

UCH-FC  
2º. Ambiental  
P 434  
Co 1



FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**“EVALUACIÓN DE RIESGOS A LA SALUD E IMPLEMENTACIÓN DE UN  
PLAN DE ACCIÓN EN EL SUELO CON POTENCIAL PRESENCIA DE  
CONTAMINANTES DEL YACIMIENTO COPAQUIRE EN LA COMUNA DE  
PICA”**

Seminario de título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de:

**Químico Ambiental**

**Juan Pablo Pérez de Arce Gutiérrez**

Director de Seminario de Título: Dra. Isel Cortés N.



Mayo de 2016  
Santiago – Chile



## INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el candidato:

**JUAN PABLO PEREZ DE ARCE GUTIERREZ**

“EVALUACION DE RIESGOS A LA SALUD E IMPLEMENTACION DE UN PLAN DE ACCION EN EL SUELO CON POTENCIAL PRESENCIA DE CONTAMINANTES DEL YACIMIENTO COPAQUIRE EN LA COMUNA DE PICA”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

### COMISIÓN DE EVALUACIÓN

*Dra. Isel Cortés*  
**Directora Seminario de Título**

Firma manuscrita de Dra. Isel Cortés en tinta azul sobre una línea horizontal.

*M. Cs. Sylvia Copaja*  
**Presidenta**

Firma manuscrita de M. Cs. Sylvia Copaja en tinta azul sobre una línea horizontal.

*M. Cs Gustavo Salinas*  
**Corrector**

Firma manuscrita de M. Cs Gustavo Salinas en tinta azul sobre una línea horizontal.



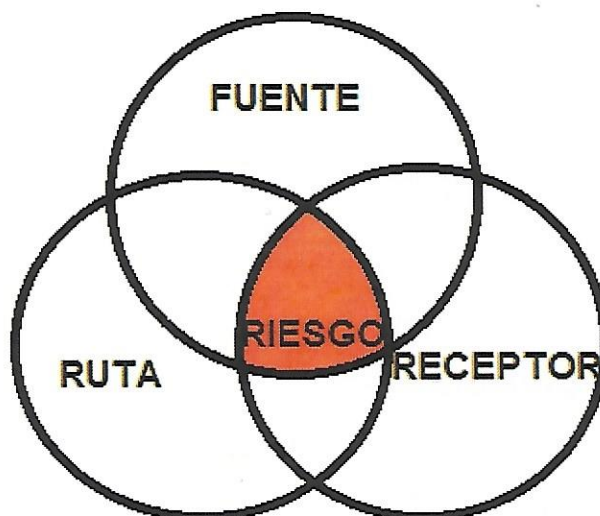
Nació el 11 de abril de 1987 en Santiago, Chile, a los 8 años parte a vivir a Cochabamba, Bolivia, por el trabajo de su padre, donde recibió parte de su educación escolar. Desde pequeño se destacó por sus aptitudes deportivas, practicando fútbol y tenis. A los 13 años vuelve a Santiago, Chile, donde continúa su formación académica, desarrolla su interés por la Ciencia y termina su Enseñanza Media.

De su padre aprendió el arte de la pesca deportiva recorriendo los majestuosos ríos del sur de Chile, donde se desarrolló su admiración por la naturaleza y el respeto por el medio ambiente, lo que determinó que estudiara la carrera de Química Ambiental en la Universidad de Chile. Tras egresar en el año 2014, desarrolla su seminario de título en el Centro Nacional del Medio Ambiente con la Dra. Isel Cortés, con el que pretende obtener el título profesional de Químico Ambiental.

ocurrencia de un efecto adverso en las personas o el ecosistema (MMA 2011\*), mientras que el término “peligro” define la capacidad de una sustancia de producir efectos adversos en los organismos (MMA 2011\*). Ahora bien para que exista un riesgo ambiental, tiene que presentarse la interacción de 3 elementos básicos.

- **Fuente de contaminación**, sustancia o agente en concentraciones suficientes para generar algún daño a la salud o al medio ambiente.
- **Receptor**, organismo afectado por la fuente de contaminación.
- **Ruta de exposición**, mecanismos por los que fuente y receptor pueden entrar en contacto, ya sea por ingesta, inhalación o contacto.

La interacción de los componentes se describe en la siguiente figura 1.



**Figura 1.** Interacción de los componentes básicos que determinan la presencia de un riesgo.

De este modo, ante la ausencia de cualquiera de los tres elementos mencionados, la existencia del riesgo es nula (SERNAGEOMIN-BGR; Golder Associates, 2008). Por ejemplo, si hay sustancias químicas presentes en altas concentraciones, pero no hay receptores que puedan entrar en contacto con estas, entonces no puede haber un riesgo para la salud. En el caso de que fuente y receptor estén presentes, el riesgo, especialmente para las personas, dependerá de la



## AGRADECIMIENTOS

Quisiera partir estos agradecimientos mencionando a las personas por las cuales hoy estoy aquí, mis padres, Jaqueline Gutiérrez Mella y Patricio Pérez de Arce Bonilla, quienes en base de amor y de esfuerzo me entregaron todas las herramientas para desarrollarme emocional y académicamente, sin duda este es *el* fruto de su esfuerzo. Les agradezco por el apoyo incondicional que me brindan en todo momento, los buenos y los no tanto, por haber formado una familia como la nuestra, donde el respeto, el amor y la verdad son los pilares fundamentales, por los valores e ideales que me entregaron y me siguen entregando, y por sobre todo por el esfuerzo que ponen día a día por hacer de nosotros, sus hijos, personas integrales, capaces de enfrentar el mundo y de alcanzar el éxito, GRACIAS... TOTALES.

Agradezco también a mis hermanos por su fraternal complicidad. A mi hermano mayor, Felipe, con quien compartimos desde pequeños los mismos espacios, siguiendo sus huellas desde el jardín infantil hasta la facultad de ciencia, gracias por todo lo enseñado. A mi hermana Catalina, por su alegría y simpatía, gracias por tu cariño. A mi hermano menor, Tomas, por su valentía, y por enseñarme que con convicción e inteligencia, las cosas se pueden lograr, gracias por tu coraje.

Agradezco a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron para terminar este proceso, a mis compañeros de estudios, y esas interminables noches de aprendizajes, gracias por los conocimientos entregados. A la profesora Isel Cortés por permitirme desarrollar mi seminario de título en CENMA y a todos los profesionales de CENMA, en especial a Patricia Ayala, gracias por la desinteresada sapiencia regalada. A mis compañeros de tesis Javier Ocampo y Pablo Rodríguez, gracias por su amistad y apoyo. A los profesores, ayudantes, secretarías de estudio, auxiliares, guardias y los tíos de las fotocopias, gracias por la disposición y la buena conversa.

Pero la Universidad no solo tiene un rol académico, también tiene una responsabilidad social, crítica, organizativa y proponente, en este sentido agradezco haber sido parte esta Facultad y agradezco a todos los compañeros con los que se hizo Universidad ya sea movilizándose por asuntos nacionales o internos, gracias por la rebeldía, la colectividad, el compañerismo y la solidaridad.

Agradezco también los momentos de esparcimiento, en los que se formaron amistades entrañables, a los locos lindos de Las Gradadas, gracias por su desinteresada amistad y hacer del paso por la Universidad una aventura, a los compañeros de equipo, del Friedman Drog B.F.C, gracias por los innumerables abrazos de gol, y los merecidos tercer tiempo en la mítica cancha de CALAMA, que espero algún día vuelva a reunir a la comunidad Gómez Millas alrededor de su perímetro sagrado como lo hacía hace algunos años.

Gracias a todos los amigos que he ido fraguando en el camino, a mis compañeros de equipo, Pilseneros F.C y a todos mis camaradas, los románticos viajeros, los que domingo a domingo seguimos a la vocal sagrada.

Finalmente quiero agradecer a mi pareja, mi compañera de vida, mi Flo, por su inmenso amor, y darme el ánimo para terminar este proceso, sin duda sin tu apoyo, no lo habría logrado, gracias por tu comprensión, por tu compañía, tu cariño, tu convicción, tu tolerancia, por sacar lo mejor de mí, gracias por tu amor.

*Ir más allá del horizonte,*

*Do remonta la verdad...*

## INDICE DE CONTENIDO

<b>I INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes Generales.....	1
1.2 El Suelo .....	3
1.3 Evaluación de riesgos asociados a la contaminación de suelos.....	5
1.4 Guía Metodológica para la Gestión de Sitios con Potencial Presencia de Contaminantes.....	8
1.4.1 Fase III. Evaluación de riesgo y plan de acción para la gestión de SPPC.....	9
1.4.1.1 Evaluación de riesgo ambiental.....	10
1.4.1.1.1 Caracterización del SPPC.....	11
1.4.1.1.2 Evaluación de la Exposición.....	11
1.4.1.1.3 Evaluación de la toxicidad.....	12
1.4.1.1.4 Caracterización del Riesgo .....	12
1.4.1.1.5 Análisis de incertidumbre .....	12
1.4.1.1.6 Evaluación de los efectos.....	12
1.4.1.2 Plan de acción.....	13
1.4.1.2.1 Medidas de Control de Corto Plazo.....	13
1.4.1.2.2 Medidas de Control a Mediano y Largo Plazo .....	13
1.5 Sitio de estudio y resultados ambientales previos .....	14
1.6 Perfil toxicológico del arsénico .....	16
1.7 Perfil toxicológico de cadmio .....	17
1.8 Objetivos.....	19
1.8.1 Objetivo General .....	19
1.8.2 Objetivos Específicos .....	19
<b>II MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>20</b>
2.1 Selección del sitio de estudio .....	20
2.2 Evaluación de riesgo Ambiental .....	20
2.2.1 Desarrollo del plan de muestreo.....	21
2.2.2 Evaluación de la exposición .....	25
2.2.3 Selección de factores de exposición .....	26
2.2.4 Evaluación de toxicidad.....	27
2.2.5 Caracterización del Riesgo.....	27
2.3 Metodologías de Análisis Químico .....	29
2.3.1 Equipos y materiales .....	29
2.3.2 Reactivos .....	30



2.3.3	Detección de metales lixiviados por SPLP (synthetic precipitation leaching procedure).....	30
2.3.3.1	Procedimiento de lixiviación por precipitación sintética .....	30
2.3.4	Determinación de mercurio mediante Espectrometría de Absorción Atómica (EAA-VP).....	33
2.3.5	Determinación de pH.....	34
2.4	Comparación con Decreto Supremo 148, sobre manejo de residuos peligrosos. ....	34
<b>III RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>		<b>36</b>
3.1	Caracterización del sitio de estudio.....	36
3.1.1	Delimitación del sitio.....	36
3.1.2	Inspección del sitio.....	37
3.1.3	Descripción de los procesos productivos.....	37
3.1.4	Características geológicas .....	38
3.1.5	Identificación de la topografía y accesos .....	38
3.1.6	Climatología local.....	39
3.1.7	Características hidrogeológicas, existencia y calidad de agua subterránea e identificación de cursos de agua superficial.....	40
3.1.7.1	Agua Subterránea .....	40
3.1.7.2	Agua Superficial .....	40
3.1.8	Caracterización de los receptores antrópicos.....	41
3.1.8.1	Localización .....	41
3.1.8.2	Presencia de subpoblaciones sensibles.....	41
3.2	Evaluación de la Exposición.....	42
3.2.1	Identificación de vías de exposición .....	42
3.2.1.1	Receptores y escenarios de exposición .....	43
3.2.1.2	Desarrollo de un modelo conceptual detallado .....	43
3.2.1.3	Determinación de algoritmos para el cálculo de dosis de exposición .....	44
3.2.1.4	Selección de factores de exposición.....	45
3.2.2	Evaluación de la toxicidad .....	45
3.2.3	Caracterización del Riesgo.....	46
3.2.3.1	Efectos no carcinogénicos.....	47
3.2.3.2	Efectos carcinogénicos .....	50
3.2.4	Análisis de incertidumbre .....	52
3.2.5	Evaluación de los efectos.....	53

3.3	Determinación de pH .....	54
3.4	Análisis de lixiviación .....	54
3.5	Plan de acción .....	58
3.5.1	Medidas de control a corto plazo.....	58
3.5.2	Medidas de control a mediano y largo plazo .....	59
<b>IV</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>63</b>
<b>V</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>65</b>
<b>VI</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>68</b>
6.1	Metales lixiviados por SPLP mediante ICP-OES.....	68
6.2	Cálculos .....	70
6.2.1	Dosis de exposición por ingesta de suelo contaminado por arsénico para niños .....	70
6.2.2	Dosis de exposición por contacto dérmico con suelo contaminado para niños .....	71
6.2.3	Calculo de cociente de peligro por contacto dérmico con suelo contaminado para niños .....	71
6.2.4	Cálculo del índice de peligro por contacto con suelo contaminado por arsénico para niños .....	72
6.2.5	Calculo de Riesgo Extra de Cáncer de por Vida por contacto con suelo contaminado por Arsénico para niños .....	72
6.3	Análisis para Metales por SPLP .....	74
6.4	Análisis de Hg mediante SPLP.....	75



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interacción de los componentes básicos que determinan la presencia de un riesgo .....	6
Figura 2. Actividades Asociadas a la Investigación y Gestión de Suelos con Presencia de Contaminantes. ....	9
Figura 3. Diagrama de Procedimiento para la Evaluación del Riesgo y Plan de Acción de SPPC.....	10
Figura 4. Ubicación de los puntos de toma de muestras para el SPPC-5 Yacimiento Copaquire .....	22
Figura 5. Ubicación de los puntos de muestreo de línea base.....	23
Figura 6. Espectrómetro de plasma inductivamente acoplado Perkin Elmer modelo Optima 3300 XL.....	32
Figura 7. Equipo de Absorción Atómica Perkin Elmer modelo AAnalyst 700 .....	33
Figura 8. Delimitación del sitio SPPC-5, Yacimiento Copaquire.....	36
Figura 9. Acceso a SPPC-5 Yacimiento Copaquire .....	39
Figura 10. Ubicación del Río Guatacondo y el Caserío Copaquire respecto al sitio de estudio .....	41
Figura 11. Diagrama de modelo conceptual del SPPC-5. ....	44
Figura 12. <i>Atriplex atacamensis</i> , planta de la sal o cachiuyuyo .....	60
Figura 13. Esquema interno de los componentes de un equipo de ICP-OES .....	69
Figura 14. Criterios de aceptabilidad y elementos de control de calidad para análisis de metales por ICP en lixiviados de SPLP.....	74
Figura 15. Criterios de aceptabilidad y elementos de control de calidad para análisis de Hg por SPLP .....	75

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Concentraciones totales de los contaminantes metálicos estudiados para el SPPC-5 (mg/kg).....	16
Tabla 2. Coordenadas puntos de muestreo SPPC-5, Yacimiento Copaquire.....	24
Tabla 3. Equipos y materiales utilizados en los análisis químicos.....	29
Tabla 4. Reactivos utilizados en el análisis químico.....	30
Tabla 5. Concentraciones Máximas Permisibles según decreto supremo 148.....	35
Tabla 6. Exposure Factors Handbook US EPA: 2011 Edition (Handbook de Factores de Exposición) .....	45
Tabla 7. Dosis de referencia y factores de potencia cancerígena .....	46
Tabla 8. Valores de absorción recomendados por US EPA .....	46
Tabla 9. Resultados de las dosis de exposición (mg/kg·día), cociente de peligro e índice de peligro por exposición de arsénico.....	49
Tabla 10. Resultados de las dosis de exposición (mg/kg·día), cocientes de peligro e índice de peligro por exposición de cadmio .....	49
Tabla 11. Resultados del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) por exposición a arsénico .....	51
Tabla 12. Determinación de pH en las muestras de suelo del SPPC-5 y de las muestras control.....	54
Tabla 13. Concentraciones de metales lixiviados (mgL <sup>-1</sup> ) .....	55
Tabla 14. Comparación de la concentración lixiviada de cadmio (mg/l) con el Decreto Supremo 148 .....	56
Tabla 15. Porcentaje de cadmio lixiviado respecto a la concentración total (mg/kg) ....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS

ATSDR	Agencia para Sustancia Toxicas y el Registro de Enfermedades
BCR	Community Bureau of Reference
CP	Cociente de Peligro
DdR	Dosis de Referencia
DHHS	Departamento de Salud y Servicios Humanos
EMEG	Guía de Evaluación de Medios Ambientales
FPC	Factor de Potencia Cancerígena
IARC	Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer
IHOBE	Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco
IP	Índice de Peligro
IQ	Coeficiente Intelectual
IRIS	Sistema de Información Integrado de Riesgos
ISO	Organización Internacional de Estandarización
RECV	Riesgo Extra de Cáncer de por Vida
SPC	Suelo con Presencia de Contaminantes
SPLP	Procedimiento de Lixiviación de Precipitación Sintética
SPPC	Suelo con Potencial Presencia de Contaminantes
UCL	Límite Superior de Confianza
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos



## RESUMEN

En el presente trabajo se realiza una evaluación de riesgos a la salud que presenta para la población, la exposición al suelo del sitio "Yacimiento Copaquire", ubicado en la comuna de Pica, Región de Tarapacá, donde en el año 2014 la SEREMI del Medio Ambiente de la Región de Tarapacá, inicia los esfuerzos para la gestión del sitio, encargándole al Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) la aplicación de las 2 primeras fases de la Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes, en dichos estudios se establece que en el suelo del sitio, y debido a la actividad minera, se encuentran concentraciones de metales que sobrepasan varias normas internacionales, además que tanto arsénico como cadmio sobrepasan los valores guías para evaluación de medios ambientales (EMEG) para niños, que son valores de comparación entre las concentraciones de los componentes tóxicos presentes en el suelo del sitio, con los niveles de riesgo mínimo presentados en los perfiles toxicológicos, de la Agency for Toxic Substance and Disease Registry (ATSDR) de los Estados Unidos.

Por esta razón se continua con la gestión del sitio, implementando la tercera fase de la Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes, desarrollando una evaluación de riesgo ambiental por exposición a arsénico y cadmio, y la propuesta de un plan de acción para la gestión del riesgo. Además debido a la existencia del "Salar de Llamara", se efectúa un análisis de lixiviación mediante la técnica Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) comparando los resultados con las concentraciones máximas permisibles establecidas en el decreto supremo 148, para estimar la capacidad de los metales para penetrar hacia aguas subterráneas.

Como parte de la evaluación ambiental se recopiló antecedentes para la caracterización del sitio de estudio y sus condiciones ambientales, como ubicación, clima, topografía, geología e hidrología, junto con la descripción de los procesos productivos que se llevaban a cabo en el sitio, identificando la fuente de contaminación, las vías de exposición y los receptores afectados.

Además se realiza una evaluación de la exposición identificando los escenarios de exposición correspondientes a contacto dérmico e ingesta de suelo contaminado y

una evaluación de la toxicidad a través de la caracterización del riesgo; donde los resultados obtenidos indican que existe la probabilidad de manifestar efectos adversos para la salud en niños, del tipo carcinogénicos por exposición a arsénico y de manifestar efectos del tipo no carcinogénicos por exposición a cadmio y arsénico, obteniendo índices de peligro no carcinogénicos (IP) de 1,03 y 3,90 respectivamente (siendo el valor indicativo de riesgo cuando  $IP > 1$ ).

El índice de riesgo extra de cáncer de por vida, para niños, por exposición a arsénico (RECV) fue de  $1,68 \cdot 10^{-3}$  (siendo el valor indicativo de riesgo cuando  $RECV > 1 \cdot 10^{-4}$ ).

En cuanto al análisis de lixiviación, éste consiste en simular la lixiviación que naturalmente podría ocurrir producto de las precipitaciones (lluvias), y consta de la cuantificación de la movilidad de los analitos desde el suelo a una solución acuosa. Los resultados de éste análisis indican que la mayoría de los metales analizados (As, Cr, Hg, Pb, Se, Ba, Cd y Ag) no tienen la capacidad de lixiviar, solo cadmio mostró lixiviación, sin embargo el porcentaje de lixiviación, respecto a la concentración total del metal presente en el suelo, fue menor a un 15 %. De manera que no se sobrepasa la concentración máxima permisible que establece el Decreto Supremo 148.

