

ESTUDIO DE ANÁLISIS FORENSE DE LA VEGETACIÓN AZONAL HÍDRICA TERRESTRE CON AFECTACIÓN (SVAHT), SECTOR SALAR DE PEDERNALES

INFORME ANUAL DE GESTIÓN

JUNIO 2023

ESTUDIO DE ANÁLISIS FORENSE DE LA VEGETACIÓN AZONAL HÍDRICA TERRESTRE CON AFECTACIÓN (SVAHT), SECTOR SALAR DE PEDERNALES

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad de Queensland por su apoyo y confianza otorgada para que el Centro de Excelencia Internacional del Sustainable Minerals Institute sea un éxito en Chile.

Agradecemos a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo, ANID por su apoyo a través del Programa de Atracción de Centros de Excelencia Internacional (CEI) de Corfo.

Agradecemos a nuestros socios estratégicos, Codelco División Salvador y Laboratorio de Oceanografía Química, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas de la Universidad de Concepción, por su colaboración y apoyo en la ejecución de este proyecto.

Agradecemos a nuestros proveedores de servicios de diseño gráfico y producción audiovisual, AIRE Consultores y AVIC Producciones por su dedicación y trabajo.



AIRE



The Sustainable Minerals Institute, The University of Queensland, Australia

Clasificada como una de las 50 mejores¹, The University of Queensland (UQ) es una de las instituciones australianas líderes en investigación y docencia. UQ se esfuerza por lograr excelencia a través de la creación, conservación, transferencia y aplicación del conocimiento. Por más de un siglo, hemos educado y trabajado con destacadas personas para entregar liderazgo del conocimiento para un mundo mejor.

El Sustainable Minerals Institute (SMI) es un instituto líder mundial en investigación² comprometido al desarrollo de soluciones basadas en el conocimiento de los desafíos globales en materia de sostenibilidad de la industria de recursos, y de capacitar a la próxima generación de líderes de la industria y de comunidades.

El Instituto es transdisciplinario, y nuestro trabajo es independiente, imparcial y riguroso. Nuestra investigación integra la experiencia de especialistas en producción, medio ambiente y ciencias sociales, para entregar desarrollo de recursos responsable. SMI se conforma de seis centros de investigación y un Centro de Excelencia basado en Chile. Tenemos un récord sólido en todas las áreas de la minería – en exploración, minería, procesamiento de minerales, salud y seguridad en el trabajo, rehabilitación de minas, agua y energía, responsabilidad social, y gobernanza de los recursos.

El corazón de nuestro negocio está profundamente enraizado en la industria de minerales y nuestros investigadores tienen experiencia trabajando en el sector, para apoyar a la industria, los gobiernos, las comunidades y la sociedad civil, a través del análisis y liderazgo de pensamiento.

Centro de Excelencia Internacional en Chile, SMI-ICE-Chile

El Centro de Excelencia Internacional en Chile busca mejorar fundamentalmente la gestión productiva y Ambiental de las operaciones mineras chilenas y estar a la vanguardia de la investigación innovadora y transferencia tecnológica.

El Centro tiene el propósito de crear una nueva fuerza de conocimiento minero colaborativo en Chile, que desarrolle capital humano, entregue resultados de investigación innovadores y realice una efectiva transferencia tecnológica a la industria, gobierno y sociedad.

Más información en smi.uq.edu.au y smiicechile.cl/

¹ Ranking mundial de universidades QS y Ranking de desempeño en papers científicos para universidades del mundo (2018)

² The University of Queensland está clasificada como primera en el mundo para ingeniería minera y mineral, 2018 Shanghai Rankings por asignatura.

Tabla de Contenidos

1.	Resumen Ejecutivo	1
1.1	Contexto.....	1
1.2	Indicadores de cumplimiento.....	4
1.2.1	Avance físico general	4
1.2.2	Entregables a la fecha.....	6
1.2.3	Próximas actividades	6
2.	Introducción	8
3.	Objetivos.....	8
4.	Material y métodos.....	9
4.1	Área de Estudio.....	9
4.2	Metodología	13
4.2.1	Muestreo en terreno	13
4.2.2	Preparación de muestras y lectura de ²¹⁰ Pb	14
5.	Resultados.....	18
6.	Discusión.....	19
7.	Listado de profesionales del Proyecto	21
8.	Referencias.....	22

Tablas

Tabla 1.	Carta Gantt del Análisis Forense.....	3
Tabla 2.	Avance físico de Análisis Forense del SVAHT.	4
Tabla 3.	Documentos entregados a la fecha y por entregar Análisis Forense	6
Tabla 4.	Superficie del Área de Estudio	9
Tabla 5.	Estadística básica de resultados de lecturas de ²¹⁰ Pb (Bq/kg) en muestras de plantas colectadas en el año 2022.	18
Tabla 6.	Actividad de ²¹⁰ Pb según la estructura de las muestras analizadas para Zameioscirpus atacamensis y Puccinellia frigida en muestras colectadas en el año 2022.....	18

Figuras

Figura 1. ODS y su relación con El Estudio de Análisis Forense del SVAHT.	2
Figura 2. Avance físico de Análisis Forense del SVAHT y etapas restantes.	5
Figura 3. Área de Estudio Análisis Forense SVAHT.....	10
Figura 4. Salar de Pedernales, SVAHT inactivo (A1 y A2).	11
Figura 5. Salar de Pedernales, SVAHT activo (B1 y B2).....	11
Figura 6. Salar de Pedernales, SVAHT de la Zona de transición (C1 y C2).	12
Figura 7. Cuadrante de muestreo.	14
Figura 8. Proceso de separación de sal y suelo. 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.	16
Figura 9. Espectrómetro Alfa. Sistema de cuantificación de radionúclidos.....	17
Figura 10. Contenido de ²¹⁰ Pb en raíces, tallos y hojas.....	19

1. Resumen Ejecutivo

1.1 Contexto

En el contexto de la demanda por Daño Ambiental interpuesta por parte del Consejo de Defensa del Estado (CDE) contra Codelco División Salvador, y en el marco del proceso de conciliación que concluyó con un Avenimiento y Transacción entre las partes, Codelco y el CDE acordaron una serie de medidas asociadas a recursos hídricos y a los sistemas vegetacionales azonales hídricos terrestres (SVAHT) en el Salar de Pedernales, las cuales además fueron complementadas por sugerencia del Primer Tribunal Ambiental de Antofagasta.

