

UCH-FC  
Q. Ambiental  
R 696  
C.1



FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**“EVALUACIÓN DE RIESGOS Y PLAN DE GESTIÓN AMBIENTAL EN  
ESCORIAL NANTOCO, TIERRA AMARILLA, REGIÓN DE ATACAMA”**

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

**Químico Ambiental**

**Pablo Rodríguez Ramos**

Director Seminario de Título: Dra. Isel Cortés

Diciembre, 2015  
Santiago - Chile

**ESCUELA DE PREGRADO – FACULTAD DE CIENCIAS – UNIVERSIDAD DE CHILE**



## INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TITULO

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:

**Pablo Ignacio Rodríguez Ramos**

“EVALUACIÓN DE RIESGOS Y PLAN DE GESTIÓN AMBIENTAL EN ESCORIAL NANTOCO, TIERRA AMARILLA, REGIÓN DE ATACAMA”

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 Nodarse*

**Director Seminario de Título**

*M.Cs. Sylvia Copaja*

**Presidente**

*Dr. Antonio Galdámez*

**Corrector**



---

---

---

Santiago de Chile, Diciembre 2015

## **Agradecimientos**

Agradezco a la Dra. Isel Cortés por la oportunidad de realizar mi seminario de título junto a ella en las instalaciones del Centro Nacional del Medio Ambiente, lugar donde conocí a Patricia Ayala, quién fue un pilar fundamental en mi trabajo realizado en aquel lugar. También agradezco a todos mis amigos y compañeros de la Universidad, por todos los buenos momentos y ayuda que me brindaron durante mi estadía en aquel lugar, y a mi familia y compañera por todo su apoyo brindado.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
	<b>1.1 Antecedentes generales</b>	<b>1</b>
	1.1.1 Desarrollo de actividad minera en Chile y su potencial impacto ambiental	1
	1.1.2 Sitios potencialmente contaminados con residuos mineros tóxicos	3
	1.1.3 Guía Metodológica para la Gestión de SPPC	4
	<b>1.2 Antecedentes específicos</b>	<b>5</b>
	1.2.1 Caso de Estudio: Escorial Nantoco	5
	1.2.2 Investigación preliminar y confirmatoria de SPPC	7
	1.2.3 Perfil Toxicológico de metales pesados del presente trabajo	10
	1.2.3.1 Efectos a la Salud por exposición al Arsénico	10
	1.2.3.2 Efectos a la Salud por exposición al Plomo	11
	1.2.3.3 Efectos a la Salud por exposición al Mercurio	13
	1.2.4 Marco legal en Chile para contaminación con metales pesados	15
	<b>1.3 Hipótesis y objetivos</b>	<b>17</b>
	1.3.1 Hipótesis	17
	1.3.2 Objetivo General	17
	1.3.3 Objetivos específicos	17
<b>II.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>18</b>
	<b>2.1 Equipos y Materiales</b>	<b>18</b>
	<b>2.2 Reactivos</b>	<b>19</b>
	<b>2.3 Toma de muestras y preservación</b>	<b>19</b>
	<b>2.4 Procedimientos y análisis de muestras</b>	<b>20</b>
	<b>2.4.1 Escenarios de exposición relevantes</b>	<b>20</b>
	2.4.1.1 Metales Lixiviables	20
	2.4.1.2 Metales Bioaccesibles	21
	2.4.1.3 Metales Solubles para humanos	22
	2.4.1.4 Metales Solubles para plantas	22
	<b>2.4.2 Determinación de concentración de Hg por EAA-VF</b>	<b>24</b>