Finalmente, debido a los resultados obtenidos en la caracterización del riesgo, se propone un plan de acción para minimizar la probabilidad de manifestar efectos adversos para la salud. El que contempla la implementación de medidas, tanto a corto y largo plazo. Dentro de las medidas inmediatas destacan el generar un dialogo con la población afectada informando los riesgos que conlleva el contacto con el suelo del sitio y la construcción de un cierre perimetral para evitar el ingreso de personas al sitio e impedir la dispersión de polvo contaminado hacia áreas pobladas. Como medida de largo plazo se propone realizar una fitorremediación con *Atriplex atacamensis*, que es una planta autóctona del norte de Chile adaptada para sobrevivir en las condiciones ambientales extremas características del lugar, y que posee la capacidad de estabilizar metales pesados disminuyendo su biodisponibilidad.



## ABSTRACT

In this study an assessment of health risks, posing to the population, the exposure to site soil SPPC – 5, "Oilfield Copaquire " located in the town of Pica, Tarapacá region was performed. In the year 2014 the SEREMI del Medio Ambiente of the Tarapacá Region, begins the management efforts of the site. Entrusting the National Environmental Centre (CENMA) the application of the first 2 phases of the Methodological Guide for Management Potential Contaminated Soils, in these studies it's established that on the soil site, and due to mining, metal concentrations exceeds several international standards, also that both arsenic and cadmium exceeds the Environmental Media Evaluation Guidelines (EMEG) for children which are comparison values between the concentrations of toxic components present in the soil site with minimal risk levels shown in the toxicological profiles of the Agency for Toxic Substance and Disease Registry ( ATSDR ) of the United States.

For this reasons the site managements continues, implementing the third phase of the Methodological Guide for the Management of Potential Contaminated Soils, developing an environmental risk assessment for cadmium and arsenic exposure, and the proposal of an action plan for the risk management.

Also, due the existence of the LLamara salts flat, a lixiviation analysis was performed, by the Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) technique, comparing the results with the maximum permissible concentration established on the Supreme Decree 148 to estimate the metals ability to penetrated grown waters.

As part of the environmental assessment, background for site characterization and environmental conditions, such as location, climate, topography, geology and hydrology were collected, along with the description of the production processes carried out on the site, identifying the source of contamination, exposure pathways and receptors affected.

Also an exposure assessment is done, identifying the exposure scenarios due to dermal contact and ingestion of contaminated soil, with a toxicity evaluation through risk characterization; where the results indicate that there is a chance of developing carcinogenic effects in children, due to arsenic exposure, and manifest non-carcinogenic effects due to cadmium and arsenic exposure.

The risk characterization result indicates that **non-carcinogenic hazard index** (IP) was **1.03 for cadmium** and **3.90 for arsenic** (being the indicative risk value when  $IP > 1$ ).

The **Excess Lifetime Cancer Risk**, for children, by **arsenic** exposure (RECV) was  $1.68 \cdot 10^{-3}$  (being the indicative risk value when  $RECV > 1 \cdot 10^{-4}$ ).

As for the leaching analysis, it consist in simulate the natural leaching that may occur product of the precipitations (rain), and it is based of quantification the analytes mobility from the ground to an aqueous solution. The results of this analysis indicate that most of the tested metals ( As, Cr , Hg , Pb , Se, Ba , Cd and Ag ) don't have the ability to leach only cadmium showed leaching , however the rate of leaching, about the total concentration of the metal present in the soil, was less than 15%. So the maximum permissible concentration established by the Supreme Decree 148 is not exceeded.

Finally, and due to the risk characterization results, it is proposed an action plan, to minimize the probability of have adverse health effects. This contemplates the implementation of short and long terms measures.

Within immediate measures, it is included the generation of a dialogue, with the affected population, reporting the risks of enter in contact with the site soil and the construction of a perimeter fence to prevent the entry of people to the site and prevent the spread of contaminated dust into populated areas.

As a long term measure, a phytoremediation with *Atriplex atacamensis*, it's proposed, which is a native plant of northern Chile adapted to survive in extreme environmental conditions typical of the place, and possessing the ability to stabilize heavy metals reducing its bioavailability.

## I INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes Generales

La gestión de sitios potencialmente contaminados, nace de la importancia de evaluar y minimizar los riesgos a la salud humana y al medio ambiente, que este tipo de lugares generan. Chile, a la fecha, no cuenta con normas que regulen la presencia de elementos contaminantes en el suelo, lo que ha generado una gran cantidad de sitios donde, por años, se han vertido y acumulado todo tipo de elementos nocivos tanto para la salud del ser humano como para el medio ambiente. La experiencia internacional indica que países desarrollados como Estados Unidos, Canadá, Japón y algunos países de la unión Europea, debieron abordar la problemática integralmente, remediando y recuperando sitios e implementando programas de prevención y vigilancia, además de la creación de bases normativas específicas para la identificación, clasificación y remediación de sitios contaminados.

A nivel nacional, en el año 2009, se crea la Política Nacional para la Gestión de Sitios con Presencia de Contaminantes, a cargo de la CONAMA, cuyo objetivo era fortalecer la gestión de sitios con presencia de contaminantes en el país, orientada a reducir los riesgos asociados a la salud de la población y al medio ambiente a través de un sistema de gestión coordinado y costo eficiente. Lo anterior, entendiendo la gestión de sitios con presencia de contaminantes, como las actividades asociadas a las etapas de: identificación y confirmación de la presencia de contaminantes; evaluación de riesgos; control, mitigación y seguimiento para la recuperación ambiental de estos sitios, en función de sus respectivos usos futuros.

Otros de los desafíos de esta política se orientaban a la generación de instrumentos específicos para la gestión de sitios con presencia de contaminantes, entre los que figuraban la elaboración de un catastro de sitios con presencia de contaminantes y la generación de una metodología de evaluación de riesgo ambiental y sanitario. (CONAMA 2009)

Continuando en el avance de la gestión de sitios con presencia de contaminantes, en el año 2011 el recientemente creado Ministerio del Medio Ambiente (MMA, remplace a CONAMA en el año 2010) aprueba la resolución exenta 1.690,



sobre metodología para la identificación y evaluación preliminar de suelos abandonados con presencia de contaminantes, cuyo objetivo comprende la identificación y priorización de suelos con presencia de contaminantes, la que posteriormente en el año 2013 fue remplazada por la resolución exenta 406 que aprueba la "Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes" la que define el procedimiento de las fases que deben desarrollarse cuando se investiga un suelo de este tipo, sus objetivos son definir los procedimientos de cada etapa para estandarizar la investigación de suelos con potencial presencia de contaminantes (SPPC), la metodología contempla 3 fases, la primera, que se realiza a escala regional y consiste en identificar, priorizar y jerarquizar los suelos con posible presencia de contaminantes. La segunda fase donde se realiza una evaluación preliminar sitio-específica del riesgo, y la tercera que consiste en la evaluación de riesgo, que contempla un estudio detallado del sitio y su respectivo plan de acción en caso que fuese necesario. (MMA 2013)

En este sentido durante el año 2014, el Ministerio del Medio Ambiente llevo a cabo los siguientes estudios y diagnósticos en el marco de la evaluación de riesgos:

- Evaluación y gestión del riesgo a la salud humana en áreas de los relaves Pabellón y Totoralillo, comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama.
- Consultoría Manual estándar de muestreo y análisis químico de suelos para la determinación de áreas background y sitios con presencia de PCB y metales en el sector minero de Chile
- Diagnóstico regional de suelos abandonados con potencial presencia de contaminantes en la Región de Antofagasta, en el marco de la gestión de Sitios con Potencial Presencia de Contaminantes, SPPC.
- Diagnóstico y evaluación de riesgos de suelos abandonados, en la Región de Tarapacá, en el marco de la gestión de Sitios con Potencial Presencia de Contaminantes.

## 1.2 El Suelo

El término suelo, deriva del latín *solum*, que significa piso, puede definirse como la capa superior de la tierra que se distingue de la roca sólida y en donde las plantas crecen. Con este enfoque, los suelos deben considerarse como formaciones geológicas naturales, desarrolladas bajo condiciones muy diversas de clima y material de origen, lo cual justifica su continua evolución y, en consecuencia, su gran diversidad.

Sin embargo, dependiendo del criterio que se adopte en lo que respecta a su utilización, formación, origen, constitución o función, el suelo puede definirse de formas diferentes, por ejemplo en el ámbito de la construcción, el suelo puede ser el material donde se construye, un ingeniero en minas, lo puede considerar como el conjunto de restos diversos que cubren las rocas y minerales que él debe estudiar, mientras que para un agricultor, el suelo puede ser exclusivamente el lugar donde crecen sus cultivos.

Sin embargo, desde el punto de vista geológico el suelo se define en función de su formación a partir de las rocas originarias, y en este sentido, el suelo puede definirse como el producto de la meteorización de las rocas, evidenciado en las partes superficiales de la corteza terrestre y que contiene, en ocasiones, materia orgánica descompuesta o en descomposición. (Ginés Navarro. 2003)

El suelo reúne ciertas características que le permiten desarrollar sus funciones, dentro de las que se encuentran:

- Promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible)
- Atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental)
- Favorecer la salud de plantas, animales y humanos (Doran y Parkin, 1994; Karlen et al., 1997)

La capacidad con la que el suelo puede desarrollar las funciones antes descritas, determina su calidad.

La calidad del suelo se define en base a su multifuncionalidad y no solo en un uso específico (Singer y Ewin, 2000), de esta forma el comité para la salud del suelo,



de la Soil Science Society of América, define calidad de suelo como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat. (A. Bautista 2004)

Sin embargo, el uso del suelo por el hombre, ha provocado grandes alteraciones de sus propiedades naturales, de modo que hoy se identifica entre los problemas ambientales globales. Entre los variados usos que deterioran la calidad del suelo se encuentra su uso como soporte de desechos mineros (Cortés y col. 2011), que suelen contener metales pesados en altas concentraciones, aumentando el contenido de estos en los suelos.

La legislación chilena, en la ley 20.417 sobre Bases Generales del Medio Ambiente define como contaminación, "la presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones o concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente". De modo que, para que algún componente ambiental, se considere contaminado debe existir una norma que regule la presencia (concentración) de los distintos componentes en el medio. (Ley 20.417)

Al presente, Chile no dispone de un estándar o norma primaria que establezca cuáles son los niveles aceptados de distintos elementos y compuestos químicos en un suelo, que permitan declararlo "de calidad" para un determinado uso, sin que represente un riesgo para la salud humana. Por lo que, en virtud de la normativa vigente, no sería posible hablar de contaminación del suelo en el territorio chileno (Cortés y col., 2011).

La Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes, establece que ante la falta de normativa que regule la presencia y concentración de elementos y compuestos químicos en un componente del medio ambiental determinado, en este caso el suelo, se debe comparar las concentraciones detectadas con normas internacionales.

Los Estados, cuya normativa regula la calidad del suelo y su gestión, que son recomendados por la Guía Metodológica y cuyas normativas pueden ser aplicadas son: República Federal de Alemania, República Federativa del Brasil, Canadá, Reino de

España, Estados Unidos Mexicanos, Estados Unidos de América, Bélgica, Reino de los Países Bajos, y Confederación Suiza.

### 1.3 Evaluación de riesgos asociados a la contaminación de suelos

La presencia de contaminantes en el suelo y las aguas, como factor de degradación de los recursos naturales, puede representar significativos riesgos para otros componentes del medio ambiente, en particular, la contaminación del suelo puede provocar serias consecuencias ambientales, debido a la migración de contaminantes hacia otros componentes ambientales, y por los eventuales efectos nocivos sobre el ecosistema y la salud humana.

Toda actividad productiva, produce de manera secundaria algún efecto o sustancia potencialmente peligrosa. El grado de peligro que se genere depende de muchos factores, como la cantidad a la que se está expuesto. La evaluación de riesgos es una técnica que brinda información cuantitativa relevante que permite tomar decisiones informadas para disminuir o eliminar los riesgos a la salud humana, o al medio ambiente, de manera significativa.

Se trata de una técnica multidisciplinaria que busca predecir cuantitativamente la probabilidad que se genere una respuesta adversa no deseada en una población humana específica, para ello se basa en datos obtenidos en estudios toxicológicos realizados en animales y epidemiología humana combinándolos con información sobre el grado de exposición. (MMA 2013)

El suelo, por sí mismo, no es un vector importante de dispersión de contaminantes, pero en combinación con la acción del aire y del agua puede constituir un importante foco de emisión de contaminación. Asimismo, la movilidad y destino final de los compuestos del suelo depende de varios factores, entre los cuales destacan la existencia, profundidad y dirección de escurrimiento de napas freáticas, la porosidad, la temperatura, la capacidad de adsorción e intercambio iónico de las partículas del suelo, el contenido de agua y aire, y la presencia de organismos vivos que puedan estar expuestos a un riesgo. (MMA 2011)

Para comprender lo que significa estar expuesto a un riesgo, es necesario entender lo que el termino riesgo significa. El término riesgo describe probabilidad de



exposición de éstas a las fuentes existentes, que ocurre a través de las vías de exposición, que pueden corresponder a inhalación directa, contacto directo, consumo de vegetales u otros alimentos o de agua afectada por contaminantes.

El contacto directo es, ciertamente, el mayor riesgo para la salud de la población, sobre todo cuando se trata de áreas con usos habitacionales, educacionales y/o recreativos. En tanto, la inhalación directa también reviste un factor de riesgo importante y puede producirse por el transporte de contaminantes por el aire, a través del polvo respirable en zonas aledañas al sitio contaminado. (MMA 2011)

Una vez confirmada la presencia de los tres elementos (fuente-ruta-receptor), la presencia del riesgo es probable, por lo que se hace indispensable caracterizarlo, realizando diferentes análisis que permitan describir la situación, determinando los elementos contaminantes, sus concentraciones y toxicidad, junto con los efectos que estos podrían generar en los receptores. Para esto se realiza una evaluación del riesgo, que nos permite cuantificarlo, determinando su magnitud, de manera que se pueda establecer si el riesgo es aceptable o es necesario implementar medidas para controlarlo o eliminarlo.

Se habla de riesgo aceptable o tolerable cuando la probabilidad del riesgo es baja en comparación al beneficio que trae la realización de una determinada actividad. Por ejemplo si suponemos que la probabilidad de sufrir un accidente fatal en bicicleta es de 0,05 (5 casos fatales por cada 100 accidentes) aun así se continua promoviendo el uso de la bicicleta, y se asume este riesgo como un riesgo tolerable versus el beneficio del ejercicio de esta actividad. Por lo tanto la evaluación de riesgo nos permite asignar magnitudes a los efectos adversos potenciales, resultantes de la exposición a sustancias presentes en el medio ambiente.

El no definir el riesgo de manera adecuada puede implicar el gasto innecesario de recursos económicos en la limpieza de un sitio. En América Latina, ante la pobreza, la educación insuficiente, la falta de empleos adecuados bien remunerados, y ante otras muchas carencias sociales, la cuestión ambiental no es de alta prioridad. Es decir, no es posible arriesgar la erogación de recursos económicos cuantiosos en limpieza de sitios solo por una mala definición de riesgo. (A. Ilizaliturri y col. 2009)

Por esta razón el Ministerio del Medio Ambiente implementa la “Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes”, que es una herramienta útil que permite identificar, priorizar y jerarquizar los sitios estudiados y sus fuentes de contaminación, para luego evaluar el riesgo y gestionar los suelos contaminados, mediante la ejecución de distintas etapas o fases, que fueron estandarizadas para que su implementación sea homogénea a lo largo de todo el territorio nacional y así evitar la mala designación de recursos al implementar medidas de gestión en sitios que verdaderamente no lo justifica.

#### **1.4 Guía Metodológica para la Gestión de Sitios con Potencial Presencia de Contaminantes**

En el siguiente estudio se abordara la problemática siguiendo la tercera etapa de la Guía Metodológica para la Gestión de Sitios con Potencial Presencia de Contaminantes, aprobada por el Ministerio del Medio Ambiente en resolución exenta N° 406, del 15 de Mayo de 2013, que tiene por objetivo definir los procedimientos para estandarizar la investigación de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes en el país, para lo cual se describen las etapas y procedimiento requeridos.

La metodología está compuesta por tres niveles o fases.

- **Primer nivel.** Se realiza la identificación, priorización y jerarquización sistemática de los Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC) a escala regional.
- **Segundo nivel.** Se aborda el estudio del sitio propiamente tal en forma más detallada para efectuar una evaluación preliminar sitio-específica del riesgo.
- **Tercer nivel.** Se realiza una evaluación del riesgo, que consiste en un estudio a nivel detallado, y un plan de acción para su gestión. Esto último en caso de que se determine un nivel de riesgo relevante.

A continuación, en la figura 2, se presenta un esquema que describe las distintas fases que componen la Guía Metodológica, junto con las actividades a desarrollar y los objetivos de cada una de las fases.

Nivel	Actividades	Principales Resultados
REGIONAL: Identificación, Priorización y Jerarquización	Levantamiento de Información	Actividades Potencialmente Contaminantes por Región
	Identificación y Georreferenciación de SPPC	Listado de SPPC Georreferenciado
	Priorización de SPPC	Listado Priorizado de SPPC
	Inspección de SPPC	Listado Jerarquizado SPPC
SITIO ESPECÍFICO: Evaluación Preliminar del Riesgo	Investigación Preliminar	Modelo Conceptual de la Situación de Contaminación
	Investigación Confirmatoria	Determinación Cuantitativa de la Presencia de Contaminantes
SITIO ESPECÍFICO: Evaluación del Riesgo y su Gestión	Evaluación de Riesgo Ambiental	Índices de Riesgo
	Plan de Acción	Gestión del Riesgo

**Figura 2.** Actividades Asociadas a la Investigación y Gestión de Suelos con Presencia de Contaminantes.

#### 1.4.1 Fase III. Evaluación de riesgo y plan de acción para la gestión de SPPC.

Para implementar la fase III, la metodología considera el desarrollo de dos actividades principales, la primera consiste en la evaluación del riesgo ambiental, con el fin de caracterizar el riesgo, y la segunda incluye el desarrollo y ejecución de un plan de acción para su gestión.

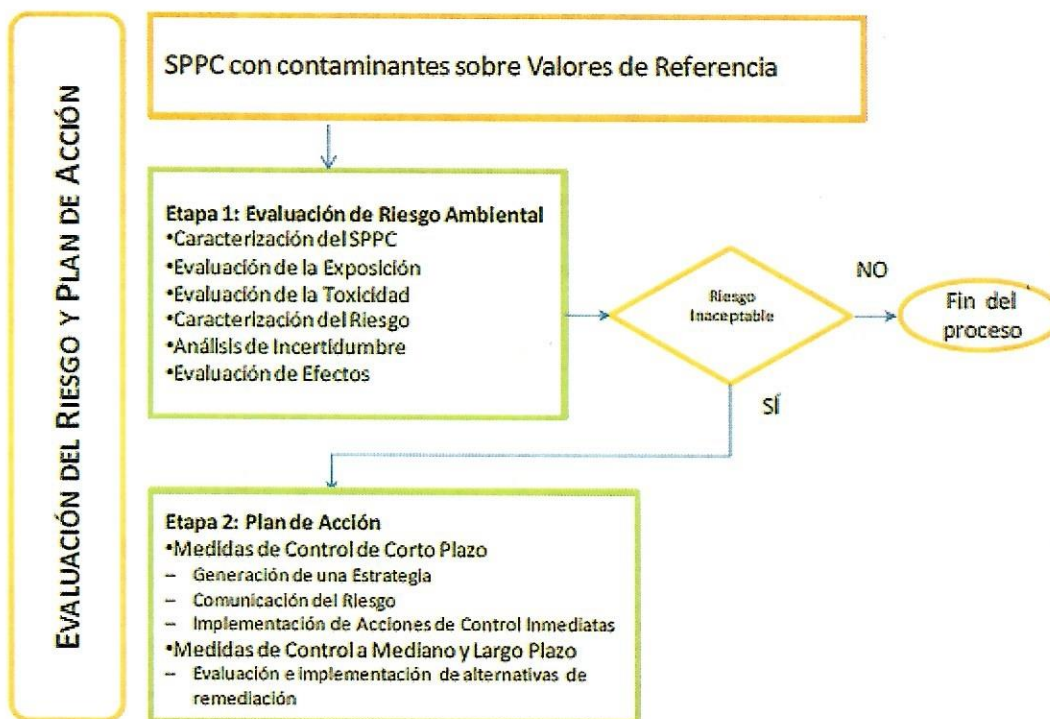


### 1.4.1.1 Evaluación de riesgo ambiental

La Evaluación de Riesgo Ambiental tiene por objetivo establecer el riesgo que la contaminación potencial presente en un lugar determinado supone para los sujetos de protección, los que pueden ser poblaciones humanas, ecosistemas u otros recursos, de acuerdo a los objetivos y características específicas del caso.

