

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

Mayo 2022

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

Informe Anual de Gestión

Mayo 2022

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.

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 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 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.

Palabras del Gerente de Proyecto

La visión del Sustainable Minerals Institute (SMI) es encontrar soluciones a los problemas complejos –específicamente vinculados al medio ambiente, las personas y la economía– en el camino hacia la sostenibilidad de la industria de los recursos minerales. El Centro de Excelencia Internacional, SMI-ICE-Chile, está generando cambios a través de la investigación aplicada de alto impacto junto a socios estratégicos en Chile y en el extranjero, e incorporando estándares internacionales en materia de sostenibilidad.

Durante el primer periodo de trabajo en la **medida complementaria “Estudio de análisis forense de la vegetación azonal hídrica terrestre con afectación (SVAHT), sector Salar de Pedernales”** hemos abordado los desafíos y oportunidades de manera colaborativa y con una rigurosa disciplina de trabajo científico.

El objetivo de este estudio es determinar la data y dinámica de muerte de los SVAHT con afectación observable en el Salar de Pedernales, dando cumplimiento a lo indicado en el Avenimiento y Transacción entre el Consejo de Defensa del Estado (CDE) y Codelco. Para esto, primero necesitábamos validar la metodología de determinación de ^{210}Pb propuesta. Viajamos al Salar de Pedernales y sus alrededores en noviembre del 2021 para recolectar material vegetal. Con ello elaboramos distintos protocolos de limpieza y preparación de muestras, para luego determinar la actividad de ^{210}Pb . A la fecha, hemos sido capaces de detectar el radioisótopo natural ^{210}Pb en material vegetal vivo y muerto de manera consistente, lo cual nos permite validar la factibilidad de utilizar el ^{210}Pb como geocronómetro para los fines de este estudio forense.

Los investigadores de este Proyecto sentimos un profundo orgullo de ser parte de este innovador e importante estudio, ya que la metodología desarrollada podría ser utilizada en futuros casos de ciencia forense ambiental en Chile. Esta metodología podría permitir la datación de daños encontrados en otros ecosistemas, sean por efecto de contaminación y/o gestión inadecuada de los recursos hídricos. Además, apoyaría una toma de decisiones más informada y la adopción temprana de medidas preventivas. Agradezco a nuestros colaboradores y socios por su dedicación, esfuerzo y entrega para asegurar el desarrollo exitoso de este estudio. Su trabajo representa nuestro compromiso y esfuerzo con los más altos estándares de calidad.



Dr Felipe Saavedra
Gerente de Proyecto
SMI-ICE-Chile

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.....	5
1.2.3	Próximas actividades	5
2.	Introducción	6
3.	Objetivos.....	7
4.	Material y métodos.....	7
4.1	Área de Estudio.....	7
4.2	Metodología	9
4.2.1	Preparación de muestras	9
5.	Resultados preliminares.....	13
6.	Listado de profesionales del Proyecto	17
7.	Referencias.....	18

Tablas

Tabla 1.	ODS y su relación con El Estudio de Análisis Forense del SVAHT.	2
Tabla 2.	Avance físico de Análisis Forense del SVAHT.	4
Tabla 3.	Documentos entregados a la fecha y por entregar Análisis Forense	5
Tabla 4.	Superficie del Área de Estudio	7
Tabla 5.	Muestras recolectadas.	9
Tabla 6.	Lecturas ²¹⁰ Pb en material vegetal muerto.	14
Tabla 7.	Lecturas ²¹⁰ Pb en material vegetal vivo.	15
Tabla 8.	Tabla comparativa de contenidos de ²¹⁰ Pb en diferentes especies de plantas. Se han incorporado las mediciones preliminares en plantas vivas y muertas recolectadas en el Salar de Pedernales y sus alrededores.	16

Figuras

Figura 1. Carta Gantt del Análisis Forense.....	3
Figura 2. Área de Estudio Análisis Forense SVAHT.....	8
Figura 3. Muestras de material vegetal muerto	10
Figura 4. Muestras de material vegetal vivo.	11
Figura 5. Muestras divididas por tejidos para la determinación de ²¹⁰ Pb. (a) Muestra MH08 (Material muerto) y (b) muestra L26 Poa 4 Pastos Largos (Material vivo).....	12
Figura 6. Espectrómetro Alfa. Sistema de cuantificación de radionúclidos.	13

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 (DS), 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.