	<b>2.4.3 Determinación de concentración de As y Pb por ICP-OES</b>	25
<b>2.5</b>	<b>Evaluación del riesgo a la salud de las personas</b>	26
<b>2.6</b>	<b>Plan de gestión ambiental</b>	27
<b>III.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Tablas de pH</b>	29
<b>3.2</b>	<b>Extracción de As, Pb y Hg en Línea base y Escorial Nantoco</b>	32
	3.2.1 Metales Bioaccesibles	33
	3.2.1.1 Arsénico	33
	3.2.1.2 Plomo	34
	3.2.1.3 Mercurio	35
	3.2.2 Metales Solubles en humanos	36
	3.2.2.1 Arsénico soluble	36
	3.2.2.2 Plomo soluble	37
	3.2.2.3 Mercurio soluble	38
	3.2.3 Metales Solubles en plantas	39
	3.2.3.1 Arsénico soluble	39
	3.2.3.2 Plomo soluble	40
	3.2.3.3 Mercurio soluble	41
	3.2.4 Metales Lixiviables	42
	3.2.4.1 Comparación Extracción SPLP con Decreto Supremo 148	42
<b>3.3</b>	<b>Comparación con Línea base y Norma Japonesa</b>	45
	3.3.1 Metales Bioaccesibles	45
	3.3.2 Metales Solubles en Humanos	48
	3.3.3 Metales Solubles en plantas	51
<b>3.4</b>	<b>Evaluación del riesgo a la salud de las personas</b>	54
	3.4.1 Evaluación de la exposición	54
	3.4.1.1 Rutas de exposición y Receptores de exposición	54
	3.4.1.2 Modelo conceptual de exposición	55
	3.4.1.3 Cálculo de Dosis de exposición	56
	3.4.2 Evaluación de la toxicidad	59
<b>3.5</b>	<b>Caracterización del riesgo</b>	60
	3.5.1 Caracterización del riesgo por ingesta	60

3.5.1.1	Evaluación no cancerígena por Arsénico en niños	60
3.5.1.2	Evaluación cancerígena por Arsénico en adultos	62
3.5.1.3	Evaluación no cancerígena por Mercurio en niños	63
3.5.2	Caracterización del riesgo por contacto dérmico	65
3.5.2.1	Evaluación no cancerígena por Arsénico en niños	65
3.5.2.2	Evaluación cancerígena por Arsénico en adultos	67
3.5.2.3	Evaluación no cancerígena por Mercurio en niños	69
3.5.3	Caracterización del riesgo de Pb en la sangre	71
<b>3.6</b>	<b>Análisis de la incertidumbre</b>	<b>73</b>
<b>IV.</b>	<b>DISCUSIÓN</b>	<b>75</b>
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>78</b>
<b>VI.</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>80</b>
<b>VII.</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>83</b>
7.1	Tablas de concentraciones obtenidas	83
7.2	Análisis de As y Pb en lixiviados	90
7.3	Análisis de Hg en lixiviados	91
7.4	Análisis de Hg en fracción de bioaccesibles	91
7.5	Análisis de Hg en fracción de solubles en humanos	92
7.6	Análisis de Hg en fracción de solubles en plantas	92

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Resumen protocolo experimental	23
<b>Tabla 2:</b> pH en Lixiviables	29
<b>Tabla 3:</b> pH en Bioaccesibles	30
<b>Tabla 4:</b> pH en Solubles para humanos	31
<b>Tabla 5:</b> pH en Solubles para plantas	32
<b>Tabla 6:</b> Factores de exposición	58
<b>Tabla 7:</b> Efectos cancerígenos	58
<b>Tabla 8:</b> Absorción dermal	59
<b>Tabla 9:</b> Concentraciones totales y concentraciones obtenidas de las extracciones en bioaccesibles realizadas en todas las muestras respecto de arsénico, plomo y mercurio	83
<b>Tabla 10:</b> Concentraciones totales y concentraciones obtenidas de las extracciones en solubles en humanos realizadas en todas las muestras respecto de arsénico, plomo y mercurio	84
<b>Tabla 11:</b> Concentraciones totales y concentraciones obtenidas de las extracciones en solubles en plantas realizadas en todas las muestras respecto de arsénico, plomo y mercurio	85
<b>Tabla 12:</b> Concentraciones de metales en fracción lixiviables	86
<b>Tabla 13:</b> Concentración de metales en fracción bioaccesibles	87
<b>Tabla 14:</b> Concentración de metales en fracción solubles humanos	88
<b>Tabla 15:</b> Concentración de metales en fracción solubles en plantas	89