El alcance de la Evaluación de Riesgo se debe definir en cada caso. En primera instancia, la presente metodología considera solo el análisis de los riesgos para la salud humana. Dichos riesgos hacen referencia a todos aquellos efectos adversos que pueden manifestarse en un grupo de población humana expuesta a los contaminantes presentes en el suelo o en otros medios a los que hayan podido migrar desde una fuente de contaminación.

Para efectuar una Evaluación de Riesgos a la Salud Humana es necesario ejecutar las etapas, que se muestran en la figura 3.



**Figura 3.** Diagrama de Procedimiento para la Evaluación del Riesgo y Plan de Acción de SPPC

#### **1.4.1.1.1 Caracterización del SPPC**

Para comprender el problema de manera integral es necesario conocer el contexto en que se sitúa, por lo que es necesario realizar una caracterización del sitio, que contempla la recopilación de los antecedentes existentes del sitio.

Las principales actividades y datos que se requieren en esta etapa son la delimitación del área de estudio, la inspección y descripción del sitio, la determinación de las características físicas, geología, topografía, hidrogeología y meteorología, la caracterización de los receptores antrópicos y el desarrollo del plan de muestreo detallado.

El desarrollo de esta etapa tiene directa relación con las actividades futuras, ya que en función de la información recopilada se inferirán las sustancias y/o elementos presentes en el sitio que serán posteriormente evaluadas y se fundamentará la hipótesis sobre la distribución de estas sustancias y/o elementos en el ambiente.

#### **1.4.1.1.2 Evaluación de la Exposición**

Esta etapa consiste básicamente en evaluar la magnitud (actual o potencial), frecuencia y duración de la exposición a los contaminantes de interés considerando las principales rutas de exposición a las que la población está o puede estar expuesta. La información de exposición permite el cálculo de la dosis, esto es la magnitud de contaminante que ingresa al interior del organismo por contacto con la matriz ambiental potencialmente contaminada y por la ruta de exposición correspondiente.

Las principales actividades que componen la evaluación de la exposición corresponden a la identificación de:

- Vías de exposición
- Identificación de receptores y escenarios de exposición
- Desarrollo de un modelo conceptual detallado
- Selección de factores de exposición y fuentes de información
- Determinación de algoritmos para el cálculo de dosis de exposición.

Según el uso de suelo actual y/o futuro que puede presentar un sitio, junto con las posibles vías de exposición y escenarios en los que un receptor puede entrar en contacto con los contaminantes, se seleccionan los algoritmos que representen dichos escenarios para el cálculo de la dosis de exposición a la que un receptor se ve afectado.

#### **1.4.1.1.3 Evaluación de la toxicidad**

La evaluación de la toxicidad es un procedimiento para seleccionar los valores adecuados de los parámetros que miden la peligrosidad de las sustancias tóxicas presentes en el SPPC, acompañados por la calificación de la calidad de esa información. En esta etapa se identifica la toxicidad del contaminante o de los contaminantes a los cuales un receptor está o puede estar expuesto, identificando la correspondencia entre la cantidad de tóxico y la magnitud del efecto, concepto conocido como la relación dosis-respuesta

#### **1.4.1.1.4 Caracterización del Riesgo**

La caracterización del riesgo resume y combina los resultados obtenidos en la evaluación de exposición y toxicidad, ambos en expresiones cualitativas y cuantitativas. La información de toxicidad se compara contra los niveles de exposición en forma separada para sustancias o elementos cancerígenos y no cancerígenos.

#### **1.4.1.1.5 Análisis de incertidumbre**

Inevitablemente, existe una considerable incertidumbre inherente en el proceso de Evaluación de Riesgos. Estas comienzan con el uso de suposiciones e inferencias necesarias para llevar a cabo la estimación del riesgo. Por ello es importante evaluar la incertidumbre indicando los aspectos del análisis que contribuyen en mayor grado a esta, las medidas adoptadas para minimizarlas y cuál es la influencia de las incertidumbres en la caracterización del riesgo.

#### **1.4.1.1.6 Evaluación de los efectos**

El procedimiento para la Evaluación del Riesgo a la Salud explicado hasta ahora, se fundamenta en la obtención de datos ambientales para alimentar fórmulas



matemáticas, las que permiten calcular una dosis aproximada de exposición, para luego determinar si ésta podría representar un riesgo. Este camino asume un comportamiento estandarizado para toda la población. Las incertidumbres en cuanto a toxicidad, bio-disponibilidad y otros factores, se resuelven asumiendo máximo riesgo.

Otra forma complementaria de evaluar el riesgo a la salud humana es por medio de la evaluación de los efectos, es decir, determinando las consecuencias que una posible contaminación ha generado en la población y corroborar la existencia de una exposición efectiva. Esta forma de evaluar el riesgo es en general empleada por las agencias de salud pública de cada país, que en el caso chileno corresponde al Ministerio de Salud y sus respectivas reparticiones.

La evaluación de los efectos sobre la salud humana puede ser estudiada a través de un monitoreo biológico (bio-marcadores de exposición) y a través de análisis de datos estadísticos de salud.

#### **1.4.1.2 Plan de acción**

Una vez que se comprueba que el sitio en estudio constituye un Suelo con Presencia de Contaminantes (SPC), debido a que presenta un riesgo relevante y que por tanto puede constituir un riesgo para la salud de las personas, se hace necesaria la implementación de un Plan de Acción. Éste Plan de Acción debe contemplar actividades y medidas de control a corto, mediano y largo plazo, las que se detallan a continuación.

##### **1.4.1.2.1 Medidas de Control de Corto Plazo**

Las medidas de control de corto plazo están orientadas, principalmente, a la generación de una estrategia para afrontar la situación de contaminación, a informar a la comunidad sobre los riesgos encontrados y a la implementación de medidas de gestión sencillas que permitan aminorar el riesgo en forma inmediata.

##### **1.4.1.2.2 Medidas de Control a Mediano y Largo Plazo**

Las medidas de control de mediano y largo plazo se relacionan con la evaluación e implementación de alternativas de remediación que permitan disminuir el riesgo



encontrado y llevarlo a niveles aceptables de forma definitiva o a largo plazo. Estas alternativas deben asegurar la protección, en este caso, de la salud humana, a través de la eliminación/destrucción de la(s) sustancia(s) contaminante(s), la reducción de la concentración de la(s) sustancia(s) hasta niveles aceptables, el control de las rutas de exposición, o una combinación de las anteriores, que en conjunto puedan asegurar una disminución del riesgo a niveles que no representen un peligro para la salud de la población.

### **1.5 Sitio de estudio y resultados ambientales previos**

La comuna de Pica perteneciente a la provincia de El Tamarugal en la primera región de Tarapacá, se ha caracterizado desde tiempo pre hispanos por su actividad agrícola y minera.

Las explotaciones mineras más importantes en la comuna, durante La Colonia, fueron los yacimientos de cobre de Collahuasi (1880), con las minas de Pergolasi, San Eduardo, Pabellón Central, Jilguero, Cóndor, Esperanza, Poderosa, San Gregorio, Esmeraldas, Marías, Quebrada Blanca, Copaquire y Ujina, (Castro 2010), muchas de las cuales aún son explotadas como Quebrada Blanca, Ujina y Collahuasi, mientras que otras se encuentran cerradas o abandonadas como en el caso de Copaquire, ubicada en la quebrada de Guatacondo.

La presencia de estos yacimientos, y su explotación a lo largo de la historia, han ido moldeando el entorno, dejando rastros de su actividad, con residuos mineros como relaves y escóriales, pasivos ambientales que hoy en día presentan un riesgo por encontrarse cercanos a centros poblados y a cursos de agua, alterando su calidad afectando la agricultura.

Es por esto que es de suma importancia evaluar la situación de los sitios con presencia de residuos mineros, para poder realizar una gestión que permita asegurar la ausencia de riesgos para la salud y el medio ambiente natural.

Uno de los sitios de la comuna que reúne las características para ser catalogado como potencialmente contaminado, y que forma parte del catastro regional de sitios con potencial presencia de contaminantes, elaborado por la Secretaria Regional Ministerial del Medio Ambiente en el marco de la política nacional para la gestión de



**Tabla 1.** Concentraciones totales de los contaminantes metálicos estudiados para el SPPC-5 (mg/kg).

Elemento	Concentración (mg/kg)	Elemento	Concentración (mg/kg)
Níquel	62,83	Arsénico	57,08
Cobre	104,5	Cadmio	51,34
Zinc	692,8	Mercurio	0,753

De los 6 contaminantes analizados, arsénico y cadmio superan los límites de las respectivas Guías para Evaluación de Medios Ambientales (EMEG) para infantes y niños por lo que se recomienda continuar la evaluación de riesgo para estos metales respecto de receptores genéricos de tipo infantes y niños. (CENMA 2014.)

Por lo tanto en el siguiente estudio, se continuaran con los esfuerzos para la gestión del sitio, efectuando la fase III de la Guía metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes, realizando una evaluación de riesgos respecto de receptores genéricos de tipo infantes y niños, por exposición a arsénico y cadmio, junto con la realización de un análisis de lixiviación, mediante la técnica SPLP, para estimar la capacidad que tienen los contaminantes, descritos en el decreto supremo 148 (As, Cr, Hg, Pb, Se, Ba, Cd y Ag) para penetrar a napas subterráneas, comparando las concentraciones detectadas con las concentraciones máximas permisibles establecidas en el decreto supremo 148 sobre manejo de residuos peligrosos

### 1.6 Perfil toxicológico del arsénico

**Efectos a la Salud por la exposición al arsénico.** La inhalación de niveles altos de arsénico inorgánico puede producir dolor de garganta e irritación de los pulmones. La ingesta de niveles muy altos de arsénico puede ser fatal.

La exposición a niveles más bajos puede producir náusea y vómitos, disminución del número de glóbulos rojos y blancos, ritmo cardíaco anormal, fragilidad capilar y una sensación de hormigueo en las manos y los pies (ATSDR 2007). La ingesta o inhalación prolongada de niveles bajos de arsénico inorgánico puede producir oscurecimiento de la piel y el desarrollo de pequeños callos o verrugas en la palma de las manos, la planta de los pies y el torso. El contacto de la piel con arsénico



inorgánico puede producir enrojecimiento, hinchazón y queratosis (sobre crecimiento y engrosamiento del epitelio).

Poca información existe sobre los efectos de los compuestos orgánicos de arsénico en seres humanos. Algunos estudios en animales han demostrado que arsénico en forma de compuestos orgánicos es menos tóxico que sus formas inorgánicas. La ingesta de compuestos de arsénico con uno o dos metilos pueden producir diarrea y daño de los riñones. (ATSDR 2007)

**Carcinogenicidad.** El Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE.UU (DHHS), la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y la US EPA han determinado que el arsénico inorgánico es un elemento reconocido como carcinogénico en seres humanos y la US EPA lo clasifica, en su guía de evaluación de riesgos para agentes carcinogénicos (Guidelines for Carcinogen Risk Assessment) dentro del grupo A, que reúne a todos los compuestos que poseen suficiente información en humanos, para demostrar la asociación causal entre el compuesto y el cáncer en humano. (U.S. EPA. 2005.)

Lo anterior basado en que varios estudios han demostrado que la ingesta de arsénico inorgánico puede aumentar el riesgo de cáncer de piel, de hígado, de vejiga y de pulmón. Específicamente la inhalación de arsénico inorgánico puede aumentar el riesgo de cáncer del pulmón. (ATSDR 2007).

**Efectos en niños.** Hay evidencia que sugiere que la exposición prolongada al arsénico puede reducir el coeficiente de inteligencia (IQ) en niños. También hay información que sugiere que la exposición al arsénico durante la gestación y la niñez puede aumentar la tasa de mortalidad en adultos jóvenes y puede ser perjudicial para mujeres embarazadas y el feto. Los estudios en animales han demostrado que dosis altas de arsénico, que son nocivas para animales preñados, pueden producir crías con bajo peso y con defectos de nacimiento y también pueden causar la muerte de las crías. (ATSDR 2007)

## 1.7 Perfil toxicológico de cadmio

**Efectos a la Salud por la exposición al cadmio.** Respirar niveles altos de cadmio puede dañar gravemente los pulmones. Ingerir alimentos o tomar agua con

niveles de cadmio muy altos produce irritación grave del estómago causando vómitos y diarrea. La exposición prolongada a niveles más bajos de cadmio en el aire, los alimentos o el agua produce acumulación de cadmio en los riñones y posiblemente enfermedad renal. Otros efectos de la exposición prolongada consisten en daño del pulmón y fragilidad de los huesos. (ATSDR 1999)

**Carcinogenicidad.** El Departamento de Salud y Servicios Humanos de los E.E.U.U. (DHHS) y la Agencia para la Investigación del Cáncer (IARC) han determinado que el cadmio y los compuestos de cadmio son carcinogénicos en seres humanos. Mientras que la US EPA lo clasifica como probablemente carcinogénico y lo cataloga dentro del grupo B1, que agrupa a los compuestos que poseen suficiente evidencia para establecer que son carcinogénicos en animales, pero limitada evidencia para establecer que son carcinogénicos en humanos. Esto debido a la escasa evidencia en estudios de epidemiología ocupacional, donde no se puede atribuir solo al cadmio los aumentos en el desarrollo de cáncer. Sin embargo existe suficiente evidencia de carcinogenicidad en ratas por inhalación de cadmio. En cambio 7 estudios realizados en ratas, en los que se les administró sales de cadmio oralmente, no mostraron evidencia de una respuesta carcinogénica. (IRIS)

Por lo tanto los efectos carcinogénicos del cadmio son más evidentes al entrar en contacto con el receptor mediante la vía respiratoria, mientras que para las vías oral y contacto dérmico, la falta de evidencia no permite describir los efectos cancerígenos que tendría para un receptor humano entrar en contacto con compuestos de cadmio, lo que no significa que el cadmio no sea un agente carcinogénico, mediante estas vías, si no que hacen falta estudios que permitan dilucidar esta situación. (ATSDR 1999)

**Efectos en niños.** Los efectos de la exposición al cadmio en niños son similares a los efectos observados en adultos (daño del riñón, pulmón y los huesos dependiendo de la ruta de exposición). Algunos estudios en animales indican que los animales jóvenes absorben más cadmio que los adultos. Los estudios en animales también indican que los animales jóvenes son más susceptibles que los adultos a la pérdida de tejido óseo y al aumento de fragilidad de los huesos que ocurren a causa de la exposición al cadmio. No se sabe si el cadmio produce defectos de nacimiento en seres humanos. La exposición de animales a niveles altos de cadmio durante la preñez ha producido efectos nocivos en las crías. Animales jóvenes cuyas madres fueron

expuestas al cadmio durante la preñez sufrieron alteraciones del comportamiento y capacidad de aprendizaje (disminución del cociente de inteligencia, CI). También hay alguna información de estudios en animales que indica que la exposición a niveles suficientemente altos antes de nacer puede reducir el peso de las crías y afectar el desarrollo del esqueleto. (ATSDR 1999)

## **1.8 Objetivos**

### **1.8.1 Objetivo General**

- Evaluar el riesgo para la salud de las personas que supone la exposición al suelo del sitio Yacimiento Copaquire y proponer las medidas que deberían tomarse para mitigar o evitar efectos potenciales en la salud de habitantes del sector.

### **1.8.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar las condiciones ambientales del sitio en estudio, y de asentamientos aledaños, de acuerdo a antecedentes disponibles.
- Determinar el nivel de riesgo y los potenciales efectos en la salud que enfrenta o enfrentaría un asentamiento humano en el sector del Yacimiento, mediante evaluaciones de niveles de exposición y de toxicidad de las sustancias presentes en el SPPC (arsénico y cadmio).
- Determinar si las sustancias presentes en el suelo del SPPC-5, tienen la capacidad de lixiviar hacia napas subterráneas, comparando las concentraciones detectadas con el Decreto Supremo 148.
- Proponer un plan de acción para la gestión ambiental del sitio SPPC-5 en base al análisis de resultados y normativas nacionales e internacionales.



## II MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de trabajo utilizada corresponde a la propuesta por el ministerio del medio ambiente para el estudio de sitios potencialmente contaminados, que corresponde a la Guía Metodológica para la Gestión de Sitios con Potencial Presencia de Contaminantes, para lo cual se recopiló la información existente de los estudios previos realizados en el sitio por CENMA, correspondientes a las primeras dos fases de la Guía Metodológica, para luego desarrollar la fase III, que corresponde a la evaluación de riesgos ambiental, donde se evaluarán los efectos que tendría sobre la salud de las personas las dosis de exposición de los contaminantes de interés, y la posterior propuesta de un plan de acción, en el caso de que los riesgos calculados así lo ameriten.

### 2.1 Selección del sitio de estudio

El sitio seleccionado para el siguiente estudio corresponde al **SPPC-5**, también identificado como **Yacimiento Copaquire**, la selección del sitio se realizó mediante la revisión de los antecedentes presentes en el “**Diagnóstico regional de suelos abandonados con potencial presencia de contaminantes**”, prestando especial énfasis en la presencia de los tres elementos del riesgo (fuente-ruta-receptor), en el puntaje de jerarquización y en los valores EMEG de los contaminantes, donde se recomienda seguir con el estudio del sitio.

### 2.2 Evaluación de riesgo Ambiental

En la ejecución de la Evaluación de Riesgo Ambiental, se realizó una recopilación de los antecedentes cualitativos del sitio con el objetivo de realizar una caracterización del SPPC prestando especial énfasis en los datos sobre delimitación del área de estudio, características físicas, geología, topografía, hidrogeología y meteorología, recopilando la información disponible en los estudios ambientales previos realizados en el sitio. Además se realizó una caracterización de los receptores antrópicos, identificando presencia, cantidad y distribución etaria de la población. Asimismo se realizaron distintos análisis, como la evaluación de la exposición, evaluación de

toxicidad y la caracterización del riesgo, con el fin de realizar la evaluación de riesgo ambiental.

### 2.2.1 Desarrollo del plan de muestreo

Para determinar la capacidad que tienen los contaminantes para lixiviar, se realizó un análisis de SPLP, para lo cual se utilizaron las muestras del plan de muestreo desarrollado por CENMA en la investigación preliminar del riesgo. Que se desarrolló de la siguiente manera.

**Contaminantes de interés.** De acuerdo al tipo de actividades que se desarrollaban en el SPPC-5, se seleccionó como contaminantes de interés a metales y metaloides, que se asocian al desarrollo de la actividad minera y que se encuentran listados en el Decreto Supremo 148 como residuos peligrosos. Los contaminantes evaluados correspondieron a los metales (Cd, Cr, As, Pb, Se, Ag, Ba y Hg)

**Hipótesis Sobre la Distribución de los Contaminantes.** La Guía Metodológica para la gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes, recomienda la implementación de la Guía Metodológica IHOBE del País Vasco, para determinar la distribución de los contaminantes.

De acuerdo a las características del sitio de estudio y por tratarse de un antiguo yacimiento minero, es posible diferenciar áreas concretas donde se efectuaban diferentes actividades relacionadas con la minería, que corresponden a la fuente de contaminación y que se distribuyen de manera heterogénea dentro del sitio.

La Guía IHOBE determina que en los sitios mineros donde es posible diferenciar áreas concretas de contaminación, los contaminantes se distribuirán de manera heterogénea, tal como se aprecia en el sitio de estudio. Por lo tanto en el SPPC-5, se asume una distribución heterogénea de los contaminantes.