Para intentar responder a la principal interrogante surgida de la visita técnica realizada al Salar junto al Primer Tribunal Ambiental, sobre la datación de la afectación de la vegetación en la zona del SVAHT inactivo del Salar de Pedernales, actualmente en forma de rastrojo, se sugirió la exploración de métodos asociados al uso de radionúclidos naturales de la serie ^{238}U o ^{210}Pb , utilizados ampliamente como geocronómetros de procesos ambientales diversos. En el caso del ^{210}Pb , el que posee una vida media de 22,3 años, ha sido usado en investigación ambiental como trazador de procesos atmosféricos (Graustein and Turekian, 1996), tasas de erosión (Walling et al., 2003; Meriguetti, Pinto *et al.*, 2013), sedimentación y datación de sistemas acuáticos (Horvatinčić *et al.*, 2008), registros de aportes antropogénicos en sedimentos costeros (Laissaoui A. *et al.*, 2008; 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 para obtener registros geocronológicos en sedimentos de escala reciente (Appleby & Oldfield, 1978; Krishnaswami & Lal, 1978), ya que permite conocer la edad de sedimentos en una escala temporal de aproximadamente 100 a 150 años, para lo cual se requiere conocer adicionalmente el contenido de ^{226}Ra , que es el isótopo que lo produce por decaimiento radioactivo (Krishnaswami & Lal, 1978; Luque Marín, 2003).

Basado en lo anterior es que Codelco solicitó realizar un estudio científico que pudiese evaluar metodológicamente la capacidad de detección del periodo de afectación, por lo que SMI-ICE-Chile de la Universidad de Queensland junto a la Universidad de Concepción proponen el “Estudio de Análisis Forense de la vegetación azonal hídrica terrestre del sector del Salar de Pedernales” (desde ahora, el Proyecto), para así determinar la data y dinámica de muerte de los SVAHT a lo largo de una gradiente, donde se distinguen a lo menos tres zonas: i) una primera zona, el SVAHT activo, donde actualmente hay presencia de vegetación viva y activa, ii) una zona intermedia o zona de transición, que presenta vegetación con disminución en la vigorosidad, y, iii) una tercera zona, el SVAHT inactivo, con vegetación muerta. Lo anterior, con el objetivo de determinar y caracterizar el contenido de ^{210}Pb en plantas vivas y muertas del Área de Estudio, además de muestras de suelo.

En el Proyecto se encuentran representados algunos de los compromisos globales manifestados por Naciones Unidas en su Agenda 2030, que compromete 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), por lo que también constituyen un marco referencial para esta medida complementaria del Avenimiento y Transacción, por su contribución a las metas especificadas en la Figura 1.

Figura 1. ODS y su relación con El Estudio de Análisis Forense del SVAHT.

ODS		CONTRIBUCIÓN DEL PROYECTO
<p>4 EDUCACIÓN DE CALIDAD</p>	<p>ODS 4 EDUCACIÓN DE CALIDAD</p>	<p>A través de la publicación y difusión de la metodología y resultados del estudio científico, se espera promover la educación para el desarrollo sostenible y disminuir la actual brecha de conocimiento de los humedales altoandinos.</p>
<p>6 AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO</p>	<p>ODS 6 AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO</p>	<p>A través de decisiones basadas en conocimiento científico, se pueden proteger ecosistemas relacionados con el agua, tal como los humedales altoandinos y a su vez, fortalecer la participación de la industria y las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua.</p>
<p>13 ACCIÓN POR EL CLIMA</p>	<p>ODS 13 ACCIÓN POR EL CLIMA</p>	<p>El conocimiento científico contribuye directamente a la mejora en la restauración y gestión de los humedales altoandinos, los cuales son considerados uno de los ecosistemas más importantes para hacer frente al cambio climático, debido a su capacidad de secuestro de carbono.</p>
<p>15 VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES</p>	<p>ODS 15 VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES</p>	<p>A través del estudio científico de la dinámica de muerte de los sistemas vegetacionales, se contribuye a prevenir, detener y revertir la degradación de los humedales altoandinos.</p>
<p>17 ALIANZAS PARA LOGRAR LOS OBJETIVOS</p>	<p>ODS 17 ALIANZAS PARA LOGRAR LOS OBJETIVOS</p>	<p>Se promueven alianzas estratégicas con instituciones académicas y la industria, buscando promover compromisos para la acción y recuperación de las áreas afectadas.</p>

Fuente: Elaboración propia (2022).

En el presente informe se entregan los avances relacionados al Proyecto en el periodo que comprende el 01 de abril de 2022 y el 30 de abril de 2023. Se detallan el progreso y las entregas realizadas a la fecha, las campañas de terreno llevadas a cabo, la toma de muestras vegetales y de suelo, su preparación y análisis en búsqueda del radionúclido ^{210}Pb , junto con los resultados obtenidos y las actividades restantes, que complementarán lo reunido a la fecha (Tabla 1).

De momento, los resultados no han mostrado un patrón claro entre los sectores diferenciados del SVAHT para la misma estación, pudiendo sí detectar una diferencia estacional en los valores promedio de actividad de ^{210}Pb entre las plantas del SVAHT activo, con mayor actividad, del inactivo. También se identificó mayor actividad de este radionúclido en la raíz que en el resto de los órganos medidos (tallo y hojas).

Debido a la falta de un patrón claro y decidor, se propone complementar las mediciones realizadas a la fecha con mediciones del radionúclido de ^{226}Ra y Pb no radioactivo, lo que podría permitir identificar diferencias entre los sectores bajo estudio.

Tabla 1. Carta Gantt del Análisis Forense.

Actividad	2021			2022						2023														
	Semestre 2			Semestre 1			Semestre 2			Semestre 1			Semestre 2											
	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S
Ejecución de estudio																								
Revisión y análisis de literatura especializada																								
Visita terreno de reconocimiento																								
Fase 1: Diseño de muestreo y campaña de terreno																								
Campaña 1- Otoño																								
Campaña 2- Primavera																								
Fase 2: Análisis de laboratorio																								
Análisis de radionúclidos Campaña 1																								
Análisis de radionúclidos Campaña 2																								
Fase 3: Procesamiento de la información (Intervalo Post mortem)																								
Fase 4: Reporte Anual de actividades con avances correspondientes																								
Informe final con resultados del Estudio Forense (al final del estudio)																								
Preparación de manuscrito																								
Publicación de principales resultados en revista WOS/Scopus																								
Elaboración y entrega de información para página web																								
Informe de gestión realizada																								

Fuente: Elaboración propia (2023).