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Metodología para estandarizar la investigación de SPPC	5
<b>Figura 2:</b> Cercanía de Villa Nantoco con Escorial Nantoco	6
<b>Figura 3:</b> Cercanía de Escuela Paul Harris con Escorial Nantoco	7
<b>Figura 4:</b> Puntos de muestreo en Escorial Nantoco	8
<b>Figura 5:</b> Puntos de muestreo de la línea base	9
<b>Figura 6:</b> Resultados estudio CENMA (2012)	9
<b>Figura 7:</b> Estándar de calidad ambiental Japonés para contaminación de suelos	16
<b>Figura 8:</b> Equipo Perkin Elmer modelo AAnalyst 700	24
<b>Figura 9:</b> Equipo Perkin Elmer modelo Optima 8300	26
<b>Figura 10:</b> Esquema Evaluación del riesgo y plan de acción	28
<b>Figura 11:</b> Extracción de arsénico en bioaccesibles en línea base	33
<b>Figura 12:</b> Extracción de arsénico en bioaccesibles en Escorial Nantoco	33
<b>Figura 13:</b> Extracción de plomo en bioaccesibles en línea base	34
<b>Figura 14:</b> Extracción de plomo en bioaccesibles en Escorial Nantoco	34
<b>Figura 15:</b> Extracción de mercurio en bioaccesibles en línea base	35
<b>Figura 16:</b> Extracción de mercurio en bioaccesibles en Escorial Nantoco	35
<b>Figura 17:</b> Extracción de arsénico en solubles para humanos en línea base	36
<b>Figura 18:</b> Extracción de arsénico en solubles para humanos en Escorial Nantoco	36
<b>Figura 19:</b> Extracción de plomo en solubles para humanos en línea base	37
<b>Figura 20:</b> Extracción de plomo en solubles para humanos en Escorial Nantoco	37
<b>Figura 21:</b> Extracción de mercurio en solubles para humanos en línea base	38
<b>Figura 22:</b> Extracción de mercurio en solubles para humanos en Escorial Nantoco	38
<b>Figura 23:</b> Extracción de arsénico en solubles en plantas en línea base	39
<b>Figura 24:</b> Extracción de arsénico en solubles en plantas en Escorial Nantoco	39
<b>Figura 25:</b> Extracción de plomo en solubles en plantas en línea base	40
<b>Figura 26:</b> Extracción de plomo en solubles en plantas en Escorial Nantoco	40
<b>Figura 27:</b> Extracción de mercurio en solubles en plantas en línea base	41
<b>Figura 28:</b> Extracción de mercurio en solubles en plantas en Escorial Nantoco	41
<b>Figura 29:</b> Comparación de arsénico en línea base con DS148	42
<b>Figura 30:</b> Comparación de arsénico en Escorial Nantoco con DS148	43
<b>Figura 31:</b> Comparación de plomo en línea base con DS148	43