**Tamaño del Sitio.** El tamaño del SPPC se estableció de manera aproximada usando herramientas gráficas descargadas desde Google Earth Pro, lo que permite calcular áreas y perímetros con herramientas de círculos y polígonos. Para el SPPC-5 (Yacimiento Copaquire), se calculó que tiene un área aproximada de 3 hectáreas, y corresponde al área dentro del sitio donde se evidencia que se concentran los puntos donde se desarrollaban las actividades mineras.



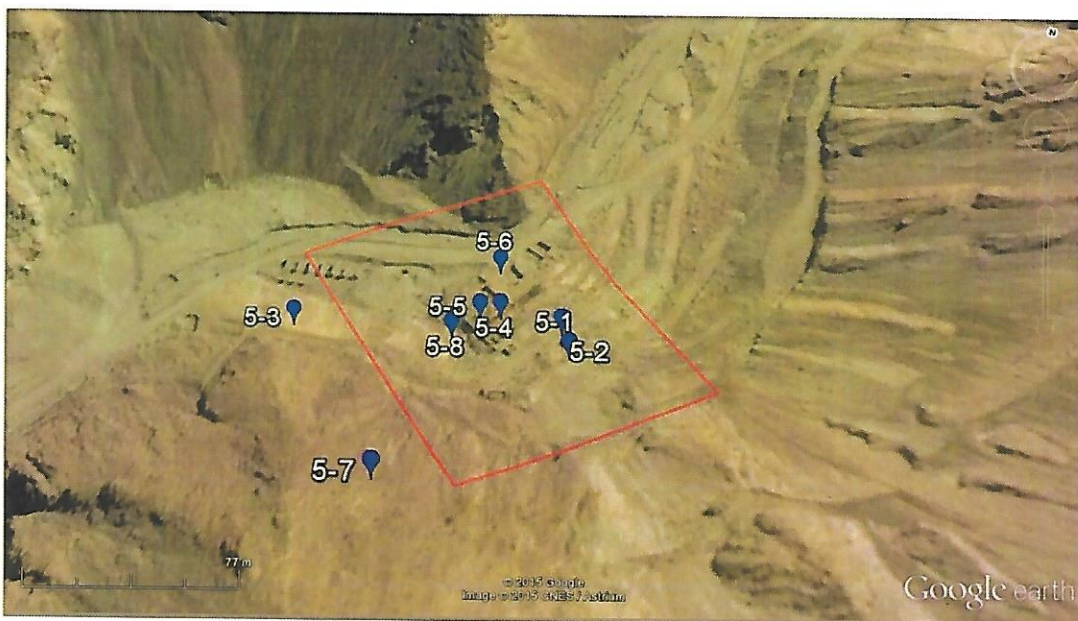
**Número y Tipo de Muestras a Obtener.** De acuerdo a las recomendaciones de la Guía Metodológica IHOBE, para un sitio con las características del SPPC-5, donde la distribución de los contaminantes es heterogénea desde una fuente conocida, el número de muestras se calcula de acuerdo al área del sitio, mediante la siguiente relación:

$$n = 5 + Ha$$

Donde  $n$  es el número de muestras y  $Ha$  el área del sitio en hectáreas, de manera que para el SPPC-5,  $n$  es igual a 8.

Es decir que se tomaron 8 muestras puntuales a nivel superficial-subsuperficial (0-20 cm). Esta profundidad representa un estimado razonable del contacto dérmico con suelos contaminados por uso agrícola actual o futuro.

En la figura 4 se muestra la distribución espacial de los puntos de muestreo, y si bien los puntos 5-3 y 5-7 aparecen fuera del perímetro muestreo, estos se incorporan por evidenciar rastros de actividad minera.

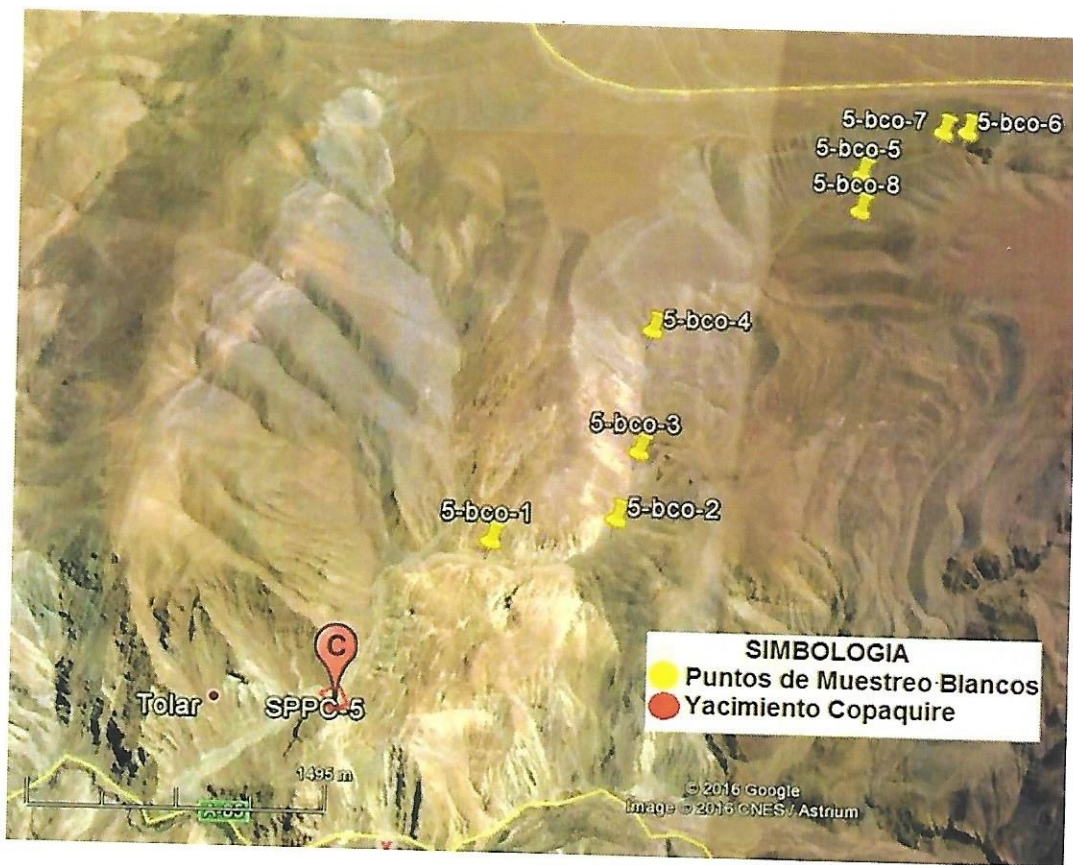


**Figura 4.** Ubicación de los puntos de toma de muestras para el SPPC-5  
Yacimiento Copaquire



**Muestras de Control.** La Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes establece que se entiende por niveles basales o background a “la concentración natural de un elemento químico en el suelo que no ha sido alterado por la actividad humana, localizado en las cercanías del suelo y/o sitio con presencia de contaminantes”. Por lo que se identificó un área libre de intervención antrópica en las cercanías del SPPC-5 donde se procedió a tomar las muestras control.

Como en Chile, al presente, no se cuenta con una norma o estándar de calidad de suelo, ni tampoco se han realizado estudios de línea base que determinen los niveles naturales de los elementos presentes en el suelo, tampoco se cuenta con una metodología establecida para determinar los niveles naturales de metales en el suelo, por lo que se tomaron un numero de muestras control igual al número de muestras tomadas en el sitio, con el fin de que estas muestras control sean representativas del lugar.



**Figura 5.** Ubicación de los puntos de muestreo de línea base

El muestreo fue realizado por personal del Laboratorio de Química Ambiental de CENMA, el día 10 de mayo de 2014. Las muestras fueron tomadas de acuerdo a los protocolos establecidos y en cada punto se establecieron documentadamente las coordenadas del lugar y las condiciones del muestreo (fecha, hora, condiciones del tiempo) utilizando los formularios FLQAM-000102, registro de Cadena de Custodia y FLQAG-060004 muestreo de suelos y sedimentos.

A continuación se presentan las coordenadas de los puntos de muestreo, en la tabla 2.

**Tabla 2.** Coordenadas puntos de muestreo SPPC-5, Yacimiento Copaquire

<b>Identificación punto de muestreo</b>	<b>Tipo de muestra obtenida</b>	<b>Coordenada E UTM (Huso 19s)</b>	<b>Coordenada N UTM (Huso 19s)</b>
5—1	Muestra-SPPC	511315	7686370
5—2	Muestra-SPPC	511319	7686360
5—3	Muestra-SPPC	511219	7686366
5—4	Muestra-SPPC	511293	7686375
5—5	Muestra-SPPC	511286	7686374
5—6	Muestra-SPPC	511289	7686395
5—7	Muestra-SPPC	511267	7686308
5—8	Muestra-SPPC	511278	7686365
5--Bco-1	Blanco-SPPC	511893	7687136
5--Bco-2	Blanco-SPPC	512506	7687311
5--Bco-2d	Duplicado-terreno	512506	7687311
5--Bco-3	Blanco-SPPC	512566	7687673
5--Bco-4	Blanco-SPPC	512543	7688336



Identificación punto de muestreo	Tipo de muestra obtenida	Coordenada E UTM (Huso 19s)	Coordenada N UTM (Huso 19s)
5--Bco-5	Blanco-SPPC	513547	7689371
5--Bco-6	Blanco-SPPC	514096	7689670
5--Bco-7	Blanco-SPPC	513968	7689668
5--Bco-8	Blanco-SPPC	513555	7689097

### 2.2.2 Evaluación de la exposición

Esta etapa consiste básicamente en evaluar la magnitud (actual o potencial), frecuencia y duración de la exposición a los contaminantes de interés considerando las vías principales a las que la población está o puede estar expuesta. La información de exposición permite el cálculo de la dosis de exposición, esto es la magnitud de contaminante que ingresa al interior del organismo por contacto con la matriz ambiental potencialmente contaminada y por la ruta de exposición correspondiente.

En este estudio se consideraron 2 escenarios posibles de exposición, que corresponden a la ingesta de suelo contaminado y al contacto dérmico con suelo contaminado.

**Ingesta de suelo.** Mediante la siguiente expresión se pudo calcular la ingesta media diaria asociada al consumo accidental (o voluntaria, en el caso de niños) de suelo o polvo con presencia de contaminantes:

$$I = 10^{-6} * \frac{C_s T I_s}{P} * \frac{TE}{PE}$$

(EC. 1)

Dónde:

I = Ingesta media diaria de contaminante debido a ingesta de suelo o polvo con presencia de contaminantes (mg/kg·día)

C s = Concentración del contaminante en el suelo (mg/kg)



TI s = Tasa de ingestión de suelo o polvo contaminado (mg/día)

P = Peso corporal (kg)

TE = Tiempo de exposición (día)

PE = Periodo de exposición (día)

**Contacto Dérmico con Suelo.** La exposición por contacto dérmico con suelo con presencia de contaminantes puede tener lugar tanto en ambientes exteriores como interiores. El segundo supuesto se considerará siempre que sea posible asumir que se produce la movilización de partículas de suelo con presencia de contaminantes en forma de polvo y que éste alcanza un espacio interior ocupado por receptores.

A continuación se presenta la expresión que con la que se calculó la dosis de exposición por contacto dérmico con suelo.

$$I_{ds} = 10^{-6} * \frac{C_s * S_c * AD * ABS}{P} * \frac{T_E}{P_E} \quad (\text{EC. 2})$$

Dónde:

I<sub>ds</sub> = Dosis absorbida media diaria debido a contacto dérmico con polvo o suelo con presencia de contaminantes (mg/kg·día)

C<sub>s</sub> = Concentración del contaminante en el suelo (mg/kg)

S<sub>c</sub> = Superficie corporal expuesta (cm<sup>2</sup>/día)

AD = Factor de adherencia suelo-piel (mg/cm<sup>2</sup>)

ABS = Factor de absorción dérmica (a dimensional)

P = Peso corporal (kg)

TE = Tiempo de exposición (día)

PE = Período de exposición (día)

### 2.2.3 Selección de factores de exposición

Los factores de exposición humana son variables que describen características biológicas y fisiológicas del receptor humano y que permiten el ingreso de sustancias químicas al organismo. Por ejemplo peso corpóreo, volumen de aire inspirado por hora o por día, agua ingerida por día, tasa diaria de alimento ingerido, superficie dérmica de

cada parte del cuerpo, absorción dérmica por día. Existe amplia información respecto a los valores máximos, mínimos, mediana y diversas circunstancias que definen los factores de exposición.

Una fuente de información que se destaca es el Exposure Factors Handbook, cuya última versión fue publicada por U.S.EPA en 2011. En este documento aparece la información necesaria para conducir un análisis de exposición.

#### **2.2.4 Evaluación de toxicidad**

La evaluación de la toxicidad es un procedimiento para seleccionar los valores adecuados de los parámetros que miden la peligrosidad de las sustancias tóxicas presentes en el SPPC. Para lo cual se seleccionaron las dosis de referencia de los contaminantes, a partir de distintas entidades gubernamentales (como USEPA y Health Canadá). Las dosis de referencia se utilizan para el cálculo de los cocientes de peligro para efectos no carcinogénicos y el riesgo extra de cáncer de por vida, para efectos carcinogénicos.

#### **2.2.5 Caracterización del Riesgo**

La caracterización del riesgo resume y combina los resultados obtenidos en la evaluación de exposición y toxicidad, ambos en expresiones cualitativas y cuantitativas. La información de toxicidad se compara contra los niveles de exposición en forma separada para sustancias o elementos cancerígenos y no cancerígenos.

**Efectos carcinogénicos.** La evaluación de los efectos carcinogénicos se realiza mediante el cálculo del el Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV), que se calculó separadamente para cada ruta de exposición (ingesta y contacto dérmico) mediante la siguiente expresión:

$$\text{RECV} = \text{FPC} \times \text{DOSIS} \quad (\text{EC. 3})$$

Donde

RECV: riesgo extra de cáncer de por vida

FPC: factor de potencia cancerígena

DOSIS: dosis de exposición del contaminante a la que un receptor se ve expuesto

**El Riesgo Extra de Cáncer de por Vida total.** Corresponde a la sumatoria de los RECV calculados para cada ruta de exposición mediante la siguiente expresión:

$$\text{RECV}_{\text{total}} = \text{RECV}_{\text{ingesta}} + \text{RECV}_{\text{dermal}} \quad (\text{EC. 4})$$

El criterio para establecer si el RECV es aceptable o no, depende de la legislación de cada país, como Chile no cuenta con dicho criterio, se utilizan criterios extranjeros que pueden ser  $10^4$ ,  $10^5$  y  $10^6$ , dependiendo de la permisividad que se le dé, para este caso de estudio se seleccionó el criterio menos permisivo por lo tanto el más riguroso, que corresponde a  $10^4$ , de tal manera que si  $\text{RECV} > 10^4$ , el riesgo se considera biológicamente significativo e inaceptable.

**Efectos crónicos no carcinogénicos.** La evaluación de los efectos crónicos no cancerígenos se realiza mediante el cálculo del cociente de peligro (CP) para cada ruta de exposición (ingesta y contacto dérmico) mediante la siguiente expresión.

$$\text{CP} = \text{Dosis} / \text{RfD} \quad (\text{EC. 5})$$

Dónde:

CP: Cociente de peligro

Dosis: dosis de exposición de contaminante a la que un receptor se ve expuesto

RfD: dosis de referencia bajo la cual no se observan efectos adversos para la salud.

A partir de los CP calculados para las diferentes rutas (un mismo contaminante) se calculó posteriormente el **Índice de Peligro IP**, como la sumatoria de los cocientes de peligro individuales y por período de exposición, mediante la siguiente expresión

$$\text{IP} = \text{CP1} + \text{CP2} + \text{CP3} \quad (\text{Ec. 6})$$

Ahora si  $\text{IP} > 1$ , se considera que el sitio podría generar efectos adversos a la salud y mientras más alto el valor, mayor será el efecto adverso observado.



## 2.3 Metodologías de Análisis Químico

Los análisis de laboratorio fueron efectuados en el Laboratorio de Química Ambiental del Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA). Dicho laboratorio cuenta con acreditación por parte de INN (Instituto Nacional de Normalización, entidad legalmente facultada para acreditaciones) de la Norma NCh-ISO17025 la cual establece los requisitos generales relativos a la competencia técnica de los laboratorios de ensayo y calibración.

A su vez cuenta con certificaciones por parte de ABS Quality de la norma ISO 9001-2008 que establece los requisitos para el sistema de gestión de la calidad. Ello, implica que los análisis realizados en el presente estudio han sido sometidos a procedimientos previos de validación y cuentan con protocolos descritos de análisis. Los parámetros analíticos de aceptabilidad de los análisis realizados se encuentran en las figuras 14 y 15 de los anexos, al igual que las condiciones del ICP-OES. Los ácidos y reactivos utilizados son de grado para análisis (p.a).

### 2.3.1 Equipos y materiales

Tabla 3. Equipos y materiales utilizados en los análisis químicos

Equipos y materiales	Equipos y materiales	Equipos y materiales
Chancadora	Baño de agua	Gradilla
Mortero	Embudo de filtración	Pipeta aforada 1, 5, 8, 15 y 100 mL
Balanza de laboratorio PCE-BSH 10000	Tubos de centrifuga 15mL	Agitador rotatorio velocidad angular de $30 \pm 2$ r.p.m, MRH-07
Espátula desechable	pH metro HANNA PH211	Parafilm
Matraz de aforo 100, 200 y 1000 mL	Plancha calefactora	Guantes de nitrilo
Botella HDEP 500 mL	Agitador magnético Stuart CB 302	Propiteta
Equipo Analizador ICP-OES Perkin Elmer modelo AAnalyst 700	Filtro fibra de vidrio borosilicato, sin material aglutinante, 0,7 mm 90 mm de diámetro.	Equipo Analizador EAA Perkin Elmer modelo Optima3300XL

### 2.3.2 Reactivos

Tabla 4. Reactivos utilizados en el análisis químico

Reactivos	Reactivos
Ácido nítrico concentrado Merck p.a	Permanganato de Potasio Merck p.a
Ácido nítrico 10% Merck p.a	Persulfato de Potasio Merck p.a
Ácido sulfúrico concentrado Merck p.a	Hidroxilamina Merck p.a
Ácido clorhídrico concentrado Merck p.a	Sulfato de sodio Merck p.a
Ácido clorhídrico 10% Merck P.A	Boro hidruro de Sodio Merck p.a
Agua desionizada p.a	Gas Argón
Standard de Hg 100 ppb Lsol-13-1544	Standard de metales 100 ppm High purity standards QCS-26

### 2.3.3 Detección de metales lixiviados por SPLP (synthetic precipitation leaching procedure)

La aplicación del Procedimiento de lixiviación por precipitación (lluvia) sintética (SPLP: Synthetic Precipitation Leaching Procedure) está pensado como una herramienta de evaluación para el peor escenario posible en el mal manejo de un residuo. En el cual bajo condiciones de descomposición pudiese contaminar un acuífero. El presente procedimiento está basado en la NCh 2746. Of2003 sobre determinación de movilidad de analitos orgánicos e inorgánicos.

#### 2.3.3.1 Procedimiento de lixiviación por precipitación (lluvia) sintética.

Consiste en estimar la movilidad de los analitos productos de la lixiviación que se podría generar cuando un contaminante, que se encuentre en la parte superficial del suelo, se ve expuesto a eventos de lluvia acida.

La extracción de los metales a partir de la muestra sólida de suelo se realiza utilizando 2 extractantes diferentes dependiendo del contenido de carbonatos de la muestra, que se evalúa cualitativamente, añadiendo 2 mL de ácido nítrico (p.a) al 65% a una pequeña porción de muestra sólida, la liberación de CO<sub>2</sub> mediante burbujas indicaría la presencia de carbonatos.

**Disolución de extracción N° 1.** Se prepara a partir de agua para análisis, en un recipiente de 50 l, al que se le añaden 0,5 l de una mezcla de ácido sulfúrico concentrado al 95% (p.a) con ácido nítrico concentrado al 65% (p.a), preparada en una relación de 60/40, para obtener un pH de  $4,20 \pm 0,05$ . Este fluido se utiliza para determinar la movilidad de analitos de un suelo que manifieste presencia de carbonato.