1.2 Indicadores de cumplimiento

1.2.1 Avance físico general

En la Tabla 2 y Figura 2 se pueden observar los avances físicos estimados según las actividades del Proyecto. En general, para todas las actividades se ha cumplido con el avance proyectado. Las actividades de Revisión y análisis de literatura especializada, la Visita terreno de reconocimiento, la Fase 1: Diseño de muestreo y campaña de terreno, Campaña 1 y 2 – de Otoño y Primavera respectivamente, la Fase 2: Análisis de laboratorio y la Campaña 1 de Análisis de radionúclidos presentan un avance del 100% y cumplidas a la fecha, mientras que la Campaña 2 de Análisis de radionúclidos está en sus últimas etapas de desarrollo, solo restando los análisis y resultados de las muestras obtenidas en la campaña 2 de terreno, del SVAHT activo del Salar.

Tabla 2. Avance físico de Análisis Forense del SVAHT.

Actividad	Avance Proyectado al 30-04-2023	Avance Real al 30-04-2023
Ejecución de estudio	76%	81%
Revisión y análisis de literatura especializada	76%	100%
Visita terreno de reconocimiento	100%	100%
Fase 1: Diseño de muestreo y campaña de terreno	100%	100%
Campaña 1- Otoño	100%	100%
Campaña 2- Primavera	100%	100%
Fase 2: Análisis de laboratorio	100%	100%
Análisis de radionúclidos Campaña 1	100%	100%
Análisis de radionúclidos Campaña 2	100%	95%
Fase 3: Procesamiento de la información (Intervalo Post mortem)	50%	90%
Fase 4: Reporte Anual de actividades con avances correspondientes	83%	100%
Informe final con resultados del Estudio Forense	0%	45%
Preparación de manuscrito	40%	35%
Publicación de principales resultados en revista WOS/Scopus	0%	10%
Elaboración y entrega de información para página web	73%	70%
Informe de Gestión Mensual	76%	77%
Avance físico Análisis Forense	73%	82%

Fuente: Elaboración propia (2023).

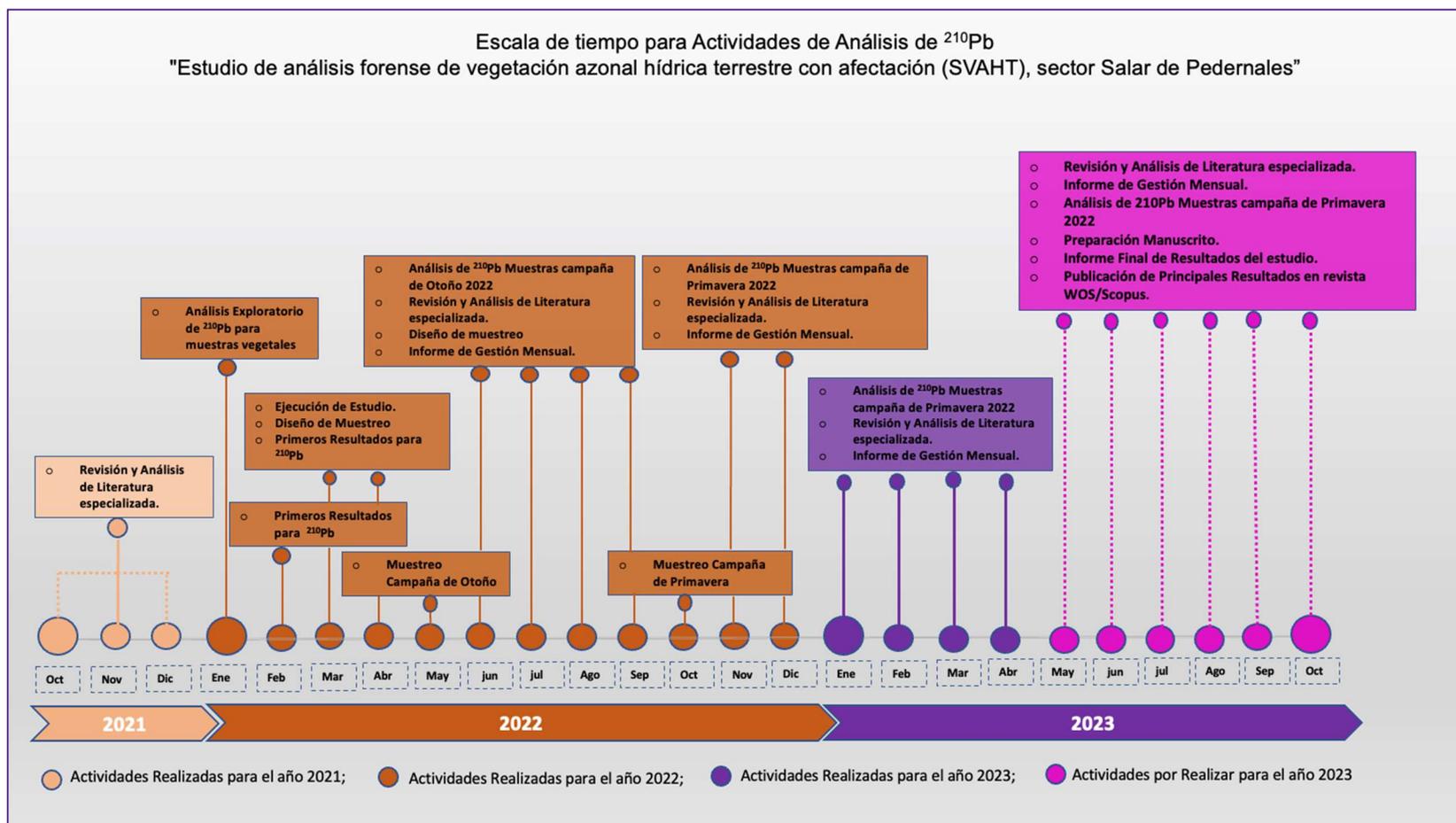


Figura 2. Avance físico de Análisis Forense del SVAHT y etapas restantes.