Durante la visita técnica realizada al Salar junto al Primer Tribunal Ambiental, se estableció como parte de las interrogantes la definición de la época en que podría haberse producido la afectación de las estructuras vegetales que existían en forma de rastrojo en la zona del SVAHT inactivo del Salar de Pedernales. Dado que en la actualidad no existen metodologías que permitan estimar el tiempo aproximado de afectación de dicha vegetación o cualquier tipo en sistemas salinos, se ha sugerido el desarrollo de metodologías que contemplen el uso de radionúclidos naturales de la serie ^{238}U o ^{210}Pb , u otra técnica aplicable para estimar la fecha de muerte de la porción con afectación del SVAHT.

Los radionúclidos han sido utilizados ampliamente como geocronómetros de distintos procesos que ocurren en el ambiente, debido principalmente a sus propiedades de decaimiento radioactivo a una tasa conocida, y también por tener un comportamiento físico-químico como cualquier elemento (pueden participar en reacciones de precipitación, disolución, absorción, adsorción, ingestión, acumulación, depositación, etc.), lo que hace que estén presentes en todos los componentes de un ecosistema y en todas las matrices ambientales.

En escalas de tiempo moderno, es decir, en muestras cuya edad no supere los 150 años, el ^{210}Pb (Laissaoui A. et al., 2008, Ziad et al., 2012) ha sido ampliamente usado como geocronómetro en investigación ambiental, ya que posee una vida media de 22,3 años. Así, este radionúclido se ha usado 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 (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 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, lo cual requiere conocer adicionalmente el contenido de ^{226}Ra , que es quien lo produce por decaimiento radioactivo (Krishnaswami & Lal, 1978; Luque Marín, 2003).

Es bajo esta premisa, que Codelco-DS solicita realizar un estudio científico que pudiese evaluar metodológicamente la capacidad de detección del periodo de afectación, mediante un 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 donde actualmente hay presencia de vegetación viva y activa, ii) una zona intermedia que presenta vegetación con disminución

en la vigorosidad y iii) zona con vegetación muerta, determinando y caracterizando 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 las metas especificadas en la Tabla 1.

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

ODS		CONTRIBUCIÓN DEL PROYECTO
	ODS 4 EDUCACIÓN DE CALIDAD	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.
	ODS 6 AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO	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.
	ODS 13 ACCIÓN POR EL CLIMA	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.
	ODS 15 VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES	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.
	ODS 17 ALIANZAS PARA LOGRAR LOS OBJETIVOS	Se promueven alianzas estratégicas con instituciones académicas y la industria, buscando promover compromisos para la acción y recuperación de las áreas afectadas.

Fuente: Elaboración propia (2022).

En el presente informe se da cuenta de los avances relacionados al Proyecto en el periodo contemplado desde su inicio el 01 de octubre de 2021 hasta el 31 de marzo de 2022, donde el hito más destacado es la validación de la metodología propuesta, ya que se logró determinar ^{210}Pb en muestras de plantas vivas y muertas del Salar de Pedernales y quebradas aledañas, recolectadas en la Campaña de terreno realizada en noviembre de 2021.

Estos resultados preliminares, enmarcados en la Fase 1 de desarrollo y validación de la metodología de preparación de muestras y determinación de ^{210}Pb , confirman la hipótesis de que este radionúclido puede ser detectado en plantas vivas y muertas. Actualmente, se sigue mejorando la metodología de preparación de las muestras vegetales para la determinación de ^{210}Pb .

Figura 1. Carta Gantt del Análisis Forense

Actividad	2021			2022									2023													
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	
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																										
Preparación de manuscrito																										
Publicación de principales resultados en revista WOS/Scopus																										
Elaboración y entrega de información para página web																										
Informe de Gestión Mensual																										

1.2 Indicadores de cumplimiento

1.2.1 Avance físico general

En la Tabla 2, se pueden observar los avances físicos estimados según las actividades del Proyecto. En general, se ha cumplido con el avance proyectado ya que, si bien la etapa de diseño de muestreo y validación de la metodología se encuentra en desarrollo, se ha avanzado con la revisión de bibliografía especializada y análisis de laboratorio para las muestras recolectadas en la campaña de noviembre/diciembre de 2021, insumos importantes para la obtención de los resultados parciales mostrados en este Informe y la validación de la metodología.