**Disolución de extracción N° 2.** Se prepara a partir de agua para análisis, en un recipiente de 50 l, al que se le añaden 0,45 l de una mezcla de ácido sulfúrico concentrado al 95% (p.a) con ácido nítrico concentrado al 65% (p.a) preparada en una relación de 60/40, para obtener un pH de  $5,00 \pm 0,05$ . Este fluido se utiliza para determinar la movilidad de analitos de un suelo libre de carbonato.

Para simular la lixiviación, se introducen 20 g de muestra en frascos de 0,5 L y se agregan 400 g, del extractante correspondiente, a cada muestra. Los frascos son puestos en agitador rotatorio modelo MRH-07 ( $30 \pm 2$  rpm) por  $18 \pm 2$  horas a temperatura constante  $25^{\circ}\text{C}$ . Las muestras son filtradas apartando 2 alícuotas de 25 mL, para analizar el contenido de Mercurio mediante Espectrometría de Absorción Atómica utilizando un equipo Perkin Elmer AAnalyst 700 y otra para análisis de metales mediante un espectrómetro de plasma inductivamente acoplado Perkin Elmer modelo Optima 3300 XL (figura 6), que permite registrar las intensidades de emisión a diferentes longitudes de onda y cuantificar los elementos de interés mediante interpolación en sus respectivas curvas de calibración. Este procedimiento permite determinar los contenidos de metales en muestras sólidas y líquidas.





**Figura 6.** Espectrómetro de plasma inductivamente acoplado Perkin Elmer modelo Optima 3300 XL

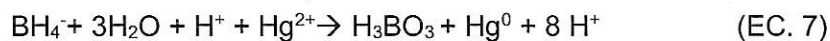
Las concentraciones detectadas de los contaminantes de interés serán comparadas con las concentraciones máximas permisibles que establece el Decreto Supremo 148 sobre manejo de residuos peligrosos para determinar si estos se presentan en concentraciones que pudiesen presentar riesgos para la salud pública o efectos adversos para el medio ambiente.

### 2.3.4 Determinación de mercurio mediante Espectrometría de Absorción Atómica (EAA-VP)

La determinación de mercurio lixiviado se realizó mediante el método EPA 7470, que es una técnica de absorción atómica por vapor frío, basada en la absorción de radiación de vapor de mercurio a 253,7 nm.

La solución es digerida con ácido sulfúrico, ácido nítrico, permanganato de potasio y persulfato de potasio con el fin de oxidar los compuestos órgano- mercurio a ión mercúrico. Luego de enfriar la solución se agrega cloruro de hidroxilamina con sulfato de sodio para reducir el exceso de permanganato. El mercurio es reducido a su estado elemental, mediante la adición de boro hidruro de sodio, y es arrastrado de la solución a una celda posicionada en un paso óptico del espectrómetro de absorción atómica. La absorbancia es medida en función de la concentración de mercurio. (EPA 1994)

A continuación se presenta la ecuación de reducción de mercurio por boro hidruro de sodio.



**Figura 7.** Equipo de Absorción Atómica Perkin Elmer modelo AAAnalyst 700



### **2.3.5 Determinación de pH**

La determinación del pH se realiza siguiendo el instructivo ILQAS-0001, donde 20 g de muestra de suelo se mezclan con 20 ml de agua desionizada (en relación 1:1), se agita durante 1 hora y se mide el pH de la solución sobrenadante utilizando el pH metro HANNA PH211, con un electrodo HI 1043, previamente calibrado con soluciones estándares de pH 4 y pH 7 Merck, a temperatura ambiente.

### **2.4 Comparación con Decreto Supremo 148, sobre manejo de residuos peligrosos.**

El reglamento sobre manejo de residuos peligrosos, establece las condiciones sanitarias y de seguridad mínimas a que deberá someterse la generación, tenencia, almacenamiento, transporte, tratamiento, rehusó, reciclaje, disposición final y otras formas de eliminación de los residuos peligrosos.

Se entiende como residuo peligroso a cualquier residuo o mezcla de residuos que presenta riesgo para la salud pública y/o efectos adversos al medio ambiente, ya sea directamente o debido a su manejo actual o previsto, como consecuencia de presentar algunas de las características señaladas en el artículo 11 del presente reglamento, es decir si el residuo presenta cualquiera de las siguientes características, toxicidad aguda, toxicidad crónica, toxicidad extrínseca, inflamabilidad, reactividad y corrosividad.

Dentro de las sustancias catalogadas como tóxicas se encuentran algunos metales pesados y cuando la eliminación se haga a través de su disposición final en el suelo se considerará que el respectivo residuo es catalogado como tóxico, cuando el Test de Toxicidad por Lixiviación arroje, para cualquiera de las sustancias mencionadas, concentraciones superiores a las descritas por el Decreto Supremo.

A continuación, en la tabla 5, se presentan las concentraciones máximas permisibles establecidas por el Decreto Supremo 148 para metales pesados que corresponden a los contaminantes de interés en este estudio.



**Tabla 5.** Concentraciones Máximas Permisibles según decreto supremo 148

Sustancia	CMP (mgL <sup>-1</sup> )	Sustancia	CMP (mgL <sup>-1</sup> )
Arsénico	5	Selenio	1
Cromo	5	Bario	100
Mercurio	0,2	Cadmio	1
Plomo	5	Plata	5

### III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Caracterización del sitio de estudio

##### 3.1.1 Delimitación del sitio

El sitio con potencial presencia de contaminantes estudiado, corresponde al Yacimiento Copaquire, identificado en el listado regional de sitios con potencial presencia de contaminantes como SPPC-5, se ubica en la comuna de Pica, perteneciente a la provincia de El Tamarugal en la Región de Tarapacá. Se ubica entre los 3500-4000 msnm. Sus coordenadas UTM son 7686723N; 511504E (DATUM WGS 84 Huso 19) y corresponde a una propiedad privada perteneciente a la minera Teck Resources Chile que la adquirió el año 2013 de la canadiense International PBX Venture.

El sitio se ubica a 17 km al Este de la localidad de Guatacondo, entre un sistema de quebradas compuesto por las quebradas Copaquire, El Sulfato y Guatacondo. Abarca un área de 3 Ha y se accede a él por la ruta A-85. En la figura se representa el sitio denominado Yacimiento Copaquire, delimitado por la línea roja.



**Figura 8.** Delimitación del sitio SPPC-5, Yacimiento Copaquire

### 3.1.2 Inspección del sitio

En el sitio se pudo identificar los siguientes sectores en los que se desarrollaron distintas actividades asociadas a la extracción de mineral, donde se acumulan los residuos.

- Zona de chancado y molienda (Chancador y molino de bolas)
- Botaderos de rios de lixiviación
- Depósito de Relaves, tranque de relaves (derrame).
- Piscinas de Lixiviación
- Sector industrial (banco de celdas, precipitador, canchas de secado)

En cuanto a los sistemas de protección o contención de posibles agentes contaminantes, cabe destacar que el sitio no posee cierre perimetral ni terreno delimitado, al igual que los puntos de vertido, ya que los residuos se encontraron dispersos de forma heterogénea sin definición de áreas confinadas o específicas.

### 3.1.3 Descripción de los procesos productivos

En el sitio de estudio es posible identificar distintas zonas donde se desarrollaban los procesos productivos asociados a la minería de Oro, Plata y Cobre. De acuerdo a la evidencia histórica es presumible que la extracción de los metales a partir de la roca se realizaba mediante la adición de ácido sulfúrico y cianuro. De esta manera los procesos productivos pudieron ser los siguientes.

1. **Chancado:** Fragmentación del mineral.
2. **Molienda:** Reducción del mineral fragmentado a partículas más finas.
3. **Flotación:** Proceso fisicoquímico de tres fases (sólido-líquido-gas) que tiene por objetivo la separación de especies minerales mediante la adhesión selectiva de partículas minerales a burbujas de aire.
4. **Lixiviación:** Extracción sólido-líquido, es un proceso en el que un disolvente líquido pasa a través de un sólido pulverizado para que se produzca la disolución de uno o más de los componentes solubles del sólido de interés
5. **Precipitación:** Las sustancias con que se precipitan los metales de interés minero, a partir de las soluciones cianuradas diluidas pueden ser: zinc o carbón activado.



### **3.1.4 Características geológicas**

Copaquire se encuentra en la pre-cordillera de la Región de Tarapacá a unos 3.500 – 4.000 m.s.n.m., en la zona de tránsito entre la Pampa interior o Tamarugal y la Cordillera de Los Andes o altiplano, entre los sistemas de quebradas correspondiente a Copaquire, El Sulfato y Guatacondo.

Las laderas de los cerros presentes en el sitio se encuentran fuertemente disectadas por los sistemas de quebradas que, en sentido norte-sur, convergen hacia la Quebrada Guatacondo.

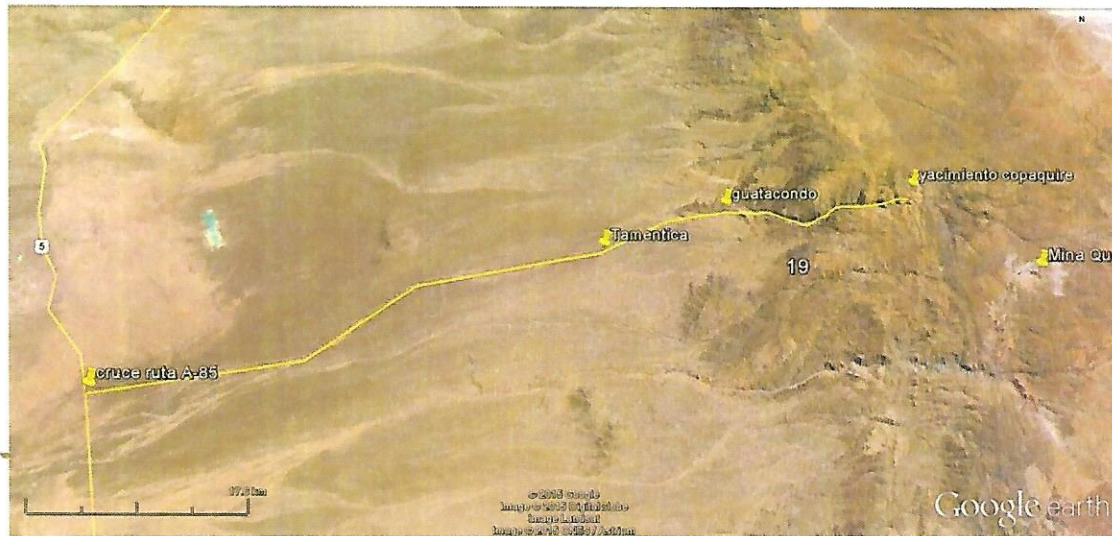
El SPPC-5 Yacimiento Copaquire se ubica sobre un tipo de suelo Eoceno-Oligoceno (42-31 Ma) con Pórfidos granodioríticos, monzoníticos, dioríticos, dacíticos y riolíticos de biotita y hornblenda, portadores de mineralización de tipo 'Pórfido cuprífero gigante'

### **3.1.5 Identificación de la topografía y accesos**

El sitio se encuentra a orillas de la Ruta A-85, a la cual se accede desde la Ruta-5, a aproximadamente 100 km al sur del acceso a la ciudad de Iquique.

La Ruta A-85 parte desde la Ruta-5 hacia el Este, atravesando la Pampa del Tamarugal, bordeando el río Guatacondo, hasta adentrarse en la pre-cordillera, pasando por diferentes poblados entre los que se destacan Tamentica y Guatacondo, siendo este último el centro poblado más importante cercano al sitio de estudio ubicado a 17 km al Este de Guatacondo.

Siguiendo por la Ruta A-85, hacia el Este, pasando el sitio de estudio, a aproximadamente 15 km, se encuentra la Mina Quebrada Blanca y siguiendo por la misma ruta se encuentra la Mina Collahuasi.



**Figura 9.** Acceso a SPPC-5 Yacimiento Copaquire

### 3.1.6 Climatología local

El clima en el sitio de estudio corresponde a un clima desértico marginal de altura, que se caracteriza por ser generalmente árido con temperaturas, que en verano van desde los 10°C a más de 25°C y en invierno de unos cuantos grados bajo cero hasta los 15 °C.

Las precipitaciones son muy escasas en el sector, sin embargo son mayoritarias en verano, durante los meses de Enero, Febrero y Marzo, durante el denominado invierno Altiplánico, registrándose hasta 100 mm anuales, estas precipitaciones se caracterizan por su alta intensidad y corta duración, provocando la crecida esporádica del río Guatacondo, produciendo anegamientos y arrastre de material a lo largo de la Quebrada Guatacondo.

Excepcionalmente se pueden observar ligeras precipitaciones solidas (en forma de nieve) durante los meses de Junio y Julio.

### **3.1.7 Características hidrogeológicas, existencia y calidad de agua subterránea e identificación de cursos de agua superficial**

#### **3.1.7.1 Agua Subterránea**

El norte de Chile se caracteriza por su clima árido, donde los recursos hídricos son escasos, sin embargo es posible encontrar diferentes cursos de agua, tanto superficiales como subterráneos, que se encuentran en estrecha relación y que son responsables de mantener los escasos ecosistemas vulnerables como bofedales, humedales y salares.

Estos recursos hídricos son recargados durante el verano, mediante las precipitaciones del invierno Altiplánico, generándose una estrecha correlación entre las precipitaciones y la altitud, observándose que estas aumentan a medida que lo hace la altitud (Oyarzun y Oyarzun 2009), de tal forma que las precipitaciones sobre los 3500 msnm, pueden ser responsables de la recarga de los acuíferos, (Houston J. 2001), que dotaran de agua a bofedales y humedales que afloran entre los 2000 a 2500 msnm.

Debido a la escases de recursos hídricos, tanto subterráneos como superficiales, y al equilibrio que presentan en sus estados naturales, es que sus usos se encuentra limitados y deben restringirse al mínimo, para no afectar el equilibrio natural del sistema y asegurar la conservación del ecosistema.

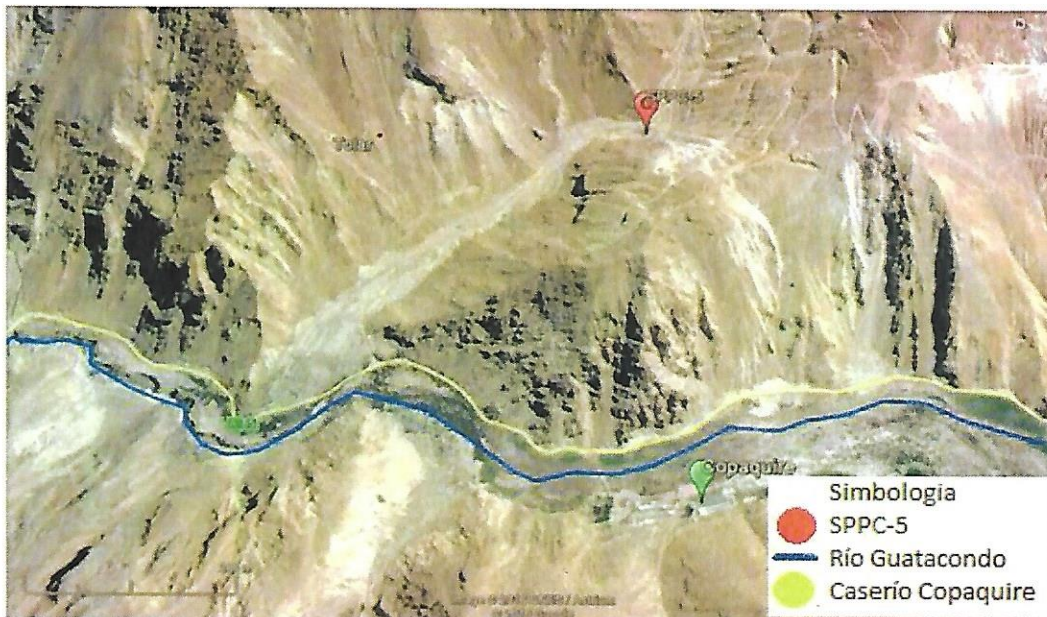
El principal acuífero del sector corresponde al acuífero del Salar de Llamara, que recibe recargas de las quebradas Guatacondo, Maní y Mal Paso, entre otras. Cabe destacar que la DGA no realiza ningún monitoreo hidrogeológico del acuífero a pesar de que la Compañía Minera Soquimich hace uso de las aguas de este acuífero para desarrollar sus actividades mineras.

#### **3.1.7.2 Agua Superficial**

En las cercanías del sitio de estudio, a aproximadamente 1 kilómetro de distancia se encuentra el río Guatacondo, cuyas aguas son utilizadas por el poblado del mismo nombre, tanto para consumo como para riego.



En la figura 10 se observa la distancia entre el sitio de estudio (SPPC-5), con el Río Guatacondo y con los receptores más cercanos (Caserío Copaquire)



**Figura 10.** Cercanía del sitio de estudio con el Río Guatacondo y el Caserío Copaquire

### 3.1.8 Caracterización de los receptores antrópicos.

#### 3.1.8.1 Localización

En las cercanías del SPPC-5 se pueden encontrar 2 grupos de receptores, el primero corresponde a una familia, compuesta por 3 integrantes, que viven en el caserío Copaquire, a aproximadamente 1000 m del sitio, que se sustenta de la agricultura y ganadería. Y el segundo grupo, corresponde a los receptores del poblado Guatacondo, con una población aproximada de 80 habitantes, quienes hacen uso de las aguas provenientes del río Guatacondo.

#### 3.1.8.2 Presencia de subpoblaciones sensibles.

En el año 2009, se realizó el proyecto Sistema de Energización Sustentable para Guatacondo, que consistió en la implementación de 3 fuentes de energías renovables no convencionales. Dentro de los estudios de dicho proyecto se constató mediante una

encuesta, que la población total de la localidad es de 78 habitantes. El 14% corresponde a niños entre 6 y 14 años; un 18% tienen entre 20 a 49 años y cerca de un 68% tienen entre 50 y 89 años. El bajo porcentaje de personas entre 20 y 49 se debe a la alta tasa de migración producto de la falta de trabajo y estudios.

Por otra parte, el alto porcentaje de población entre 50 y 89 años se debe al arraigo que presentan los habitantes de la localidad, ya que, a cierta edad deben migrar por los motivos antes mencionados, pero una vez jubilados, deciden reinstalarse en el pueblo. (Natalia Garrido 2010)

**Patrones de actividad de los receptores.** La actividad económica predominante es agricultura de subsistencia, ya que, la producción no es suficiente para vender a otras localidades. La población se dedica al cultivo de alfalfa para sus animales; frutales, en su mayoría cítricos, membrillos y peras de pascua. Por otra parte, las familias practican la ganadería para autoconsumo, tienen en su mayoría cuyes y conejos

### **3.2 Evaluación de la Exposición**

Las actividades principales del estudio de evaluación de la exposición son las siguientes:

- Identificación de vías de exposición
- receptores y escenarios de exposición
- desarrollo de un modelo conceptual detallado
- determinación de algoritmos para el cálculo de dosis de exposición
- selección de factores de exposición y fuentes de información

#### **3.2.1 Identificación de vías de exposición**

De acuerdo al modelo conceptual descrito, se identifica la presencia de las siguientes vías de exposición:

- Ingesta
- Inhalación de partículas
- Contacto dérmico



### 3.2.1.1 Receptores y escenarios de exposición

Los receptores más cercanos al SPPC-5 (< 1000 m), por lo tanto los potencialmente más expuestos al riesgo corresponden a los habitantes del caserío Copaquire, junto con los habitantes del poblado Guatacondo. Que se pueden ver expuestos a los contaminantes mediante los siguientes escenarios de exposición.

**Inhalación de partículas.** Los contaminantes pueden ser movilizados, desde la fuente de contaminación, correspondiente a piscinas de lixiviación con residuos mineros, mediante transporte eólico, incorporándose al aire, el cual es respirado por los receptores, provocando la inhalación de partículas contaminantes.