1.2.2 Entregables a la fecha

Basados en la programación, los documentos entregados a la fecha corresponden a los informes de gestión mensual, hasta abril de 2023, junto con el informe de gestión anual 2022, entregado en abril del año pasado. También se dio cumplimiento con el programa de muestreo, la que consideró las 2 campañas, realizadas en abril de 2022 (otoño) y octubre del mismo año (primavera), actividades que se reportaron en los informes mensuales y en el presente compilado anual (Tabla 3).

Tabla 3. Documentos entregados a la fecha y por entregar Análisis Forense

Estado	Nombre documento	Detalles
Entregados a la fecha	Informes de Gestión	Informes de gestión mensual: abr 22, may 22, jun 22, jul 22, ago 22, sep 22, oct 22, nov 22, dic 22, ene 23, feb 23, mar 23 abr 23.
		Informe de gestión anual 2022, resultados parciales
	Programa de muestreo	Campaña 1 de otoño 2022
		Campaña 2 de primavera 2022
En proceso	Informe Final	Resultados y conclusiones del estudio forense
	Manuscrito y publicación, información para página web	Artículo y video

Fuente: Elaboración propia (2023).

1.2.3 Próximas actividades

1.2.3.1 Fase 3: Procesamiento de la información (Intervalo Post mortem) y mediciones adicionales

Obtenidos todos los datos, resultados y análisis provenientes de las muestras, se finalizará con la Fase 3, donde se evaluará la información recabada y se definirá su utilidad para la determinación del intervalo post mortem, obteniendo con esto, la data de muerte de los sectores evaluados. Esto será complementado con las mediciones adicionales (i.e ^{226}Ra y Pb) sugeridas en el apartado de Discusión del presente reporte.

1.2.3.2 Informe final y publicaciones asociadas

A la fecha del presente informe de gestión anual, se encuentran pendientes los análisis y resultados de las lecturas de ^{210}Pb de las muestras obtenidas en la campaña 2 del SVAHT activo del Salar. Estos serán incluidos en el informe final.

Durante el periodo informado se ha continuado con la revisión bibliográfica sobre el tema asociado al Proyecto, principalmente orientado al uso de elementos radioactivos naturales de la serie del ^{238}U como herramienta forense, continuando con los lineamientos que deben ser incluidos en la introducción del



artículo científico y la descripción detallada de la metodología de tratamiento, depositación y lectura de las muestras desarrollada durante esta investigación, todo lo cual también será considerado en el informe final comprometido.

2. Introducción

El Pb radioactivo tiene un total de 49 isotopos, de los cuales, solo 3 son estables (i.e., ^{206}Pb , ^{207}Pb y ^{208}Pb), siendo el resto radioactivos, con vidas medias de algunos milisegundos (i.e., ^{218}Pb , 45 ms) a años (i.e., ^{210}Pb , 22,3 años). Todos estos isotopos de Pb son continuamente producidos, porque provienen de las series de decaimiento del U y Th, y, por lo tanto, se encuentran presente en el ambiente en forma permanente (Kulahcı, 2020). Debido a esto, el ^{210}Pb está presente en el suelo producto del decaimiento de su padre ^{226}Ra (vida media 1600 años), a través de su hija ^{222}Rn (vida media 5 días), que es gaseoso y 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 por precipitaciones, por lo que existe un flujo continuo de este radionúclido a la superficie del suelo.

Las plantas en el suelo pueden incorporar este radionúclido de una manera similar como lo hacen con el Pb estable, ya que el Pb radiactivo se comporta químicamente como el Pb no radioactivo, es decir, se puede disolver, adsorber, precipitar, absorber, entre otros, usando para ello los mismos mecanismos fisiológicos que para el Pb no radioactivo. Esto significa que el ^{210}Pb se puede encontrar presente en una gran variedad de plantas y ambientes.

La cuantificación de ^{210}Pb se puede hacer mediante espectroscopia alfa, utilizando la hija ^{210}Po , que tiene una vida media de 138,4 días, lo cual significa que este elemento radioactivo alcanza equilibrio secular a los 1,89 años con su padre ^{210}Pb . Para muestras sólidas, generalmente se utiliza un ataque ácido para disolver el material, y luego, depositación en discos de plata. En el caso de muestras biológicas, como tejidos vegetales, generalmente se realiza un lavado con un sonicador (Ibrahim and Whicker, 1987), secado y una digestión ácida que puede utilizar HCl, HF, HNO_3 y HClO_4 , y también H_2O_2 , para eliminar la materia orgánica (Murray-Mathew *et al.*, 2007; Persson 2014). Posteriormente, el ^{210}Po es depositado espontáneamente en discos de plata pura, y la actividad presente en la solución ácida se cuantifica en un espectrómetro alfa, ubicando el peak a 5,3 MeV en el espectro de decaimiento alfa (Murray-Matthews *et al.* 2007).

En el presente informe de gestión anual 2023 (periodo abril de 2022 a abril de 2023) de la medida complementaria “Estudio de análisis forense de la vegetación azonal hídrica terrestre con afectación (SVAHT), sector Salar de Pedernales”, se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de ^{210}Pb realizadas en muestras de plantas, suelo, y sales, recolectadas en las campañas de terreno de otoño y primavera, realizadas en abril y octubre del año 2022, respectivamente.

3. Objetivos

Se consideran los siguientes objetivos:

- Desarrollar y ejecutar una metodología de preparación de las muestras vegetales para la determinación de ^{210}Pb .
- Determinar el contenido de ^{210}Pb en plantas del SVAHT del Salar de Pedernales (SVAHT activo e inactivo).

4. Material y métodos

4.1 Área de Estudio

El Área de Estudio corresponde al SVAHT inactivo del Salar de Pedernales, denominado como zona inactiva en el Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Rajo Inca (RCA 19/2020). Esta área corresponde al polígono definido como SVAHT inactivo en la Figura 3, el cual constituye una superficie de aproximadamente 76 ha (Tabla 4), donde existió vegetación de tipo azonal activa. La Figura 3 también muestra la ubicación del denominado SVAHT activo, donde en la actualidad se encuentra la vegetación activa remanente del SVAHT, junto con una zona indicada como de transición, inserta entre las otras dos condiciones.

Las campañas de terreno 1 y 2 consideraron el muestreo de los SVAHT activo, inactivo y zona de transición del Salar de Pedernales.