Tabla 2. Avance físico de Análisis Forense del SVAHT.

Actividad	Avance Proyectado al 31-03-2022	Avance Real al 31-03-2023
Ejecución de estudio	24%	25%
Revisión y análisis de literatura especializada	24%	40%
Visita terreno de reconocimiento	100%	100%
Fase 1: Diseño de muestreo y campaña de terreno	100%	10%
Campaña 1- Otoño	0%	0%
Campaña 2- Primavera	0%	0%
Fase 2: Análisis de laboratorio	0%	30%
Análisis de radionúclidos Campaña 1	0%	0%
Análisis de radionúclidos Campaña 2	0%	0%
Fase 3: Procesamiento de la información (Intervalo Post mortem)	0%	0%
Fase 4: Reporte Anual de actividades con avances correspondientes	17%	20%
Informe final con resultados del Estudio Forense	0%	0%
Preparación de manuscrito	0%	0%
Publicación de principales resultados en revista WOS/Scopus	0%	0%
Elaboración y entrega de información para página web	14%	5%
Informe de Gestión Mensual	24%	15%
Avance físico Análisis Forense		18%

Fuente: Elaboración propia (2022).

1.2.2 Entregables a la fecha

Según la programación, los documentos que han sido entregados a la fecha corresponden a los informes de gestión correspondientes al Proyecto, según se observa en la Tabla 3. Se encuentra en proceso de elaboración el video complementario al Informe de Gestión Anual, en donde se hará un reconocimiento al Área de Estudio e introducirá a la metodología utilizada en el estudio científico. Además, con el ajuste de la metodología y la preparación de las muestras, se trabaja en paralelo con los programas de muestreo de las próximas campañas de otoño (mayo 2022) y primavera (noviembre 2022).

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: oct 21-nov 21-dic 21-ene 22-feb 22-mar 22 Informe de gestión anual 2022
	Video 1 de Gestión Anual	Para publicación en página web de Codelco
EN PROCESO	Programa de Muestreo	Campaña 1 de Otoño Campaña 2 de Primavera

Fuente: Elaboración propia (2022).

1.2.3 Próximas actividades

1.2.3.1 Campañas de terreno

Se realizarán dos campañas de muestreo en el presente año y en estaciones contrastantes (otoño y primavera), para verificar si existe variedad intra-anual en las mediciones. Se extraerán muestras vegetales de individuos vivos (estructura completa: raíces y parte aérea) de la zona donde hay presencia de vegetación viva desde la porción activa del Salar de Pedernales, como también de la zona con vegetación de vigorosidad disminuida (llamada zona intermedia). En el caso de la zona con vegetación muerta (Salar inactivo), se extraerán restos de plantas muertas en la zona de rastrojos y mantillo.

De ser posible la identificación de las especies en las unidades de rastrojo y mantillo, el muestreo podría incluir la separación y embolsado de las muestras por especie de planta. En caso contrario, se considera la toma de muestras compuestas, sin distinción de las especies.

Adicionalmente se obtendrán muestras de suelo superficial y/o subsuperficial en cada parcela de muestreo.

1.2.3.2 Análisis de muestras

Luego de la Campaña de Otoño, se iniciará la actividad de Análisis de radionúclidos en el Laboratorio de Radioquímica Ambiental del Laboratorio de Oceanografía Química de la Universidad de Concepción, a través de la medición de ^{210}Pb de la serie del ^{238}U y ^{226}Ra en las muestras de plantas y suelo mediante la aplicación de Espectrometría Alfa.

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), el resto son radioactivos con vidas medias cortas 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 (Külahcı, 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 atmosfera 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, etc., 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 , de tal forma que todo el ^{210}Po es proviene del ^{210}Pb y en equilibrio, las actividades son iguales. Para muestras solidas generalmente se utiliza un ataque acido para disolver el material y luego depositación en discos de plata. En el caso de muestras biológica, como son las plantas, 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; Person 2014). Posteriormente, el ^{210}Po es depositado espontáneamente en discos de plata pura y la actividad presente en la solución acida 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 se dan a conocer los resultados **preliminares** y así como el pre-tratamiento realizado para las muestras analizadas hasta la fecha del Estudio de análisis forense vegetación azonal hídrica terrestre (SVAHT), con afectación sector Salar de Pedernales.