**Ingesta.** Se pueden presentar dos escenarios de exposición para esta vía de exposición. La primera ocurre cuando los contaminantes son movilizados desde la fuente mediante escorrentía, incorporándose a las aguas superficiales, que puede ser bebida por los receptores del caserío. Mientras que la segunda corresponde a la ingesta accidental de suelo, al cual los receptores tienen acceso debido a la falta de cierre perimetral en el sitio.

**Contacto dérmico.** En esta vía de exposición también se identifican 2 posibles escenarios de exposición, el primero ocurre cuando por acción del transporte eólico, los contaminantes son incorporados al aire y este se deposita sobre la piel de los receptores. Mientras que el segundo ocurre, cuando por acción de la escorrentía, los contaminantes son incorporados a las aguas superficiales, las que son utilizadas por los receptores en sus necesidades básicas de aseo.

### 3.2.1.2 Desarrollo de un modelo conceptual detallado

De acuerdo con la información recopilada y a las características propias del sitio y sus receptores, es posible describir la situación en que se encuentra el SPPC-5 respecto a las interrelaciones de la cadena de riesgo, identificando los componentes ambientales potencialmente contaminados, los mecanismos de transporte, las vías de exposición y los receptores potenciales, de tal manera que es posible representarlo mediante el diagrama que se presenta en la figura 11.



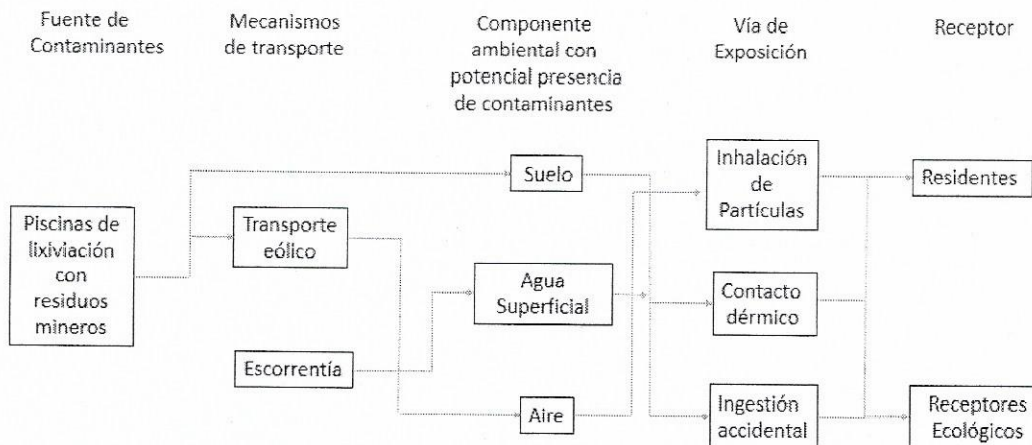


Figura 11. Diagrama de modelo conceptual del SPPC-5.

### 3.2.1.3 Determinación de algoritmos para el cálculo de dosis de exposición

De acuerdo a las vías de exposición identificadas en el SPPC-5, que corresponden a inhalación de partículas, contacto dérmico e ingesta, y a los escenarios de exposición, se seleccionan los algoritmos correspondientes a tales escenarios, sin embargo debido a la falta de información referida a las concentraciones de contaminantes en los componentes ambientales agua y aire, es imposible aplicar los logaritmos para el cálculo de ingesta de agua contaminada, de inhalación de partículas y de contacto dérmico con agua contaminada.

De tal manera que se seleccionan los algoritmos para el cálculo de ingesta media diaria de contaminante debido a la ingesta de suelo o polvo con presencia de contaminantes, correspondiente a la ecuación 1, y de la dosis absorbida media diaria debido a contacto dérmico con polvo o suelo con presencia de contaminantes, correspondiente a la ecuación 2.

El no incorporar la ruta de exposición por inhalación de partículas en los cálculos influye directamente en el resultado del índice de peligro total, que combina el aporte del riesgo de las tres rutas de exposición. Por lo tanto es necesario tener claro que el índice de peligro total calculado en el siguiente estudio, al no incorporar la ruta de

exposición de inhalación de partículas, presentará un índice de peligro total menor al que se obtendría incorporando dicha ruta de exposición.

### 3.2.1.4 Selección de factores de exposición

Los factores de exposición seleccionados, que alimentan los logaritmos para el cálculo de la dosis media de exposición, corresponden a los entregados por la USEPA, en su exposure factor handbook, que se muestra a continuación en la tabla 6.

**Tabla 6.** Exposure Factors Handbook US EPA: 2011 Edition (Handbook de Factores de Exposición)

Factor de exposición	Unidad	Niños (1-9 años)	Adolescentes (9-18 años)	Adultos (18-48 años)
Tiempo de Exposición efectivo (TE)	días/año	330	250	365
Periodo de la Exposición Total contaminantes no cancerígeno (PE)	Años	8	9	30
Periodo de la Exposición Total contaminantes cancerígenos (PE)	Años	70	70	70
Peso Corporal, (P)	Kg	16	48	70
Tasa de Ingestión de Partículas (TI)*	mg/día	350	50	50
SDT, superficie dérmica mediana total	(cm <sup>2</sup> piel total)	7440	13900	19400
SDE, fracción de la piel expuesta	%	0,2	0,2	0,2
FAD, factor adherencia dérmica	mg/cm <sup>2</sup> .día	0,001	0,001	0,001

\* Tasa de ingestión de partículas recomendado por la Organización Panamericana de la Salud

### 3.2.2 Evaluación de la toxicidad

**Selección de dosis de referencia.** Las dosis de referencia seleccionadas para realizar las comparaciones con las dosis de ingesta media y la dosis de absorción dérmica, calculadas se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 7.** Dosis de referencia y factores de potencia cancerígena

Elemento	DdR Oral mg/kg*dia	DdR *** Dermal mg/kg*dia	FPC Oral mg/kg*dia	FPC Dermal mg/kg*dia
Arsénico	0.0003*	$9 \cdot 10^{-6}$	1.5*	No disponible
Cadmio	0.001**	$1 \cdot 10^{-6}$	No disponible	No disponible

\* US EPA (IRIS)

\*\* Health Canada 2008

\*\*\* DdR dermal= DdR oral  $\times$  factor de absorción dérmica

Como no existe información en la literatura sobre las dosis de referencia dermal para arsénico ni cadmio, debido a que la absorción de estos compuestos por medio del contacto dérmico es muy baja (ATSDR, 2007), se realizara una aproximación multiplicando la dosis de referencia oral por la absorción dermal, presentada a continuación en la tabla 8.

**Tabla 8.** Valores de absorción recomendados por US EPA

Elemento	Absorción dermal	ABS inhalatoria
Arsénico	0,03	1
Cadmio	0,001	1

Esta aproximación se realiza, ya que si bien, individualmente la absorción de ambos metales por medio del contacto dérmico es baja, esta ruta de exposición cobra relevancia al momento de calcular el índice de peligro total, que combina los efectos generados por cada ruta de exposición (oral, dermal y respiratoria).

### 3.2.3 Caracterización del Riesgo

De acuerdo a las posibles vías de exposición, por las que un receptor puede entrar en contacto directo con los contaminantes, y a la información recopilada, de los



5 escenarios posibles, solo se podrá caracterizar el riesgo para 2 de ellos que corresponden a ingesta de suelo o polvo y contacto dérmico con suelo.

Se caracterizaran 2 tipos de efectos, tanto para niños como para adultos, los efectos no carcinogénicos (umbrales) y los efectos carcinogénicos, que se podrían generar por la exposición constante a los contaminantes de interés (arsénico y cadmio).

Para realizar la caracterización del riesgo es necesario conocer la dosis de contaminante a la que un receptor está expuesto, esta dosis se obtiene a partir de los logaritmos de ingesta media diaria y de contacto dérmico.

Los datos que alimentan dichos logaritmos, como factores de exposición, tanto para niños como para adultos, se obtienen de la tabla 6. Mientras que las concentraciones de arsénico y cadmio en el suelo son 57,08 mg/kg y 51,34 mg/kg respectivamente que corresponden a la media aritmética UCL 95% según distribución de datos.

### 3.2.3.1 Efectos no carcinogénicos

Realizando los cálculos de las Ecuaciones 1, 5 y 6 junto con los factores de exposición de la tabla 6 y las dosis de referencia de la tabla 7. Se obtienen los resultados expresados en la tabla 9 y la tabla 10, que resumen los resultados de la dosis de exposición, cociente de peligro e índice de peligro para niños y adultos, por exposición a arsénico y cadmio respectivamente.

A continuación se muestra un ejemplo de los cálculos de los efectos no carcinogénicos por ingesta de arsénico para niños

Primero se calcula el factor de exposición para niños, que combina tiempo y periodo de exposición, junto con la duración de exposición.

$$\text{factor de exposición} = \frac{(\text{tiempo de exposición efectivo}) \times (\text{duración de exposición})}{(\text{periodo de exposición total}) \times (\text{tiempo de exposición})}$$

$$\text{factor de exposición} = \frac{(330 \frac{\text{días}}{\text{años}}) \times (8 \text{ años})}{(8 \text{ años}) \times (365 \frac{\text{días}}{\text{año}})}$$

$$FE = 0.90$$

Luego calculamos la dosis de ingesta media de arsénico, mediante la Ec.1

$$I = 10^{-6} \times \frac{Cs \times TIs}{P} \times FE$$

$$I = 10^{-6} \times \frac{57,08 \left[ \frac{mg}{kg} \right] \times 350 \left[ \frac{mg}{dia} \right]}{16 \text{ kg}} \times 0,90$$

$$I = 1,12 \times 10^{-3} \left[ \frac{mg}{kg \times dia} \right]$$

Con la dosis de ingesta media junto con la dosis de referencia oral de arsénico se calcula el cociente de peligro por ingesta de arsénico para niños, aplicando la Ec. 5

$$\text{cociente de peligro} = \frac{I}{Ddr}$$

$$CP = \frac{1,12 \times 10^{-3}}{0,0003}$$

$$CP = 3,73$$

Finalmente aplicando la Ec. 6, se calcula el índice de peligro

$$\text{índice de peligro} = \text{cociente de peligro (oral)} + \text{cociente de peligro (dermal)}$$

$$\text{índice de peligro} = 3,73 + 0,079$$

$$\text{índice de peligro} = 3,8$$

**Tabla 9.** Resultados de las dosis de exposición (mg/kg·día), cociente de peligro e índice de peligro por exposición de arsénico

<b>Residencial</b>	<b>Niños</b>	<b>Adultos</b>
Dosis Ingesta de Suelo	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$4,07 \cdot 10^{-5}$
Dosis Contacto dérmico	$7,17 \cdot 10^{-7}$	$4,75 \cdot 10^{-7}$
CP ingesta suelo	3,73	0,14
CP contacto dérmico	0,08	0,05
IP= $CP_{is}+CP_{cd}$	3,80	0,19

**Tabla 10.** Resultados de las dosis de exposición (mg/kg·día), cocientes de peligro e índice de peligro por exposición de cadmio

<b>Residencial</b>	<b>Niños</b>	<b>Adultos</b>
Dosis Ingesta de Suelo	$1,01 \cdot 10^{-3}$	$3,67 \cdot 10^{-5}$
Dosis Contacto dérmico	$2,15 \cdot 10^{-8}$	$1,42 \cdot 10^{-8}$
CP ingesta suelo	1,01	0,04
CP contacto dérmico	0,02	0,01
IP= $CP_{is}+CP_{cd}$	1,03	0,05

En la caracterización de riesgos no cancerígenos (umbrales), por contenido de arsénico y cadmio en el suelo del SPPC en concentraciones de 57,08 y 51,34 mg/kg (95% UCL), se obtuvieron cocientes de peligro (CP) por ingesta de suelo contaminado con arsénico de 3,73 para niños y de 0,14 para adultos, mientras que los cocientes de peligro por ingesta de suelo contaminado con cadmio fueron de 1,01 para niños y 0,04 para adultos.



Los cocientes de peligro por contacto dérmico con suelo contaminado con arsénico fueron de 0,08 y 0,05 para niños y adultos respectivamente, mientras que los cocientes de peligro por contacto dérmico con suelo contaminado con cadmio fueron de 0,02 y 0,01 para niños y adultos respectivamente. En cuanto a los índices de peligro (IP), estos fueron, para arsénico, 3,80 en niños y 0,19 en adultos. Y para cadmio 1,03 en niños y 0,05 en adultos. Estos resultados muestran que el valor indicativo de existencia de riesgo ( $IP > 1$ ), fue superado por arsénico y cadmio en niños. Indicando la existencia de un alto nivel de riesgo para niños, sobre todo por Arsénico, que supera casi 4 veces el valor indicativo.

### **3.2.3.2 Efectos carcinogénicos**

En el caso de este estudio, se caracterizará el riesgo de los efectos carcinogénicos producidos por arsénico y no de cadmio, esto debido al peso de la evidencia que existe, respecto la carcinogenicidad de ambos metales. La US EPA en su programa IRIS (integrated risk information system), que se encarga de identificar y caracterizar los peligros para la salud de los químicos presentes en el ambiente, establece al arsénico inorgánico, como cancerígeno para el humano y lo identifica, en la lista de compuestos carcinogénicos según el peso de evidencia, dentro del grupo A, estableciendo que existe suficiente evidencia sobre epidemiología humana para determinar que el arsénico es un elemento que produce cáncer en humanos, siendo las vías de exposición oral e inhalación las que mayor riesgo carcinogénico generan, para este elemento. El cadmio, en cambio, es catalogado, dentro de la misma lista de compuestos carcinogénicos, dentro del grupo B1, lo que significa que es caracterizado como probablemente cancerígeno para el humano, esto debido a la limitada evidencia que existe sobre epidemiología humana, que no permite caracterizar al cadmio como un elemento carcinogénico, pero tampoco como no carcinogénico, siendo la inhalación la vía de exposición que mayor riesgo carcinogénico presenta este elemento para el humano.

Debido al peso de evidencia carcinogénica que presenta el cadmio, y sobre todo, a la falta de información disponible como los factores de potencia carcinogénica tanto por vía oral como dermal, necesarios para el cálculo de riesgo extra de contraer cáncer

de por vida, es que solo se realizará la caracterización de riesgos carcinogénicos para el arsénico.

La caracterización de riesgos carcinogénicos (RECV) derivados de la exposición a los contaminantes de interés, se realiza aplicando las ecuaciones 3 junto con los datos de FPC de la tabla 7. Mientras que el cálculo del RECV total se realiza aplicando la ecuación 4. Obteniendo los siguientes resultados

**Tabla 11.** Resultados del riesgo extra de cáncer de por vida por exposición a arsénico

Riesgo	Niños	Adultos
RECV(oral)	$1,68 \cdot 10^{-3}$	$6,11 \cdot 10^{-5}$
RECV(dermal)	$3,36 \cdot 10^{-8}$	$2,13 \cdot 10^{-8}$
RECV(total)	$1,68 \cdot 10^{-3}$	$6,11 \cdot 10^{-5}$

En la caracterización de los efectos carcinogénicos por contenido de arsénico en el suelo del SPPC en concentraciones de 57,08 mg/kg (95% UCL), se obtuvo valores para el Riesgo Extra de Cáncer de por Vida por ingesta de suelo de  $1,68 \cdot 10^{-3}$  para niños y de  $6,11 \cdot 10^{-5}$  para adultos y por contacto dérmico de  $3,36 \cdot 10^{-8}$  para niños y de  $2,13 \cdot 10^{-8}$  para adultos. El Riesgo Extra de Cáncer de por Vida Total fue de  $1,68 \cdot 10^{-3}$  para niños y de  $6,11 \cdot 10^{-5}$  para adultos. Lo que indica que existe el riesgo de que se presenten aproximadamente 2 casos de cáncer en una población de 1000 niños y que en una población de 10000 personas se presenten 0,6 casos de cáncer en adultos expuestos a los desechos presentes en el sitio, en un periodo vital de 70 años.

De esta manera al comparar los valores obtenidos de RECV total para niños y adultos se obtiene:

RECV total niños:  $1,68 \cdot 10^{-3} > 1 \times 10^{-4}$ . **Riesgo biológicamente significativo e inaceptable**

RECV total adulto:  $6,11 \cdot 10^{-5} < 1 \times 10^{-4}$ . **Riesgo aceptable.**

### 3.2.4 Análisis de incertidumbre

En el proceso de caracterización del riesgo, existe inevitablemente, una incertidumbre inherente asociada al uso de suposiciones e inferencias necesarias para la caracterización del riesgo.

**Fuentes de incertidumbre genéricas.** Se relacionan con los datos de toxicidad que se tienen de los contaminantes, ya que estos varían a medida que se genera más información sobre el efecto específico de un contaminante sobre el ser humano, a través de estudios científicos de toxicidad y epidemiología humana.

Por ejemplo en el caso de los efectos cancerígenos del Cadmio, no existe información específica, sobre los efectos que se generan al verse expuesto mediante vía oral a este metal, y la información que se posee proviene de la extrapolación de datos obtenidos en estudios realizados en animales, específicamente en ratas.

Otra de las fuentes de incertidumbre genérica proviene de la diferencias entre individuos y su respuesta frente a la exposición ante un agente contaminante, esta incertidumbre se asocia a los criterios de toxicidad como las dosis de referencia y los factores de potencia cancerígena, donde se asume que todos los individuos tendrán la misma respuesta ante la exposición a un agente contaminante, es decir se asume que todos los individuos presentan la misma susceptibilidad a generar efectos adversos derivados de la exposición a un contaminante.

**Fuentes de incertidumbre en el cálculo de la dosis de exposición.** Las fuentes de incertidumbre de este tipo, se originan principalmente de la estimación de la dosis de exposición usando modelos matemáticos ya que se espera representar mediante un modelo la cantidad de contaminante al que va a estar expuesto un receptor durante un tiempo determinado, asumiendo patrones de comportamiento que determinan el tiempo de exposición y variables como el periodo vital, que determina el periodo de exposición, aparte del peso corporal y tasas de ingesta de suelo o alimentos, que también generan incertidumbre.



### 3.2.5 Evaluación de los efectos

Los métodos para evaluar el riesgo en salud se basan, en general, en el monitoreo ambiental y en la estimación de la exposición a través de modelos matemáticos donde hay que considerar que la ocurrencia de un efecto adverso depende no solo de la dosis interna que se alcance de un determinado tóxico tras la exposición, sino también de otros factores como la variabilidad interindividual asociada a factores biológicos (genética, edad, sexo, raza, toxicocinética, etc.) y de estilos de vida individuales, entre otros, por lo que la incertidumbre de tal estrategia es grande.

En consecuencia, para incrementar la certidumbre sobre la evaluación de la exposición a los contaminantes, se requiere realizar una evaluación de los efectos mediante el empleo de biomarcadores. Ya que para que exista un riesgo, la población debe entrar en contacto con el tóxico, es decir, debe haber exposición. Sin embargo, para que ocurra un efecto biológico que puede o no terminar en un daño a la salud, normalmente el contacto no es suficiente, sino que se requiere de la entrada del tóxico al organismo del ser vivo expuesto. Es por eso que para corroborar el daño que un agente contaminante pueda provocar en una población se deben complementar los análisis ambientales con información sobre la cantidad de tóxico que ingresa al organismo mediante el monitoreo de las sustancias tóxicas o sus metabolitos en fluidos biológicos o tejidos del individuo supuestamente expuesto. Por citar un ejemplo, no basta en esta metodología muestrear Arsénico en suelo, sino que también debe realizarse un análisis de Arsénico en orina, que certificaría la absorción del compuesto. (A. Ilizaliturri y col. 2009)

De esta manera, la evaluación de los efectos, es una herramienta útil, que sirve para complementar los análisis ambientales y la caracterización del riesgo, en los casos en que este sea confirmado, con el fin de determinar los efectos reales que sufre una población ante la exposición a un contaminante. Por lo tanto en el caso del SPPC-5 Yacimiento Copaquire, este análisis es recomendado para analizar los efectos reales que se generan en niños por la exposición constante a arsénico.

### 3.3 Determinación de pH

A continuación se muestran los resultados de los pH de cada una de las muestras del suelo del SPPC-5 y de las muestras de control.