Tabla 4. Superficie del Área de Estudio

Sector	Superficie (ha)
SVAHT activo	37
SVAHT inactivo	76
Total	113

Fuente: Elaboración propia (2023).

Las fotografías de la Figura 4 muestran la condición representativa de la vegetación en el SVAHT inactivo, mientras que la Figura 5 y la Figura 6 hacen lo mismo para los sectores SVAHT activo y Zona de transición, respectivamente.



Figura 4. Salar de Pedernales, SVAHT inactivo (A1 y A2).

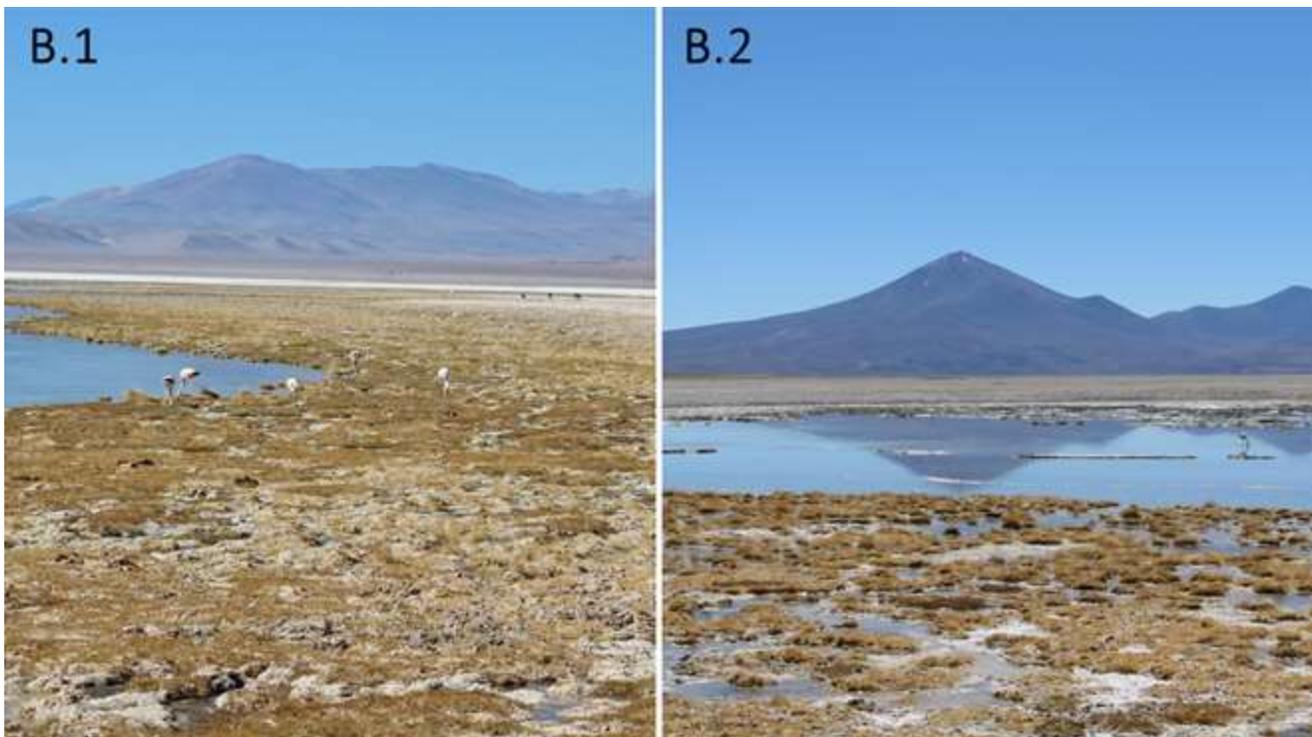


Figura 5. Salar de Pedernales, SVAHT activo (B1 y B2).

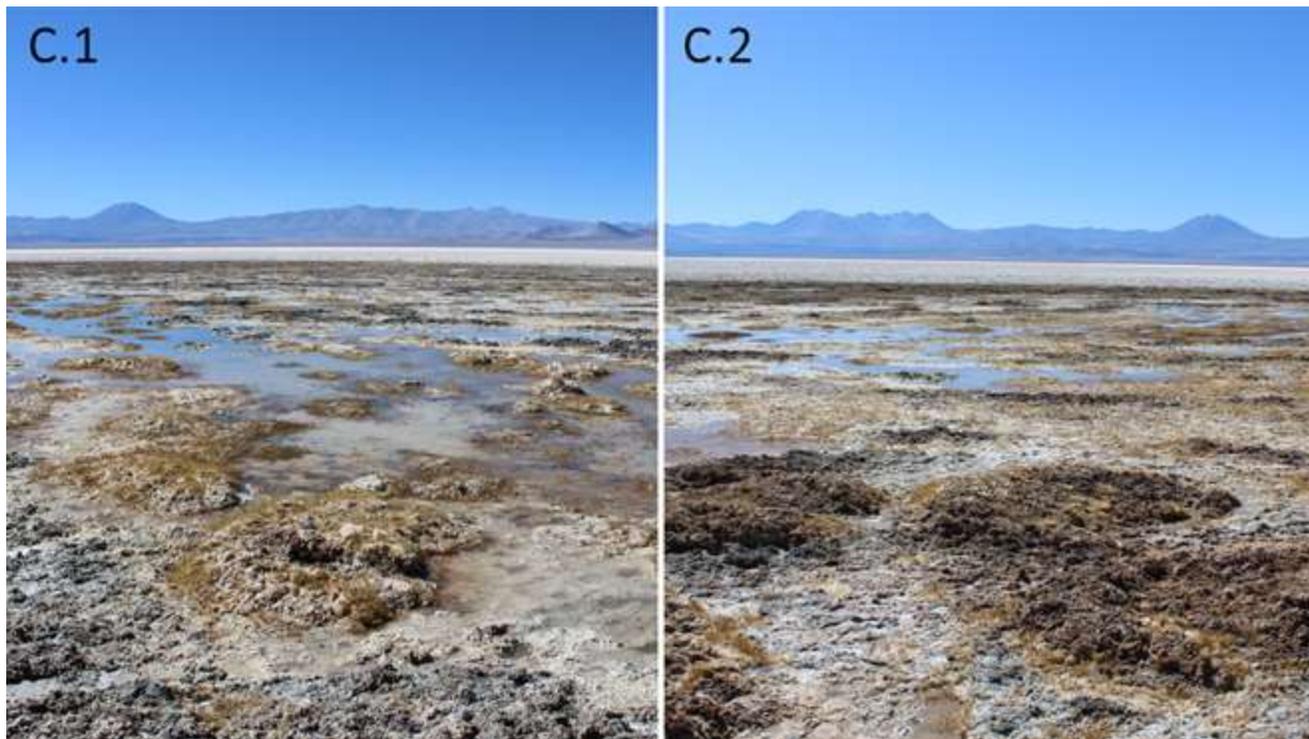


Figura 6. Salar de Pedernales, SVAHT de la Zona de transición (C1 y C2).