<b>Figura 32:</b> Comparación de plomo en Escorial Nantoco con DS148	44
<b>Figura 33:</b> Comparación de mercurio en línea base con DS148	44
<b>Figura 34:</b> Comparación de mercurio en Escorial Nantoco con DS148	45
<b>Figura 35:</b> Comparación de arsénico extraído en Escorial Nantoco con la línea base correspondiente a bioaccesibles	46
<b>Figura 36:</b> Comparación de plomo extraído en Escorial Nantoco con la línea base correspondiente a bioaccesibles	46
<b>Figura 37:</b> Comparación de mercurio extraído en Escorial Nantoco con la línea base correspondiente a bioaccesibles	47
<b>Figura 38:</b> Comparación de arsénico en bioaccesibles con norma Japonesa	47
<b>Figura 39:</b> Comparación de plomo en bioaccesibles con norma Japonesa	48
<b>Figura 40:</b> Comparación de mercurio en bioaccesibles con norma Japonesa	48
<b>Figura 41:</b> Comparación de arsénico extraído en Escorial Nantoco con la línea base correspondiente a solubles en humanos	49
<b>Figura 42:</b> Comparación de plomo extraído en Escorial Nantoco con la línea base correspondiente a solubles en humanos	49
<b>Figura 43:</b> Comparación de mercurio extraído en Escorial Nantoco con la línea base correspondiente a solubles en humanos	50
<b>Figura 44:</b> Comparación de arsénico en solubles en humanos con norma Japonesa de calidad de suelos	50
<b>Figura 45:</b> Comparación de plomo en solubles en humanos con norma Japonesa de calidad de suelos	51
<b>Figura 46:</b> Comparación de mercurio en solubles en humanos con norma Japonesa de calidad de suelos	51
<b>Figura 47:</b> Comparación de arsénico extraído en Escorial Nantoco con la línea base correspondiente a solubles en plantas	52
<b>Figura 48:</b> Comparación de plomo extraído en Escorial Nantoco con la línea base correspondiente a solubles en plantas	52
<b>Figura 49:</b> Comparación de mercurio extraído en Escorial Nantoco con la línea base correspondiente a solubles en plantas	53
<b>Figura 50:</b> Comparación de arsénico en solubles en plantas con norma Japonesa	53
<b>Figura 51:</b> Comparación de plomo en solubles en plantas con norma Japonesa	54
<b>Figura 52:</b> Comparación de mercurio en solubles en plantas con norma Japonesa	54
<b>Figura 53:</b> Modelo conceptual de rutas de exposición	56
<b>Figura 54:</b> Curva de distribución del riesgo asociado al plomo en Escorial Nantoco	72
<b>Figura 55:</b> Curva de distribución del riesgo asociado al plomo en la línea base	72

<b>Figura 56:</b> Control de calidad de extracción de As y Pb en lixiviados	90
<b>Figura 57:</b> Control de calidad de extracción de Hg en lixiviados	91
<b>Figura 58:</b> Control de calidad de extracción de Hg en bioaccesibles	91
<b>Figura 59:</b> Control de calidad de extracción de Hg en solubles en humanos	92
<b>Figura 60:</b> Control de calidad de extracción de Hg en solubles en plantas	92

## LISTA DE ABREVIATURAS

APL	Acuerdos de Producción Limpia
ATSDR	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades
DHHS	Departamento de Salud y Servicios Humanos de Estados Unidos
EIA	Estudios de Impacto Ambiental
FPC	Factor de Potencia Carcinogénica
IARC	Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer
ISO	Organización Internacional de Estandarización
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
PAM	Pasivo Ambiental Minero
SEIA	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SPPC	Suelo con Potencial Presencia de Contaminantes

## RESUMEN

El Escorial Nantoco se encuentra ubicado en la Región de Atacama, a metros de la Villa Nantoco, y del cual se tiene información que posee grandes concentraciones de metales pesados, específicamente arsénico, plomo y mercurio, los cuales resultan ser nocivos para la salud de las personas.

Es debido a esa razón que en el presente trabajo, se simularon 4 escenarios de exposición relevantes de contaminación, con muestras de escorias tomadas de Escorial Nantoco, y con muestras provenientes de sitios que no han presentado actividad minera en Tierra Amarilla.

Se determinó la concentración de mercurio en las muestras por el método de espectrometría de absorción atómica con sistema de generación de vapor frío (EAA-VF), y para el caso del arsénico y plomo, se obtuvo las concentraciones mediante el método de espectroscopía de emisión por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES).

Las concentraciones obtenidas de cada una de las simulaciones de los escenarios de exposición relevantes, fueron mucho menores que los valores que se tenían del estudio preliminar realizado en el lugar, debido a que las muestras se encuentran en estado vítreo, por lo que poseen una gran estabilidad química, de manera que los metales pesados se encuentran inmovilizados en ellas.

Los valores obtenidos se compararon con la norma japonesa de calidad ambiental para contaminación de suelos y también con los valores obtenidos de las muestras de línea

base, los cuales resultaron ser mayores en varios puntos en el caso del arsénico, en un punto en el caso del plomo, y en ningún punto en el caso del mercurio.