3. Objetivos

Se desarrollan los siguientes objetivos:

- Desarrollar una metodología de preparación de las muestras vegetales para la determinación de ^{210}Pb
- Determinar el contenido de ^{210}Pb en plantas del Salar de Pedernales y alrededores

4. Material y métodos

4.1 Área de Estudio

El Área de Estudio corresponde a la porción inactiva del Sistema Vegetacional Azonal Hídrico Terrestre (SVAHT) del Salar de Pedernales, el cual fue denominado como zona inactiva en el Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Rajo Inca (RCA 19/2020). El área corresponde al polígono definido como SVAHT con afectación, el cual constituye una superficie de aproximadamente 76 ha (Tabla 4), donde existió vegetación de tipo azonal activa. Además, se realizarán tomas de muestras en la zona actualmente activa, ubicada al norte de este polígono inactivo. En la Figura 2 se pueden observar ambos sectores y una zona indicada como de transición, que se encuentra inserta entre estas dos condiciones de las formaciones vegetacionales.

Tabla 4. Superficie del Área de Estudio

Sector	Superficie (ha)
Salar Activo	37
Salar Inactivo	76
Total	113

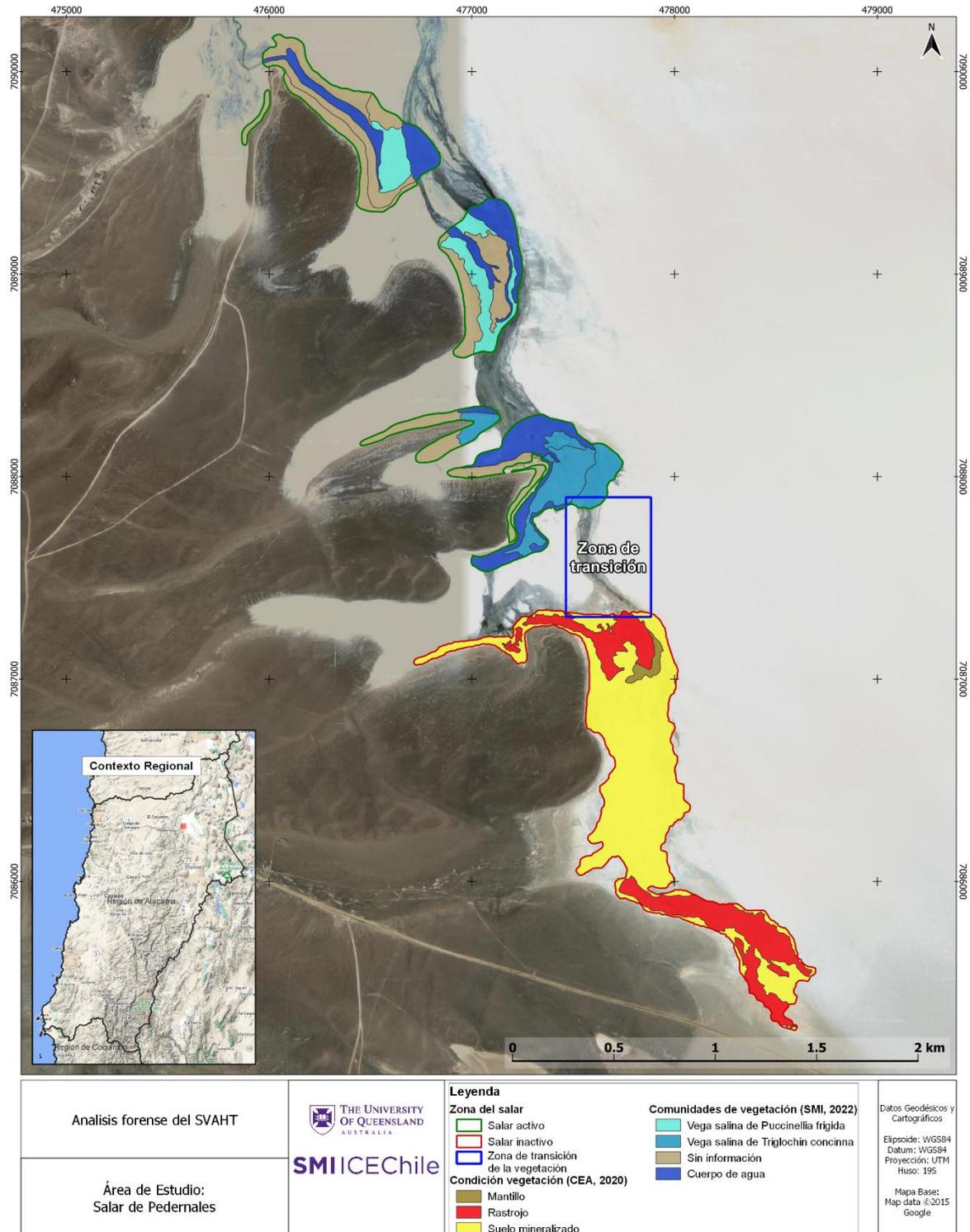


Figura 2. Área de Estudio Análisis Forense SVAHT.

4.2 Metodología

Para el propósito de este informe de avance, se trabajó con muestras de plantas recolectadas en el Salar de Pedernales (Inactivo) y otros sectores con afectación que forman parte de la Medica RC-02. Estas muestras preliminares de material vegetal fueron recolectadas en la Campaña de terreno realizada en noviembre/diciembre de 2021.

4.2.1 Preparación de muestras

Las muestras de material vegetal fueron tratadas en el laboratorio de Oceanografía Química en la sección de Radioquímica Ambiental de la Universidad de Concepción. El material fue separado en material vegetal muerto y material vegetal vivo, las cuales se describen en la Tabla 5 y Figura 3.

Tabla 5. Muestras recolectadas.

Muestras Salar Pedernales y sectores aledaños	
Material vegetal vivo	Material vegetal muerto
-L09 El Colorado	-Salar Pedernales Inactivo
-L26 Pastos Largos	-L26 Pastos Largos
-MH17 Triglochin	-MH08 Ciénaga
-MH17 Poa Sp2	-L09 El Colorado
-L26 Poa 4 Pastos Largos	-MH04 El Colorado
-MH08 - Ciénaga	-MH07 El Colorado
-L26 Pastos Largos (02.12.21)	