4.2 Metodología

En este punto se describe tanto la metodología del muestreo llevado a cabo en las campañas de terreno 1 y 2, de otoño y primavera, como el tratamiento realizado a las muestras en laboratorio, para la obtención de lecturas del radionúclido ^{210}Pb .

4.2.1 Muestreo en terreno

Se realizaron dos campañas de muestreo en estaciones contrastantes (otoño y primavera), para verificar si existe variedad intra-anual en el contenido de ^{210}Pb en las plantas del SVAHT del Salar de Pedernales. Durante la segunda campaña, realizada en octubre de 2022, se contó con la participación de integrantes de la comunidad indígena Colla Geoxcultuxial, quienes acompañaron al equipo de terreno en las labores de muestreo y les plantearon preguntas con respecto al estudio, que fueron abordadas por el equipo científico. Con respecto a las labores de terreno, se extrajeron muestras vegetales completas (raíces y parte aérea) de individuos vivos del SVAHT activo. A la vez, se extrajeron plantas de la Zona de Transición, la que presenta vegetación de vigorosidad disminuida, y restos de plantas muertas en la zona de rastrojos y mantillo del SVAHT inactivo (Figura 3). Adicionalmente, se recolectaron muestras de suelo en cada punto de muestreo.

Todas las muestras fueron almacenadas en bolsas de polietileno individuales, etiquetadas y enviadas al Laboratorio de Radioquímica Ambiental de la Universidad de Concepción.

La metodología de muestreo de plantas y suelo consistió en el uso de cuadrantes de 1 m^2 divididos en subcuadrantes de $20 \times 20\text{ cm}$, como se muestra en la Figura 7. El procedimiento consistió en colocar un cuadrado sobre la vegetación para extraer una muestra en triplicado desde el cuadrante de muestreo.



Figura 7. Cuadrante de muestreo.

4.2.2 Preparación de muestras y lectura de ^{210}Pb

Las muestras recolectadas fueron analizadas para el radionúclido ^{210}Pb en el Laboratorio de Radioquímica Ambiental del Laboratorio Oceanografía Química de la Universidad de Concepción. Se utilizó la técnica de Espectrometría Alfa con un procedimiento previo, o pretratamiento, desarrollado en el año 2021 e inicios del año 2022, a detallar a continuación.

4.2.2.1 Pretratamiento

Las muestras de tejidos vegetales (vivos y muertos) fueron sonicadas por 30 minutos para remover todas las partículas de suelo y sal adheridas a la superficie. Posteriormente, las muestras fueron lavadas individualmente con agua ultrapura Tipo II, lavado que se repitió hasta obtener un agua de lavado translúcida. A continuación, estas muestras fueron sometidas a un proceso de secado por liofilización. Finalizado el proceso de liofilización, las muestras fueron divididas por tejidos (raíz, hojas y tallos, de ser posibles de diferenciar).

4.2.2.1 Digestión ácida y Depositación

Sobre las muestras vegetales se practicó un ataque ácido utilizando una mezcla de H_2O_2 , HNO_3 y HCl , con el objetivo de disolver completamente los tejidos de las muestras, permitiendo obtener una solución homogénea que contiene el radionúclido ^{210}Pb . La solución resultante se depositó en placas de plata (Ag) y se procedió al conteo durante 24 horas en un espectrómetro alfa.

El agua de lavado obtenida en el pretratamiento de las muestras vegetales se sometió a calor en una estufa a una temperatura controlada de 35°C, permitiendo que esta se evapore por completo. De esta manera, se obtuvieron muestras de suelo a partir del residuo sólido resultante.

Para el análisis de estas 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 de 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. 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 (Al-Masri *et al.* 2015), lo que resulta crucial para obtener resultados precisos y confiables en la determinación del radionúclido ²¹⁰Pb presente en la planta.

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. Esta separación se realizó utilizando la misma agua de lavado aplicada a las muestras vegetales, siguiendo un procedimiento específico desarrollado durante este estudio, protocolo establecido en el Informe de avance del mes de agosto de 2022. Luego, se colocó 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 determinado para disolver por completo la sal presente en la mezcla (Figura 9).

Después de finalizar el proceso de agitación, las muestras se dejaron en reposo para permitir que todo el material particulado decantara. Una vez decantado el material, toda el agua que contenía la sal disuelta se transfirió a un vaso precipitado. Esta agua fue evaporada, obteniendo finalmente la sal disuelta, que estaba presente en la muestra original. Por otro lado, el suelo que decantó fue secado en una estufa a una temperatura controlada, obteniendo finalmente el suelo presente en la muestra original (Figura 9).