**Tabla 12.** Determinación de pH en las muestras de suelo del SPPC-5 y de las muestras control

Muestra	pH	Muestra	pH	Muestra	pH
5-1	3,03	5-7	3,91	5-Bco-4	7,42
5-2	2,90	5-8	3,82	5-Bco-5	5,91
5-3	7,46	5-Bco-1	5,73	5-Bco-6	6,22
5-4	3,78	5-Bco-2	7,56	5-Bco-7	7,13
5-5	5,16	5-Bco-2d	7,77	5-bco-8	6,61
5-6	7,49	5-Bco-3	5,83		

La determinación del pH de las muestras tomadas en el sitio, y de las muestras control, establece que existe una diferencia de pH entre ellas. Mientras las muestras del sitio de estudio presentaron un pH que tiene a ser ácido, los pH de las muestras control presentaron un pH que tiende a ser neutro.

### 3.4 Análisis de lixiviación

Debido a la presencia del acuífero del Salar de LLamara, es importante determinar si los contaminantes presentes en los suelos del SPPC-5, son capaces de lixiviar, y de alguna manera alcanzar las aguas del acuífero. Por lo tanto mediante el método SPLP, se pueden recrear las condiciones naturales para determinar la cantidad de contaminante de interés que puede lixiviar.

A continuación se presentan los resultados de los análisis realizados para determinar la cantidad de metales por ICP en lixiviados de SPLP (Cr, Cd, Pb, As, Ba, Ag y Va), y la determinación de mercurio por EAA.

Tabla 13. Concentraciones de metales lixiviados ( $\text{mgL}^{-1}$ )

Muestra	Cd	Cr	As	Pb	Se	Ag	Ba	Hg
5-1	<0,062	0,1301	<0,165	<0,054	<0,222	<0,075	<0,061	<1,7·10 <sup>-4</sup>
5-2	0,2965	<0,069	<0,165	<0,054	<0,222	0,1592	<0,061	<1,7·10 <sup>-4</sup>
5-3	<0,062	<0,069	<0,165	<0,054	<0,222	<0,075	<0,061	<1,7·10 <sup>-4</sup>
5-4	0,1044	<0,069	<0,165	<0,054	<0,222	<0,075	<0,061	<1,7·10 <sup>-4</sup>
5-5	0,2017	<0,069	<0,165	<0,054	<0,222	<0,075	<0,061	<1,7·10 <sup>-4</sup>
5-6	<0,062	<0,069	<0,165	<0,054	<0,222	<0,075	0,3115	<1,7·10 <sup>-4</sup>
5-7	<0,062	<0,069	<0,165	<0,054	<0,222	<0,075	<0,061	<1,7·10 <sup>-4</sup>
5-8	<0,062	<0,069	<0,165	<0,054	<0,222	<0,075	<0,061	<1,7·10 <sup>-4</sup>
5-bco-1	<0,062	<0,069	<0,165	<0,054	<0,222	<0,075	0,0675	<1,7·10 <sup>-4</sup>
5-bco-2	<0,062	<0,069	<0,165	<0,054	<0,222	<0,075	<0,061	<1,7·10 <sup>-4</sup>
5-bco-2D	<0,062	<0,069	<0,165	<0,054	<0,222	<0,075	0,2085	<1,7·10 <sup>-4</sup>
5-bco-3	<0,062	<0,069	<0,165	<0,054	<0,222	<0,075	0,1761	<1,7·10 <sup>-4</sup>
5-bco-4	<0,062	<0,069	<0,165	<0,054	<0,222	<0,075	0,2895	<1,7·10 <sup>-4</sup>
5-bco-5	<0,062	<0,069	<0,165	<0,054	<0,222	<0,075	0,2302	<1,7·10 <sup>-4</sup>
5-bco-6	<0,062	<0,069	<0,165	<0,054	<0,222	<0,075	0,2824	<1,7·10 <sup>-4</sup>
5-bco-7	<0,062	<0,069	<0,165	<0,054	<0,222	<0,075	0,1844	<1,7·10 <sup>-4</sup>
5-bco-8	<0,062	<0,069	<0,165	<0,054	<0,222	<0,075	0,5283	<1,7·10 <sup>-4</sup>

Como se puede apreciar en la tabla 13, la mayoría de los contaminantes de interés analizados, mostraron concentraciones inferiores al límite de detección. Particularmente, en el caso de cadmio, 3 muestras mostraron concentraciones detectables, la muestra 5-2 con  $0,30 \text{ mgL}^{-1}$ , la muestra 5-4 con  $0,10 \text{ mgL}^{-1}$  y la muestra 5-5 con  $0,20 \text{ mgL}^{-1}$ , por lo que es necesario comparar las concentraciones encontradas con el Decreto Supremo 148, para determinar si estas concentraciones de cadmio presentan algún riesgo para la salud de las personas. Arsénico, en cambio, no mostró concentraciones detectables en ninguna de las muestras analizadas, lo que supone que este metaloide no lixiviaría hacia las napas subterráneas bajo las condiciones establecidas.



**Tabla 14.** Comparación de la concentración lixiviada de cadmio (mg/l) con el Decreto Supremo 148

Parámetro	Cd
D.S – 148	1,00
5-2	0,30
5-4	0,10
5-5	0,20

Al comparar la concentración lixiviada de cadmio con el decreto supremo 148, se observa que las concentraciones detectadas en las muestras 5-2, 5-4 y 5-5 no superan la concentración máxima permisible para cadmio, establecida en el Decreto Supremo, lo que supondría que este metal no generaría riesgos por lixiviar a napas subterráneas.

Si se comparan las concentraciones lixiviadas con la concentración total de cadmio, se observa que las concentraciones lixiviadas son considerablemente menores que la concentración total. Las tres muestras presentaron un porcentaje de recuperación menor al 11 % como se muestra en la tabla 15.

**Tabla 15.** Porcentaje de cadmio lixiviado respecto a la concentración total (mg/kg)

Muestra	Cd total	Cd SPLP	% Lixiviado
5-2	57,4	5,93	10,33
5-4	50,2	2,09	4,16
5-5	45	4,10	9,11

La diferencia de concentraciones obtenidas por ambos métodos, digestión ácida asistida por microondas y SPLP, puede deberse a diversos factores que modifican el proceso de desorción de los metales como el pH, la ocurrencia de reacciones de óxido-reducción, la presencia de iones competitivos y la estructura cristalina de la fase sólida del suelo.

Ambos métodos se diferencian principalmente en los reactivos utilizados, el pH y las condiciones de digestión. En la digestión ácida asistida por microondas se utilizan

ácido nítrico y ácido fluorhídrico concentrados y la digestión se lleva a cabo en un horno de microondas a altas temperaturas (180°C). La utilización de ácido fluorhídrico concentrado, junto con las condiciones de digestión, permite la liberación de los metales adsorbidos fuertemente en la red cristalina de los minerales, además de los metales adsorbidos en el resto de las fracciones del suelo. En cambio en la técnica de SPLP, los extractantes utilizados corresponden a una solución acuosa de ácido nítrico y ácido sulfúrico diluidos a pH 4,2 y pH 5,0 y la digestión se lleva a cabo por medio de agitación a 25°C. La utilización de estos extractantes y las condiciones de digestión, solo permite la liberación de los metales débilmente adsorbidos en las fracciones más lábiles del suelo.

Estos resultados se pueden explicar por la forma de distribución que tienen los metales en las distintas fracciones del suelo, ya que éstos se encuentran unidos a los diferentes componentes sólidos del suelo, los cuales de acuerdo a sus características fisicoquímicas presentan diferente disponibilidad. La Comunidad Europea, a través de la Community Bureau of Reference (BCR), reconoce 4 fracciones en las que se distribuyen los metales, que corresponden a la fracción intercambiable, fracción reducible, fracción oxidable y fracción residual.

**Fracción intercambiable.** Donde los metales están adsorbidos débilmente sobre superficies sólidas del suelo y se encuentran como ion intercambiable y carbonatos, corresponde a la fracción con mayor biodisponibilidad.

**Fracción reducible.** Donde los metales pesados están asociados principalmente a óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, corresponde a la segunda fracción con mayor biodisponibilidad.

**Fracción oxidable.** Donde los metales pesados pueden estar asociados por medio de reacciones de complejación a la materia orgánica del suelo, la biodisponibilidad va a depender del tipo de materia orgánica.

**Fracción residual.** Donde los metales están recluidos en la estructura cristalina de los minerales primarios, por lo tanto su biodisponibilidad es muy baja. Además ésta fracción proporciona información sobre la concentración de metales que no fueron extraídos en las etapas anteriores.

De acuerdo a esta descripción se puede inferir que mediante la digestión ácida asistida por microondas se lograron extraer los metales presentes en todas las fracciones del suelo, incluidos los que se encuentran adsorbidos en la estructura cristalina de los minerales, mientras que mediante la técnica de SPLP, solo se podrían extraer los metales presentes en la fracción intercambiable, donde los metales se encuentran débilmente adsorbidos.

Por lo tanto en el suelo del Yacimiento Copaquire, debido a las diferencias de concentraciones obtenidas por digestión ácida y SPLP, se puede inferir que tanto arsénico como cadmio no se encuentran adsorbidos en la fracción más lábil del suelo, presentando una baja disponibilidad.

Además las altas concentración obtenidas por digestión ácida indican que los metales (arsénico y cadmio) se encuentran distribuidos en su mayoría en el resto de las fracciones del suelo y para determinar específicamente su distribución bastaría con realizar una extracción secuencial para obtener información acerca de la movilidad y la biodisponibilidad de estos.

### **3.5 Plan de acción**

Como en la evaluación del riesgo que presenta el sitio SPPC-5, debido al contenido principalmente de arsénico y en menor medida de cadmio, se determinó que existe un riesgo para la salud de los niños tanto por efectos carcinogénicos, como por efectos crónicos no carcinogénicos, es recomendable el desarrollo e implementación de un plan de acción para controlar la situación y disminuir los niveles de riesgo.

#### **3.5.1 Medidas de control a corto plazo**

Como primera medida a corto plazo, para generar una estrategia de gestión se establece la comunicación del riesgo a la población informándoles que existe el riesgo de manifestar efectos adversos en la salud de los niños derivados de la exposición a las concentraciones de arsénico encontradas en el sitio de estudio, que pueden ir desde oscurecimiento de la piel y el desarrollo de pequeños callos o verrugas en la palma de las manos, la planta de los pies y el torso, además de enrojecimiento e hinchazón de la piel y queratosis (sobre crecimiento y engrosamiento del epitelio), hasta la reducción del coeficiente intelectual y un aumento en la probabilidad de



generar cáncer. Por lo que se recomienda a la población evitar el contacto con el suelo del SPPC-5.

Como segunda medida de control a corto plazo, se recomienda el cierre perimetral del sitio, evitando el ingreso de personas y animales al lugar, disminuyendo la probabilidad de contacto con suelo del SPPC-5. Éste cierre perimetral debe contar con una malla atrapa polvo, que evite la dispersión de polvo contaminado. Además se recomienda la instalación de señalética que informe de los riesgos a la salud que conlleva el contacto, la ingesta y la inhalación del suelo del sitio, para que la población cuente con información que le permita identificar los riesgos *in situ*.

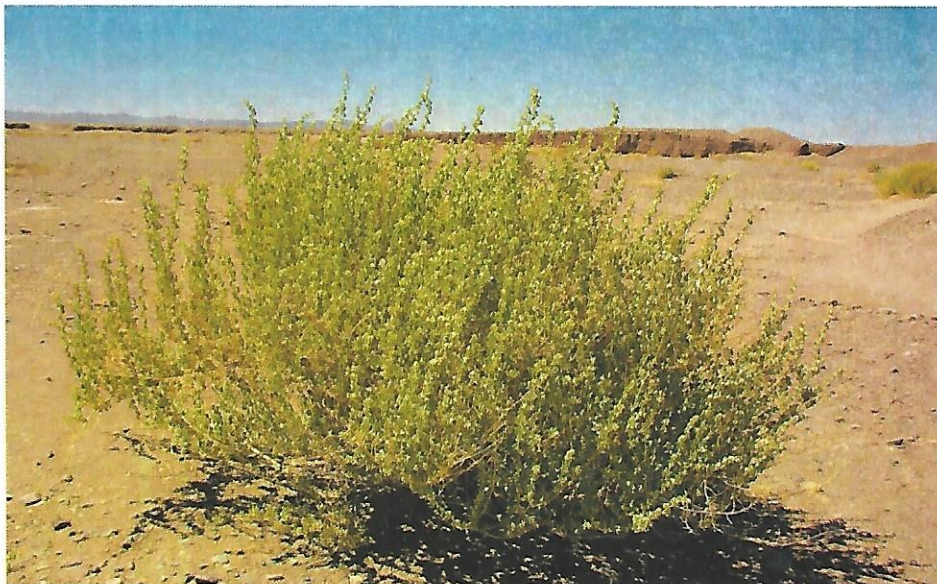
### **3.5.2 Medidas de control a mediano y largo plazo**

Siguiendo con el objetivo de disminuir el riesgo encontrado y llevarlo a niveles aceptables de forma definitiva o a largo plazo, se debe evaluar la implementación de alternativas de remediación, tomando en consideración las características propias del sitio y del tipo de contaminantes presente en el suelo.

De acuerdo a las características del SPPC-5, al contenido de Arsénico que presenta, al uso que la población le da al suelo del mismo (habitacional y agrícola), y a las características toxicológicas del Arsénico, se define como objetivo de la remediación, la disminución del nivel de riesgo al que la población se ve expuesta por el contacto con suelo del SPPC-5. Para lograr este objetivo se hace necesaria la implementación de tecnologías de remediación, dentro de las que se identifican distintas opciones, entre las que destacan, las medidas de contención (contención, confinamiento, descontaminación), de tratamiento (biológico, fisicoquímico y térmico), de excavación y de extracción.

Una de las técnicas más eficaces, en cuanto a implementación y costos, para el tratamiento de suelos contaminados por metales pesados corresponde a la fitorremediación (T.Volke Sepúlveda y Juan Antonio Velasco Trejo 2009), aunque su implementación en el SPPC-5, se dificulta por las características climáticas que presenta el sitio, la falta de agua y las características propias del suelo, por tratarse de un suelo mayoritariamente arenoso, con escaso contenido de materia orgánica, con una elevada salinidad y acidez, que no beneficia el desarrollo de materia vegetal. Sin embargo se ha demostrado que ciertas especies de plantas son capaces de soportar

dichas condiciones y a su vez poseen la capacidad de estabilizar arsénico y cadmio disminuyendo su biodisponibilidad. Numerosos estudios indican que arbustos del genero *Atriplex* tienen la capacidad de soportar condiciones salinas, de acumular arsénico en sus hojas y de retener arsénico en sus raíces, por lo que son recomendadas para generar una cobertura vegetal, en suelos contaminados por arsénico en la región pre-andina, del norte de Chile, previniendo la dispersión de este metaloide y su lixiviación a napas subterráneas. (Y. Tapia y col. 2013)



**Figura 12.** *Atriplex atacamensis*, planta de la sal o cachiuyuyo

El género *Atriplex* (Chenopodiaceae), comúnmente denominada planta de la sal, es uno de los géneros de plantas más importante en la Región de Antofagasta y el norte de Chile (Poblete et al., 1991 and Saiz et al., 2000). Estos arbustos son dominantes en muchos ambientes áridos y semiáridos alrededor del mundo, particularmente en los suelos áridos y salinos, y son usados en la rehabilitación de suelos degradados (Lutts et al., 2004, Conesa et al., 2007 and Manousaki and Kalogerakis, 2009), como plantas ornamental, en la revegetación de vertederos sellados y como alimento para animales. Algunos bioensayos han mostrado que las plantas del genero *Atriplex* acumulan As, Cd, B, Mo y Se (Watson et al., 1994, Lutts et al., 2004 and Tapia et al., 2011).



Tapia et. al. en 2013 , han demostrado, que *Atriplex atacamensis* y *Atriplex halimus* (nativa del sur de Europa y el norte de África), poseen una alta capacidad para acumular y retener arsénico, tanto en su sistema aéreo como en su sistema radicular, específicamente *A. atacamensis* mostro mayor retención de arsénico en su sistema radicular, mientras que *A. halimus* mostro mayor acumulación de arsénico en su sistema aéreo, lo que le brinda a *A. atacamensis* una ventaja sobre *A. halimus* frente a la posible ingesta de la planta por animales.

Por lo tanto la fitorremediación, con arbustos del genero *Atriplex*, específicamente *Atriplex atacamensis* y *Atriplex halimus* (plantas de la sal), podría ser una técnica de remediación viable como medida de control a largo plazo para disminuir el riesgo a niveles aceptables, qué las concentraciones de arsénico en los suelos del SPPC-5 generan, estando condicionada por la capacidad de ambas plantas para desarrollarse a la altitud del sitio de estudio.

Si bien *atriplex atacamensis*, es una planta nativa del norte de Chile, en la Región de Tarapacá ésta generalmente se encuentra asociada a fosas salinas entre los 600-2500 msnm en las zonas de bofedales, lo que hace suponer que su cultivo en el sitio de estudio (sobre los 3500 msnm), se dificulta, además si a esto le sumamos que en un estudio de línea base realizado en el SPPC-5 en el año 2005 no se encontraron ejemplares de *A. atacamensis* y mucho menos *Atriplex Halimus*, la aplicación de la fitorremediación con ambas especies se complica aún más, sin embargo en el mismo estudio de línea base se encontraron en las cercanías del sitio de estudio, ejemplares de *Atriplex imbricata* (IPBX 2005), que al pertenecer al misma genero podría presentar la capacidad de retener arsénico.

Ante este escenario se recomienda realizar ensayos en terreno para evaluar la viabilidad de cultivo de *Atriplex atacamensis* y *Atriplex halimus* a dicha altitud. Además se recomienda realizar bioensayos con *Atriplex Imbricata* para evaluar si esta especie posee la capacidad de retener o acumular arsénico en sus tejidos, y de ser así determinar en qué magnitud lo hace. Por lo tanto la implementación de la Fitoremediación estará condicionada por los resultados de los ensayos.

Si el desarrollo de *A. atacamensis* o *A. halimus* resulta ser efectivo sobre los 3500 msnm, entonces estas especies serán las indicadas para la fitorremediación en el



SPPC-5, de lo contrario, dependiendo de la capacidad para retener arsénico que presente *A. imbricata* en los bioensayos, la fitoremediación podrá realizarse con plantas de la especie antes mencionada.

Como parte complementaria de la estrategia de remediación, se recomienda realizar estudios de evaluación de los efectos sobre la salud de la población, que se pudiesen haber generado por la exposición prolongada a las concentraciones de As encontradas en el sitio de estudio, analizando muestras de orina para determinar la cantidad de As que ingresa al organismo y los posibles efectos que se pudiesen generar.

Como parte final del plan de acción propuesto, y si es que la fitoremediación resulta ser aplicable, ya sea con *A. atacamensis*, *A. halimus* o *A. imbricata*, se recomienda realizar una evaluación del contenido de arsénico en los suelos del SPPC-5, periódicamente (cada año), para evaluar los resultados de la fitoremediación, y determinar si la concentración de As está disminuyendo, hasta encontrar valores que no representen un riesgo para la salud de las personas.

#### IV CONCLUSIONES

- El análisis de evaluación de la exposición, establece la presencia de las vías de exposición por contacto dérmico, e ingesta de suelo o polvo contaminado. Además se identificó a los receptores del SPPC-5, que corresponden a los habitantes del caserío Copaquire y del poblado de Guatacondo, ambos con una población de 81 habitantes.
- Se realiza el cálculo de dosis de ingesta media diaria y de contacto dérmico con suelo contaminado para los contaminantes arsénico y cadmio en niños y adultos, obteniendo los cocientes de peligro para cada contaminante y vía de exposición. Los índices de peligro para niños por exposición a arsénico y cadmio son de 3,80 y 1,03 respectivamente indicando que existe un alto riesgo de que se manifiesten efectos adversos a la salud, no carcinogénicos, por exposición a arsénico, y en menor medida por exposición cadmio.
- El cálculo del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) por ingesta y contacto dérmico con suelo contaminado por arsénico para niños y adultos, establece que el arsénico presenta riesgos significativos para niños de tipo carcinogénicos obteniendo un RECV de  $1,68 \cdot 10^{-3}$
- El análisis de lixiviación indica que la mayoría de los metales no tiene la capacidad de lixiviar a los pH de trabajo, solo tres muestras presentaron lixiviación de cadmio, sin embargo, estas no sobrepasan las concentraciones máximas permisibles establecidas en el Decreto Supremo 148.
- Dados los resultados obtenidos en la caracterización de riesgos, en el plan de acción se proponen medidas a corto y largo plazo, dentro de las medidas de inmediatas se propone entablar un diálogo con la comunidad, y comunicar las condiciones en que se encuentra el SPPC-5 y los riesgos de su exposición.
- Como medida a corto plazo se recomienda aislar el sitio realizando un cierre perimetral con malla atrapa polvo para evitar la dispersión de suelo contaminado por metales pesados.