Salar Pedernales Inactivo



L26 Pastos Largos



MH08 Ciénaga



L09 El Colorado



MH07 El Colorado



MH04 El Colorado

Figura 3. Muestras de material vegetal muerto



Figura 4. Muestras de material vegetal vivo.

4.2.1.1 Pre-tratamiento de las muestras

Para las muestras se realizó un sonicado por 30 minutos, el cual tiene por objetivo remover todas las partículas adheridas a la superficie de las muestras vegetales. Una vez finalizado los 30 minutos de sonicado las muestras fueron lavadas individualmente con agua ultrapura Tipo II, el lavado se repitió hasta obtener un agua de lavado translúcida. Posteriormente las muestras fueron sometidas a un proceso de secado por liofilización.

Una vez finalizado el proceso de liofilización, algunas muestras fueron divididas por tejidos (i.e., raíz y hojas). En la Figura 5 se describen los diferentes tejidos para este grupo específico de muestras. El resto de las muestras fueron analizadas de manera completa.



Figura 5. Muestras divididas por tejidos para la determinación de ^{210}Pb . (a) Muestra MH08 (Material muerto) y (b) muestra L26 Poa 4 Pastos Largos (Material vivo).

4.2.1.2 Digestión ácida total

Se realizó la digestión de 0,5 g de muestra en una mezcla de HF, HNO_3 y HCl utilizando un trazador interno de ^{209}Po 2.22dpmg^{-1} , en donde el HNO_3 y el HCL fueron utilizados para la eliminación de materia orgánica y el HF para eliminar los silicatos presentes en la muestra. El proceso consistió en aplicar la mezcla de estos ácidos, evaporando en una placa calefactora a 160°C , llevando a sequedad la muestra. La importancia de este proceso de digestión es la completa eliminación de la materia orgánica y los silicatos presentes de acuerdo a la metodología propuesta por Flynn (1968).

4.2.1.3 Depositación

Realizada la digestión de la muestra se procedió a la deposición en discos de plata, en una Multi-Placa calefactora con Agitador Magnético por un tiempo de 2 horas y 30 minutos.

4.2.1.4 Lectura de ^{210}Pb

Una vez realizada la depositación en placa de plata, las placas obtenidas 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 6). El tiempo de conteo por muestra fue de 48 horas, donde se registró su número de cuentas e integrales tanto de la muestra como del trazador interno.