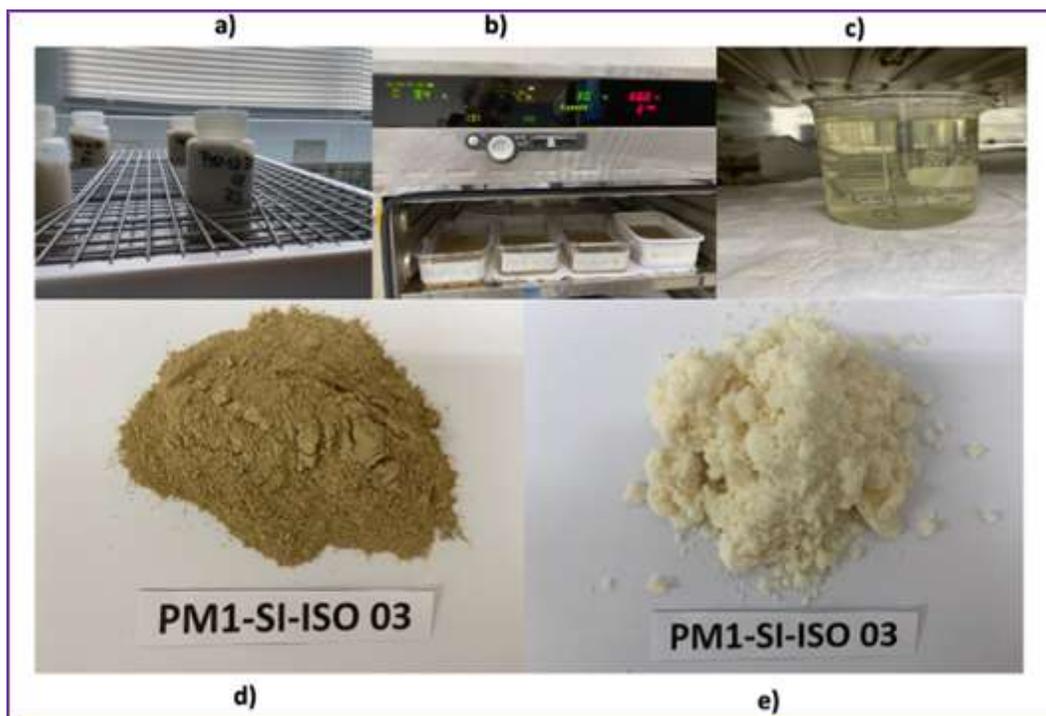


Figura 8. Proceso de separación de sal y suelo. a) Muestra en oscilación, b) secado del material decantado, c) evaporación de agua con sal disuelta en ella, d) muestra de suelo recuperado e) muestras de sal recuperada.

Finalmente, 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 precisas de ^{210}Pb . Tanto las muestras de suelo como las de sal obtenidas fueron utilizadas de la misma manera para realizar las lecturas de ^{210}Pb .

4.2.2.2 Lectura de ^{210}Pb

Las placas obtenidas del proceso de depositación fueron etiquetadas y llevadas a lectura en Espectrómetro Alfa marca CANBERRA's Modelo 7200-08, equipado con 8 cámaras de conteo y detectores PIPS para radionúclidos emisores alfa (Figura 9). El tiempo de conteo por muestra fue de 24 horas, donde se registró su número de cuentas e integrales, tanto de la muestra, como del trazador interno.



Figura 9. Espectrómetro Alfa. Sistema de cuantificación de radionúclidos.

5. Resultados

En general, los resultados muestran que las plantas del sector inactivo del Salar de Pedernales presentaron menor actividad de ^{210}Pb que las plantas del sector activo del Salar (Tabla 5). Por ejemplo, la actividad promedio de ^{210}Pb en otoño en el SVAHT inactivo fue de 1,88 Bq/kg, mientras que en el SVAHT activo alcanzó los 3,92 Bq/kg en la misma estación. Este contraste también se observa entre estaciones, registrando diferencias de un 52% en otoño y de 12,7% en primavera entre el sector inactivo y el intermedio (las actividades de primavera del sector activo se encuentran en la etapa de lectura). Esto sugiere que podría haber diferencias estacionales en el contenido de ^{210}Pb , a la espera de la confirmación del análisis de las muestras del sector activo.

Tabla 5. Estadística básica de resultados de lecturas de ^{210}Pb (Bq/kg) en muestras de plantas colectadas en el año 2022.

Campaña	SVAHT	Promedio	Desv Est.	Max	Min
Otoño	Inactivo	1,88	0,65	2,37	0,92
	Transición	3,19	1,14	4,19	1,94
	Activo	3,92	1,3	4,97	3,13
Primavera	Inactivo	3,30	0,35	3,83	2,73
	Transición	3,78	2,02	6,87	1,9
	Activo	*	*	*	*

*no se presentan resultados, ya que las muestras aún están siendo analizadas. Fuente: Elaboración propia (2023).

Además, se detectó que existen diferencias en la actividad del ^{210}Pb entre los tejidos de la planta (i.e., raíz, hoja o tallo). En el caso de las especies que se ha logrado identificar, tales como *Zameioscirpus atacamensis* y *Puccinellia frigida*, la mayor actividad fue detectada en las raíces (Tabla 6 y Figura 10).

Tabla 6. Actividad de ^{210}Pb según la estructura de las muestras analizadas para *Zameioscirpus atacamensis* y *Puccinellia frigida* en muestras colectadas en el año 2022.

Identificación muestra	Nombre	Órgano/Estructura	Masa de muestra (g)	Actividad ^{210}Pb (Bq/Kg)
PM3-SA-ISO-za-01	<i>Zameioscirpus atacamensis</i>	Raíz	0,5028	6,87
		Tallo	0,5395	1,76
		Hojas	0,5168	1,43
PM3-SA-ISO-pf-01	<i>Puccinellia frigida</i>	Raíz	0,5544	4,97
		Hojas	0,5913	1,14

Fuente: Elaboración propia (2023).

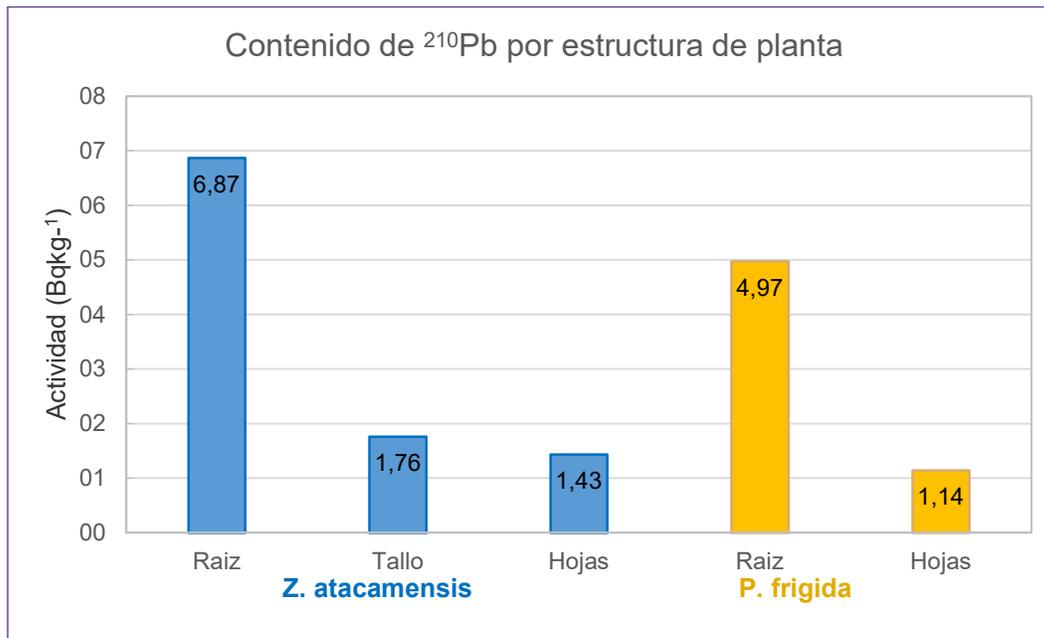


Figura 10. Contenido de ^{210}Pb en raíces, tallos y hojas.