- Fitz, W. J., & Wenzel, W. W. (2002). Arsenic transformations in the soil–rhizosphere–plant system: fundamentals and potential application to phytoremediation. *Journal of biotechnology*, 99(3), 259-278.
- Fundación Chile (2012). Guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes. [https://www.academia.edu/7694773/Guia\\_metodologica\\_para\\_la\\_gesti%C3%B3n\\_de\\_sitios\\_contaminados\\_-\\_CHILE](https://www.academia.edu/7694773/Guia_metodologica_para_la_gesti%C3%B3n_de_sitios_contaminados_-_CHILE)
- Garrido, N. (2010). Análisis y evaluación ambiental: proyecto sistema de energización sustentable para Guatacondo comuna de Pozo Almonte Región de Tarapacá (Memoria para optar al título de Geógrafo – Universidad de Chile), [http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2010/ag-garrido\\_n/html/index-frames.html](http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2010/ag-garrido_n/html/index-frames.html)
- Hernández, C. A. I., Mille, D. J. G., Martínez, N. A. P., Domínguez, G., Saavedra, J. M., Dosal, A. T., & Reyes, G. E. (2009). Revisión de las metodologías sobre evaluación de riesgos en salud para el estudio de comunidades vulnerables en América Latina. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América*, 34(10), 710-718.
- Houston, J. (2001). La precipitación torrencial del año 2000 en Quebrada Chacarilla y el cálculo de recarga al acuífero Pampa Tamarugal, Norte de Chile. *Revista Geológica de Chile* 28: 163–177
- Houston, J, Hartley, AJ. (2003). The central Andean west-slope rainshadow and its potential contribution to the hyper-aridity in the Atacama desert. *International Journal of Climatology* 23: 1453–1464
- Integrated Risk Information System IRIS. Chemical Assessment Summary Arsenic, inorganic; CASRN 7440-38-2. [http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris\\_documents/documents/subst/0278\\_summary.pdf#nameddest=woe](http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/subst/0278_summary.pdf#nameddest=woe)
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. y Schuman, G.E. (1997). Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society of America J.* 61: 4-10.
- Manousaki, E., & Kalogerakis, N. (2009). Phytoextraction of Pb and Cd by the Mediterranean saltbush (*Atriplex halimus* L.): metal uptake in relation to salinity. *Environmental Science and Pollution Research*, 16(7), 844-854.
- Ministerio del Medio Ambiente (2013). Resolución Exenta 406 Guía Metodológica para la gestión de sitios con potencial presencia de contaminantes.
- Ministerio del Medio Ambiente (2011). “Informe del estado del Medio Ambiente”. [http://www.mma.gob.cl/1304/articles-52016\\_Capitulo\\_2.pdf](http://www.mma.gob.cl/1304/articles-52016_Capitulo_2.pdf)
- Ministerio del Medio Ambiente (2011\*) Resolución Exenta 1690, Metodología para la identificación y evaluación preliminar de suelos abandonados con presencia de contaminantes. [http://www.mma.gob.cl/transparencia/mma/doc/Res\\_406\\_GuiaMetodologicaSuelosContaminantes.pdf](http://www.mma.gob.cl/transparencia/mma/doc/Res_406_GuiaMetodologicaSuelosContaminantes.pdf)



- Navarro, G. (2003) Química Agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Pag. 15. [https://books.google.cl/books?id=HufLwjgirtwC&pg=PA1&source=gbs\\_toc\\_r&ad=4#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cl/books?id=HufLwjgirtwC&pg=PA1&source=gbs_toc_r&ad=4#v=onepage&q&f=false).
- Oyarzún, J., &Oyarzún, R. (2011). Sustainable development threats, inter-sector conflicts and environmental policy requirements in the arid, mining rich, northern Chile territory. *SustainableDevelopment*, 19(4), 263-274
- Poblete, V. Campos, V, González, L, & Montenegro, G. (1991). Anatomical leaf adaptations in vascular plants of a salt marsh in the Atacama Desert (Chile). *Revista Chilena de Historia Natural*, 64, 65-75.
- SERNAGEOMIN-BGR; Golder Associates (2008). Manual de Evaluación de Riesgos de Faenas Mineras Abandonadas o Paralizadas (FMA/P). <http://www.sernageomin.cl/pdf/material/MANUALDEEVALUACIONRIESGOSFMAP.pdf>
- Singer, M.J. y Ewing, S. (2000). Soil Quality. *Handbook of Soil Science*. Chapter 11 (ed. Sumner, M. E.), 271-298.
- Tapia, Y, Diaz, O, Pizarro, C., Segura, R., Vines, M., Zúñiga, G., & Moreno-Jiménez, E. (2013). *Atriplexatacamensis* and *Atriplexhalimus* resist As contamination in Pre-Andean soils (northern Chile). *Science of the total environment*, 450, 188-196.
- U.S. EPA. (1994). Method 7470A (SW-846): Mercury in Liquid Wastes (Manual Cold-Vapor Technique). <http://www.epa.gov/homeland-security-research/epa-method-7470a-sw-846-mercury-liquid-wastes-manual-cold-vapor-technique>.
- U.S. EPA. (2005). Guidelines for Carcinogen Risk Assessment. 70 FR 17765-17817 <https://www.epa.gov/fera/risk-assessment-carcinogens>
- Velasco Trejo, J. A., &Volke Sepúlveda, T. (2009) Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Página 63. [https://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=A50ITx37ScsC&oi=fnd&pg=PA19&ots=Pj4UEW5HB0&sig=w8zhsOLbj14FU8oQ2sx6-Dp6mwg&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=A50ITx37ScsC&oi=fnd&pg=PA19&ots=Pj4UEW5HB0&sig=w8zhsOLbj14FU8oQ2sx6-Dp6mwg&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

## VI ANEXOS

### 6.1 Metales lixiviados por SPLP mediante ICP-OES

La técnica de espectroscopia de emisión óptica con fuente de plasma acoplado inductivamente (ICP), permite la determinación cualitativa y cuantitativa de los elementos químicos que constituyen una muestra, incluso a niveles traza, con gran rapidez, precisión y exactitud, gracias a la eliminación de la mayor parte de los interferentes químicos.

La técnica se basa en la observación de los espectros de emisión de los átomos excitados o ionizados que emiten radiación (características para cada elemento) que, una vez focalizadas sobre un monocromador, se transforman eléctricamente en datos, de los que se obtendrán resultados cualitativos y cuantitativos.

La emisión de los espectros ocurre gracias a la excitación de los átomos, provocada por el plasma, que corresponde a un gas ionizado eléctricamente neutro, en este caso Argón, cuya ionización se realiza mediante una corriente inducida de alta frecuencia. Las temperaturas en el plasma ICP son muy elevadas ( $4.000-10.000^{\circ}$  K) y son suficientes para disociar las combinaciones químicas estables, incluso los óxidos refractarios, eliminándose las interferencias químicas. Estos plasmas pueden estar o no en equilibrio termodinámico.

Para conseguir la ionización se hace circular el gas por una serie de tubos concéntricos, que constituyen la "ANTORCHA", pieza clave en un equipo de plasma. Al final de la misma se encuentra una bobina de inducción, alimentada por un generador de alta frecuencia.

En principio, es necesario iniciar la ionización del gas utilizando un medio auxiliar, chispa Tesla que luego se mantiene por la corriente de alta frecuencia que fluye a través de la bobina de inducción. El efecto es la aparición de un campo magnético, cuyas líneas de fuerza se orientan axialmente a la bobina, e induce a los iones y electrones a moverse en órbitas circulares, creando corrientes eléctricas, que a causa del efecto Joule ocasionan un calentamiento de los gases, alcanzándose temperaturas de hasta  $10.000^{\circ}$  K, y proporcionan la continuidad del plasma.

En el extremo de la antorcha aparece, debido a los átomos ionizados, una especie de "llama" que, se observa durante todo el proceso de ensayo.

Como consecuencia del diseño de la antorcha, las zonas axiales son relativamente frías, si se comparan con las circundantes y es, por tanto, a través de ellas por donde se inyectan las muestras dentro de la fuente de excitación y atomización, en forma de aerosol, donde los analitos son liberados en forma atómica libre en estado gaseoso. Como consecuencia de las altas temperaturas, los analitos son excitados, provocando colisiones, que proporcionan la energía adicional para promover los estados excitados de átomos e iones excitados, los que al estabilizarse, vuelven a su estado de menor energía, produciendo la liberación de fotones que poseen una longitud de onda específica para cada elemento, que permite su identificación. Finalmente la determinación de la cantidad de fotones emitidos permite establecer la concentración del analito. (De Rojas, M. S., & Frías, M. 1986)

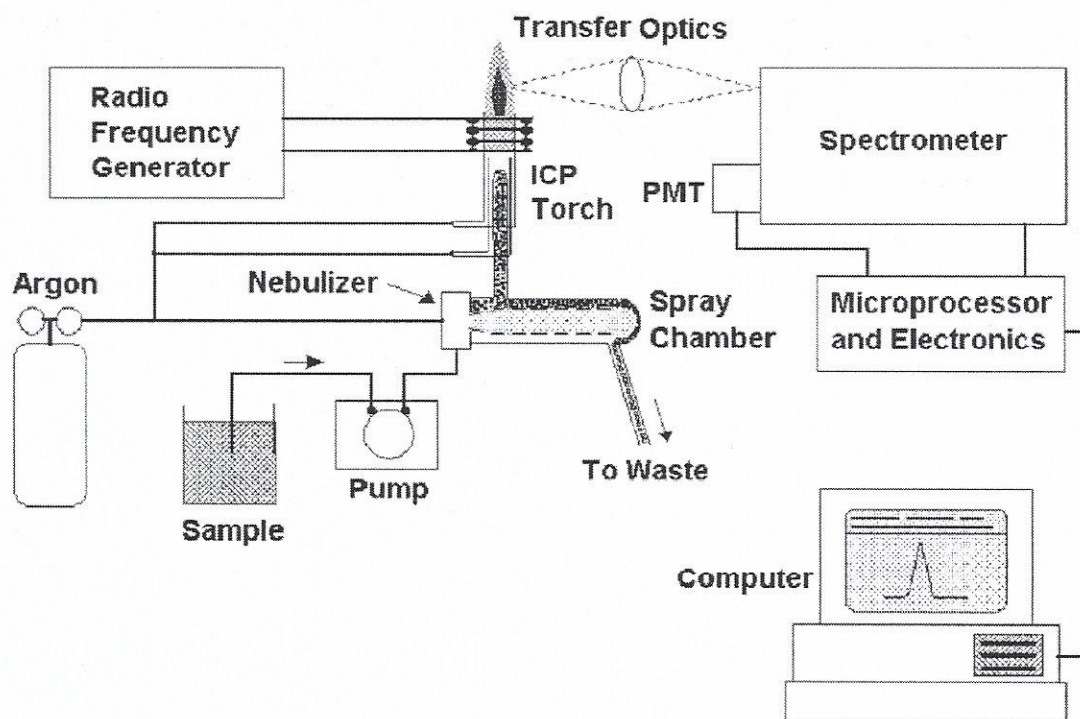


Figura 13. Esquema interno de los componentes de un equipo de ICP-OES



## 6.2 Cálculos

A continuación se presentan los ejemplos de los cálculos realizados para la obtención de los valores de dosis de exposición por ingesta de suelo contaminado, dosis de exposición por contacto dérmico con suelo contaminado, cociente de peligro, índice de peligro y RECV.

### 6.2.1 Dosis de exposición por ingesta de suelo contaminado por arsénico para niños

Primero se calcula el factor de exposición para niños, que combina tiempo y periodo de exposición, junto con la duración de exposición.

$$\text{factor de exposición} = \frac{(\text{tiempo de exposición efectivo}) \times (\text{duración de exposición})}{(\text{periodo de exposición total}) \times (\text{tiempo de exposición})}$$

$$\text{factor de exposición} = \frac{(330 \frac{\text{días}}{\text{años}}) \times (8 \text{ años})}{(8 \text{ años}) \times (365 \frac{\text{días}}{\text{año}})}$$

$$FE = 0.90$$

Luego calculamos la dosis de ingesta media de arsénico, mediante la Ec. 1

$$I = 10^{-6} \times \frac{C_s \times TIs}{P} \times FE$$

$$I = 10^{-6} \times \frac{57,08 \left[ \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right] \times 350 \left[ \frac{\text{mg}}{\text{día}} \right]}{16 \text{ kg}} \times 0,90$$

$$I = 1,12 \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{mg}}{\text{kg} \times \text{día}} \right]$$

Con la dosis de ingesta media junto con la dosis de referencia oral de arsénico se calcula el cociente de peligro por ingesta de arsénico para niños, aplicando la Ec. 5

$$\text{cociente de peligro} = \frac{I}{Ddr}$$

$$CP = \frac{1,12 \times 10^{-3}}{0,0003}$$

$$CP = 3,73$$

Finalmente aplicando la Ec. 6, se calcula el índice de peligro

*índice de peligro = cociente de peligro (oral) + cociente de peligro (dermal)*

$$\text{índice de peligro} = 3,73 + 0,079$$

$$\text{índice de peligro} = 3,8$$

El factor  $10^{-6}$  es para convertir los [mg/kg] en [mg/mg] y así ordenar las unidades

### 6.2.2 Dosis de exposición por contacto dérmico con suelo contaminado para niños

Primero calculamos el factor de exposición para niños.

$$\text{factor de exposición} = \frac{(\text{tiempo de exposición efectivo}) \times (\text{duración de exposición})}{(\text{periodo de exposición total}) \times (\text{tiempo de exposición})}$$

$$\text{factor de exposición} = \frac{(330 \frac{\text{días}}{\text{años}}) \times (8 \text{ años})}{(8 \text{ años}) \times (365 \frac{\text{días}}{\text{año}})}$$

$$FE = 0.90$$

Luego aplicamos ecuación por contacto dérmico:

$$I_{ds} = 10^{-6} \times \frac{C_s \times S_c \times AD \times ABS}{P} \times FE$$

$$I_{ds} = 10^{-6} \times \frac{\left(57,08 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \times 7440 \text{ cm}^2 \times 0,001 \frac{\text{mg}}{\text{dia} \times \text{cm}^2} \times 0,03\right)}{16 \text{ kg}} \times 0,90$$

$$I_{ds} = 7,17 \times 10^{-7} \left[ \frac{\text{mg}}{\text{kg} \times \text{dia}} \right]$$

El factor  $10^{-6}$  es para convertir los [mg/kg] en [mg/mg] y así ordenar las unidades

### 6.2.3 Calculo de cociente de peligro, por contacto dérmico con suelo contaminado para niños

Para calcular el cociente de peligro se necesita saber cuál es la dosis de referencia dermal por contacto dérmico con arsénico para niños, como ese dato no

existe en la literatura se hace una aproximación, multiplicando la dosis de referencia oral por el factor de absorción dérmica de arsénico, cuyos datos se obtienen del handbook de la EPA.

Por lo tanto la dosis de referencia dermal se calcula de la siguiente manera

$$Ddr = \text{dosis de referencia oral} \times \text{factor de absorcion dermica}$$

$$Ddr = 3 \times 10^{-4} \times 0,03$$

$$Ddr = 9,00 \times 10^{-6}$$

Luego podemos calcular el cociente de peligro

$$\text{cociente de peligro} = \frac{I}{Ddr}$$

$$\text{cociente de peligro} = \frac{7,17 \times 10^{-7} \left[ \frac{mg}{kgxdia} \right]}{9,00 \times 10^{-6} \left[ \frac{mg}{kgxdia} \right]}$$

$$\text{cociente de peligro} = 7,9 \times 10^{-2}$$

#### 6.2.4 Cálculo del índice de peligro por contacto con suelo contaminado por arsénico, para niños

El cálculo del índice de peligro, reúne los riesgos por ingesta de suelo, contacto dérmico e inhalación de suelo, sin embargo para fines de este estudio se analizaran solo los riesgos por ingesta de suelo y de contacto dérmico

$$\text{indice de peligro} = \text{cociente de peligro (oral)} + \text{cociente de peligro (dermal)}$$

$$\text{indice de peligro} = 3,73 + 0.079$$

$$\text{indice de peligro} = 3,8$$

#### 6.2.5 Calculo de Riesgo Extra de Cáncer de por Vida por contacto con suelo contaminado por Arsénico, para niños

$$RECV = FPC \times \text{Dosis de exposición}$$

$$RECV = 1,5 \left[ \frac{kgxdia}{mg} \right] \times 1,2 \times 10^{-2} \left[ \frac{mg}{kgxdia} \right]$$



$$RECV = 1,68 \times 10^{-2}$$

Luego se calcula el RECV total

$$RECV_{total} = RECV_{dermal} + RECV_{oral}$$

$$RECV_{total} = 3,36 \times 10^{-8} + 1,68 \times 10^{-3}$$

$$RECV_{total} = 1,68 \times 10^{-3}$$

## 6.3 Análisis para Metales por SPLP

CRITERIO DE ACEPTABILIDAD							
	Cd	Cr	As	Pb	Se	Ag	Ba
concentración (mg/L)							
<b>Bco.</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
<b>MRC.</b>	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-
<b>MR.</b>	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-
<b>Spike.</b>	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-
<b>Duplicado (cv)</b>	10% +/-	10% +/-	10% +/-	10% +/-	10% +/-	10% +/-	10% +/-
Elementos de Control de Calidad de Análisis							
	Cd	Cr	As	Pb	Se	Ag	Ba
concentración (mg/L)							
<b>Bco</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
$\lambda$ (nm)	226.502	283.555	193.693	220.351	196.022	328.067	493.402
<b>Pendiente</b>	11810	53280	515.1	1774	466.90	42640	2687000
<b>r<sup>2</sup></b>	0.999880	0.999835	0.999957	0.999872	0.999991	0.998958	0.999961
<b>MR Teórico</b>	0.300	0.750	0.750	0.750	0.750	0.075	0.750
<b>MR Experimental</b>	0.2906	0.7232	0.7277	0.7270	0.7180	0.0704	0.7316
<b>% rec</b>	96.87	96.43	97.03	96.93	95.73	93.87	97.55
<b>LD</b>	0.062	0.069	0.165	0.054	0.222	0.075	0.061
<b>LC</b>	0.206	0.23	0.55	0.181	0.741	0.25	1.386

Figura 14. Criterios de aceptabilidad y elementos de control de calidad para análisis de metales por ICP en lixiviados de SPLP

#### 6.4 Análisis de Hg mediante SPLP

Criterio de aceptabilidad		Parámetros de trabajo	
Bco.	<LD	$\lambda$ (nm)	253,7
MR.	$\pm 20\%$	Pendiente	0,00888
Spike.	$\pm 20\%$	$r^2$	0,999751
Duplicado (%E)	$\pm 20\%$	Energía lámpara	70
Lámpara	$70 \pm 20$	Límite de detección	0,170 $\mu\text{g/L}$
Elementos de control de calidad de Análisis			
Blanco	<LD	Spike exp (ppb)	4,30
MR teo. (ppb)	2,00	% rec.	86,1
MR exp. (ppb)	1,69	Muestra ( $\mu\text{g/L}$ )	<LD
% rec.	84,3	Muestra D ( $\mu\text{g/L}$ )	<LD
Spike teo (ppb)	5,00	Duplicado (%E)	n/a

**Figura 15.** Criterios de aceptabilidad y elementos de control de calidad para análisis de Hg por SPLP