Figura 6. Espectrómetro Alfa. Sistema de cuantificación de radionúclidos.

5. Resultados preliminares

Los **resultados preliminares** obtenidos de las mediciones del radioisótopo ^{210}Pb en las muestras de material vegetal muerto y vivo se presentan en la Tabla 6 y Tabla 7, respectivamente. Para asegurar el control de calidad se realizaron algunos duplicados y también blancos analíticos.

Los **resultados preliminares** obtenidos muestran que hay una diferencia en la actividad de ^{210}Pb entre las muestras de material vegetal vivo y material vegetal muerto con rangos de actividades de $15,5 \sim 2 \text{ Bq kg}^{-1}$ y $8,5 \sim 1,7 \text{ Bq kg}^{-1}$, respectivamente.

Es importante destacar, que los rangos de actividad de ^{210}Pb detectados en el material vegetal evaluado en este estudio, se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura para diferentes especies de plantas (Tabla 8).

Si bien estos resultados pueden considerarse promisorios debido a la detección de ^{210}Pb en el material vegetal estudiado, es importante señalar la necesidad de continuar optimizando el método de preparación de muestras y tiempos de conteo para obtener una mejor señal que permita estimar con exactitud las fechas de afectación del SVAHT.

Tabla 6. Lecturas ^{210}Pb en material vegetal muerto.

Muestra Planta Salar de Pedernales		Peso Muestra(g)	Cámara	Cuentas		Integral		Razón	Actividad (Bg/kg)
N° de Muestra	Identificación			209	210	209	210		
1	L09 – El Colorado	0,5122	1A	394	47	2686	301	0,11	8,0
2	L09 (Duplicado) El Colorado	0,5100	1A	405	50	2659	312	0,12	8,5
3	MH04 El Colorado	0,5551	1B	400	29	2770	140	0,05	3,3
4	MH07 El Colorado	0,5218	2B	838	39	4095	169	0,04	2,8
5	L26 Pastos Largos	0,5318	2B	370	15	2685	75	0,03	2,0
6	MH08 (Muestra Completa) Ciénaga	0,5655	4B	393	25	2801	154	0,05	3,5
7	MH08 (Muestra Completa) (Duplicado) Ciénaga	0,5521	2B	388	30	2787	160	0,06	3,8
8	MH08 (Hojas) Ciénaga	0,5078	3B	542	21	4836	130	0,03	2,0
9	MH08 (Raiz) Ciénaga	0,5062	4A	468	16	4314	100	0,02	1,7
10	Salar Pedernales Sector Inactivo (Muestra Completa)	0,5534	4B	393	21	2801	150	0,05	3,5
11	Salar Pedernales Sector Inactivo (Suelo)	0,5538	3B	380	43	2879	200	0,07	4,7
12	Blanco (Solo Trazador ^{209}Po)	***	4A	401	***	2668	***	***	***

*** No Registra dato.

Tabla 7. Lecturas ^{210}Pb en material vegetal vivo.

N° de Muestra	Muestra Planta Salar de Pedernales Identificación	Peso Muestra(g)	Cámara	Cuentas		Integral		Razón	Actividad (Bq/kg)
				209	210	209	210		
1	L09 El Colorado	0,5142	2A	876	73	4174	718	0,17	12,3
2	MH17-Poa Salar de Piedra Parada	0,5323	1A	129	22	819	185	0,23	15,5
3	MH08-Ciénaga	0,5123	2B	706	70	3674	529	0,14	10,3
4	L26-Pastos Largos (02.12.21)	0,5058	1B	127	12	854	40	0,05	3,3
5	L26-Poa4-Pastos Largos (Tallo)	0,537	3B	501	69	4122	657	0,16	10,8
6	L26-Poa4-Pastos Largos (Hojas)	0,5126	2A	560	15	2943	155	0,05	3,8
7	L26-Poa4-Pastos Largos (Completo)	0,5353	4A	535	66	4105	612	0,15	10,2
8	L26-Pastos Largos (Completo)	0,5157	4B	501	46	3724	103	0,03	2,0
9	L26-Pastos Largos (suelo)	0,5185	2B	510	210	2907	1110	0,38	27,0
10	MH17-Triglochin Salar de Piedra Parada (Completo)	0,5073	3B	510	69	3416	607	0,18	12,8
11	MH17-Triglochin Salar de Piedra Parada (Completo) (Duplicado)	0,5112	4A	522	71	3389	581	0,17	12,3
12	MH17-Triglochin Salar de Piedra Parada (Suelo)	0,5217	4B	408	159	2529	993	0,39	27,7
13	Blanco (Solo Trazador ^{209}Po)		***	1A	566	***	3216	***	***

*** No Registra dato

Tabla 8. Tabla comparativa de contenidos de ^{210}Pb en diferentes especies de plantas. Se han incorporado las mediciones preliminares en plantas vivas y muertas recolectadas en el Salar de Pedernales y sus alrededores.

