 0,360 | *** |
| 29 | PM6-SA-ISO-ZA-02 (**) | 0,392 | 0,422 |
| 30 | PM6-SA-ISO-ZA-03 (**) | 0,371 | *** |
| Limite de Detección | | - | - |
| Limite de Cuantificación | | - | - |
| Precisión (%) | | - | - |
| Exactitud (%) | | - | - |



MARCO HIDALGO G.



| | | | |
|---|--|-------------------------------|------------------|
|  | INFORME DE RESULTADOS N° 605/2023-1 | | |
| | Formulario N° REG-PIR-28 | Fecha de vigencia 02.01.13 | Versión N° 03 |
| Aplicable a: LABORATORIO DE OCEANOGRAFÍA QUÍMICA | | | |



Gabriela Franyola V.

Sra. Gabriela Franyola V.
Jefe Técnico / I.A.
Laboratorio de Oceanografía Química
Universidad de Concepción

Claudia Figueroa Sn. M.

Sra. Claudia Figueroa Sn. M.
Gerente de Calidad
Laboratorio de Oceanografía Química
Universidad de Concepción

Marco Salamanca Orrego

Dr. Marco Salamanca Orrego
Gerente General
Laboratorio de Oceanografía Química
Universidad de Concepción

Documento controlado por el SGC. Prohibida su reproducción total o parcial sin la autorización del LOQ. Este documento es válido solo con timbre y firma oficial del LOQ.
Cajina 5, Barrio Universitario S/N, Casilla 160-C, Concepción-CHILE.
(56) 412204966 www.loq.cl loq@udec.cl



8.2. Anexo 2. Tabla comparativa de la actividad de ^{210}Pb y Pb total medidos en plantas del Salar de Pedernales

| Identificación | Zona | Campaña | Actividad ^{210}Pb (dpm/g) | Pb ($\mu\text{g g}^{-1}$) | |
|------------------|----------|-----------|-------------------------------------|-----------------------------|-------|
| PM3-SI-ISO-02 | Inactiva | Otoño | 0,055 | 0,006 | |
| PM3-SI-ISO-03 | | | 0,124 | 3,228 | |
| PM2-SI-ISO-01 | | | 0,585 | 0,512 | |
| PM2-SI-ISO-02 | | Primavera | 0,549 | 0,475 | |
| PM3-SI-ISO-02 | | | 0,063 | 0,063 | |
| PM3-SI-ISO-03 | | | 0,123 | 3,482 | |
| PM2-SI-ISO-02 | | | 0,193 | 0,167 | |
| PM3-SA-ISO-tc-01 | Activa | Otoño | 0,190 | 0,071 | |
| PM3-SA-ISO-tc-02 | | | 0,170 | 0,120 | |
| PM3-SA-ISO-tc-03 | | | 0,440 | 0,183 | |
| PM3-SA-ISO-za-01 | | | 0,170 | 0,026 | |
| PM3-SA-ISO-za-02 | | | 0,070 | 0,007 | |
| PM3-SA-ISO-za-03 | | | 0,090 | 0,011 | |
| PM3-SA-ISO-pf-01 | | Primavera | 0,190 | 0,033 | |
| PM3-SA-ISO-pf-02 | | | 0,300 | 0,177 | |
| PM3-SA-ISO-pf-03 | | | 0,130 | 0,029 | |
| PM6-SA-ISO-tc-01 | | | 0,140 | 0,079 | |
| PM6-SA-ISO-tc-02 | | | 0,220 | 0,044 | |
| PM6-SA-ISO-tc-03 | | | 0,190 | 0,016 | |
| PM3-SA-ISO-tc-01 | | | | 0,349 | 0,132 |
| PM3-SA-ISO-za-03 | | | | 0,328 | 0,005 |
| PM3-SA-ISO-pf-03 | | | | 0,205 | 0,225 |
| PM6-SA-ISO-tc-03 | | | | 0,391 | 0,089 |

CONTACTO

Dr. Felipe Saavedra

Líder – Rehabilitación Ambiental y Dinámicas Ecosistémicas

Gerente de Proyectos de Investigación y Desarrollo, SMI-ICE-Chile

M +56 9 32571708

E f.saavedra@smiicechile.cl

Número de proveedor CRICOS code: 00025B * TEQSA PRV12080