6. Discusión

Las diferencias detectadas en la actividad del ^{210}Pb entre los tejidos de la planta resulta relevante, ya que lo que se analiza es la planta completa (raíz + hoja + tallo), es decir, se mezcla tejido con menor actividad de ^{210}Pb (tallo y hojas) con tejido donde se concentra mayor actividad (raíz), lo cual resulta en una dilución de la señal.

Si bien, los resultados arrojan diferencias en la actividad promedio de ^{210}Pb entre muestras del SVAHT activo e inactivo tomadas en la misma estación (otoño), es necesario obtener y analizar los datos pendientes del sector activo de las muestras de primavera para corroborar esa diferencia.

A la fecha del presente informe anual, sólo resta por realizar las lecturas de ^{210}Pb de las muestras tomadas en noviembre de 2022 en el SVAHT activo, por lo que prontamente se completarán todas las actividades y mediciones en las plantas, suelo y sales provenientes del lavado de las muestras vegetales en el tratamiento inicial de preparación de las muestras del Salar. Dado que no aún no se ha observado un patrón consistente de abundancia de radionúclidos de ^{210}Pb , es necesario cuantificar la presencia de otro radionúclido, i.e., ^{226}Ra , en la solución ácida remanente de la disolución de las muestras de tejido vegetal seleccionadas, para evaluar en estas la razón $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$. Este es un indicador del grado de desequilibrio radioactivo entre la hija ^{210}Pb , con vida media de 22,3 años y el padre ^{226}Ra , con vida media de 1600 años. Debido a las diferencias de vidas medias, este equilibrio se rige por el equilibrio secular entre ambos radionúclidos, el cual es función del tiempo transcurrido para que este decaimiento ocurra. Finalmente, para verificar el comportamiento de las plantas respecto a la absorción de Pb, se medirá en muestras seleccionadas Pb no radioactivo, para evaluar si existen diferencias entre los distintos sectores estudiados en el SVAHT del Salar de Pedernales, considerando



el mismo criterio que para el ^{210}Pb , es decir, esperando en el SVAHT inactivo una menor presencia de Pb respecto al SVAHT activo.

7. Listado de profesionales del Proyecto

Nombre	Institución	Rol
Dr Felipe Saavedra	SMI-ICE-Chile	Investigador y Gerente de Proyecto
Daniela Gamboa	SMI-ICE-Chile	Coordinadora de Proyecto
Dr Marco Salamanca	Universidad de Concepción	Director Científico
Marcos Hidalgo	Universidad de Concepción	Investigador
Dr David Rubinos	SMI-ICE-Chile	Investigador ambiental senior
Jorge Márquez	SMI-ICE-Chile	Analista espacial
MSc Pablo Bustos	SMI-ICE-Chile	Investigador
MSc María Paz Valenzuela	SMI-ICE-Chile	Investigadora
Dilan Campos	SMI-ICE-Chile	Asistente de investigación - Geología
Daniela Bonacic	SMI-ICE-Chile	Gerente de relaciones externas y divulgación
AIRE Consultores	AIRE Consultores	Coordinación Diseño Gráfico
AVIC Producciones	AVIC Producciones	Coordinación Producción Audiovisual
Dr Jacques Wiertz	SMI-ICE-Chile	Hidrogeólogo senior

8. Referencias

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).

Flynn, W.W. (1968). The determination of low levels of polonium-210 in environmental materials. *Analytica Chimica Acta*, 43, 221-227. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)89210-7](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)89210-7).

Graustein, W.C., Turekian, K.K. (1996). ^7Be and ^{210}Pb indicate an upper troposphere source for elevated ozone in the summertime subtropical free troposphere of the Eastern North Atlantic. *Geophysical Research Letters*. 23, 539–542. <https://doi.org/10.1029/96GL00304>.

Külahcı, Fatih 2020. Environmental Distribution and Modelling of Radioactive Lead (210): A Monte Carlo Simulation Application (2020) In: Lead in Plants and the Environment (Dharmendra K. Gupta • Soumya Chatterjee Clemens Walther Editors. Radionuclides and Heavy Metals in the Environment Series Editors: (D. K. Gupta, C. Walther). Springer 15-32.

Horvatinčić, N., Barešić, J., Babinka, S., Obelić, B., Krajcar Bronić, I., Vreča, 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>.

Ibrahim A. and f. W. Whicker. (1987). Plant accumulation and plant/soil concentration ratios of ^{210}Pb and ^{210}Po at various sites within a uranium mining and milling operation s. *Environmental and Experimental Botany*, 27(2),203-213.

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, J. A. (2003). El lago de Sanabria: un sensor de las oscilaciones climáticas del Atlántico Norte durante los últimos 6000 años [Tesis de doctorado en ciencias geológicas, Universitat de Barcelona]. <http://hdl.handle.net/10803/1971>.

Al-Masri, M.S., 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.

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.

Murray -Matthewsa K., Chang-Kyu Kimb , Paul Martinb. (2007). Determination of ^{210}Po in environmental materials: A review of analytical methodology. *Applied Radiation and Isotopes*, 65: 267–279.

Persson B. (2014). ^{210}Po and ^{210}Pb in the Terrestrial Environment. Current Advances in Environmental Science (CAES) CAES Volume 2, Issue 1 Feb. 2014 PP. 22-37 www.caes.org ©C American V-King Scientific Publishing.

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" *Dissostichus 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.

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.