Planta	Unidad	^{210}Pb	Estructura	Fuente
Artemisa sp.	Bq /kg p.s	15,54±5,926 ~ 51,43±39,96	Planta entera	Ibrahim and Whicker, 1987
Alfalfa	Bq /kg p.s	1,04 ~ 0,94	Planta entera	Persson, 2014
Menta ¹	Bq /kg p.s	42,6 ~ -	Planta entera	Kovács, <i>et al.</i> , 2015
Manzanilla ¹	Bq /kg p.s	34,1 ~ -	Planta entera	Kovács, <i>et al.</i> , 2015
E. augstifolium	Bq /kg p.s	12,40±8,55 ~ -	Maleza/pastos	Mahon and Mathew, 1983
Cladonia convoluta ²	Bq/kg -	188 ~ 200	Planta entera	Sert <i>et al.</i> , 2011
Homalotecium sericeum ³	Bq/kg -	188 ~ 575	Planta entera	Sert <i>et al.</i> , 2011
Urtica dioica	Bq/kg -	41,43±0,23 ~ -	Hojas	Olszeweski <i>et al.</i> , 2016
Urtica dioica	Bq/kg -	1,52±0,15 ~ -	Raices	Olszeweski <i>et al.</i> , 2016
Imleria badia/Marasmius oreades ⁴	Bq/kg -	0,88±0,04 ~ 3,06±0,09	Planta entera	Szymańska & Strumińska-Parulska, 2020
Plantas vivas	Bq/kg -	15,5 ~ 2	Planta entera	Este estudio
Plantas muertas	Bq/kg -	8,5 ~ 1,7	Planta entera	Este estudio

p.s: peso seco

¹: como hierba medicinal;

²: Liquen

³: Musgo

⁴: Hongos

6. 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
MSc Laura Collao	SMI-ICE-Chile	Ingeniera de Proyectos, Especialista flora y vegetación
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
Bárbara Alcayaga	SMI-ICE-Chile	Coordinación de Comunicaciones
AIRE Consultores	AIRE Consultores	Coordinación Diseño Gráfico
AVIC Producciones	AVIC Producciones	Coordinación Producción Audiovisual
Carmen Gloria Rojas	SMI-ICE-Chile	Prevención de riesgos
Dr Jacques Wiertz	SMI-ICE-Chile	Hidrogeólogo senior

7. 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.
- Kovacs, T. M. Horvarth, E, Thot-Bodogrfi and J. Somlai. (2015). ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs concentrations of medicinal herbs. *Radiation Emergency Medicine*.Vol 4. No. 2 40-44
- 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>
- Mahon, D. C. & Mathewes, R. W. (1893). Uptake of naturally occurring radioisotopes by vegetation in a region of high radioactivity. *Canadian Journal of Soil Science*, 63(2), 281-290. <https://doi.org/10.4141/cjss83-028>
- 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 -Matthews 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

Olszewski, Grzegorz, Alicja Boryło, Bogdan Skwarzec. (2016). A study on possible use of *Urtica dioica* (common nettle) plant as polonium ^{210}Po and lead ^{210}Pb contamination biomonitor in the area of phosphogypsum stockpile. *Environ Sci Pollut Res.* 23:6700–6708

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.

Sert Emel, Aysun Ugur, Banu Özden , Müslim Murat Saç , Berkay Camgöz, (2011). Biomonitoring of ^{210}Po and ^{210}Pb using lichens and mosses around coal-fired power plants in Western Turkey. *Journal of Environmental Radioactivity* 102: 535-542

Szymańska, Karolina and Dagmara Strumińska-Parulska. (2020). Atmospheric fallout impact on ^{210}Po and ^{210}Pb content in wild growing mushrooms. *Environmental Science and Pollution Research* 27:20800–20806

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