Por último se realizó la caracterización del riesgo según la Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes, de lo que resultó un índice total de peligro de arsénico de 0,86; y un índice total de peligro de mercurio de  $2,49 \times 10^{-4}$  valores que son menores que 1, por lo que se desestima la realización de un plan de gestión.

## ABSTRACT

Escorial Nantoco is a place that is located in the Atacama Region, meters from the Villa Nantoco, and which has information that has high concentrations of heavy metals, particularly arsenic, lead and mercury, which turn out to be harmful for the health of people.

It is because of this reason that in this study, 4 relevant exposure scenarios of pollution, slag samples taken from Escorial Nantoco, and samples from sites that have not submitted mining in Tierra Amarilla were simulated.

Subsequently the mercury concentration in the samples by the method of atomic absorption spectrometry system with cold vapor generation (EAA-VF) was determined, and in the case of arsenic and lead concentrations were obtained by the method of spectroscopy emission inductively coupled plasma (ICP-OES).

The concentration values obtained from each of the simulations of the relevant exposure scenarios were very lower than the values were the preliminary study had been done on the spot, because the samples are in the glassy state, so they have great chemical stability, so that the heavy metals are immobilized in them.

The values obtained were compared with the Japanese environmental quality standard for soil pollution and with the values obtained from the baseline samples, which were found to be higher at several points in the case of arsenic, at a point in the case of lead, and at no point in the case of mercury.

Finally the risk characterization was performed according to the Methodological Guide for the management of soils with potential contaminants, what turned out a total arsenic hazard ratio 0.86; and total mercury hazard ratio of  $2.49 \times 10^{-4}$  values that are less than 1, so that the implementation of a management plan is rejected.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes Generales.

#### 1.1.1. Desarrollo de actividad minera en Chile y su potencial impacto ambiental

Históricamente el norte de Chile se ha caracterizado por ser una fuente de extracción de riquezas y minerales que han sustentado la economía y los procesos industriales del país. Ya desde la época de la colonia la extracción de estos recursos naturales se fue sistematizando, siendo el cobre y la plata los minerales de mayor exportación. Sin embargo, este comercio fue dirigido solo a los países que pertenecieran a la corona española.

Este escenario cambia profundamente con la independencia en el año 1810, en este proceso la minería se ve fortalecida por un mayor contacto comercial y humano con el exterior. Muchos extranjeros se radicaron en los centros mineros del norte, con lo que se facilitaron las vinculaciones con las empresas foráneas y se abrió la puerta para introducir mejoras tecnológicas y, posteriormente, para la afluencia de nuevos capitales extranjeros. Esta apertura comercial significó utilizar y optimizar los recursos naturales, implicando no sólo el aumento de la producción de plata, el auge del cobre y el surgimiento de la producción de carbón posteriormente, sino que también sentó las bases para los futuros yacimientos mineros en esta zona del país.

En las últimas décadas, Chile se ha consolidado como el mayor productor mundial de cobre, pasando de un 14% de la producción mundial en 1960 a un 32% en 2012,

representando el 13% del Producto Interno Bruto y el 60% de las exportaciones hacia el extranjero. (Medvinsky, 2015)

A pesar que éste sector económico es uno de los pioneros en Chile en utilizar Estudios de Impacto Ambiental (EIA), adoptar Acuerdos de Producción Limpia (APL), aplicar certificación ISO 14001 y mejorar su eficiencia energética, se considera que aún las actividades mineras producen gran parte de las emisiones de SO<sub>x</sub> y arsénico en algunas regiones del país.

En 2005 la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), junto a la Comisión Económica para América Latina (CEPAL) publicaron el estudio "Evaluaciones de desempeño ambiental", donde uno de los aspectos más importantes es el sector de la minería. En el documento se recomienda obtener información ambiental, para generar indicadores que permitan tomar decisiones, y aplicar metodologías internacionales.

La promulgación de la Ley 20.417 en enero de 2010, que modificó la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente, significa un avance importante en cuanto a la salud medio ambiental del país, ya que establece que es deber del Ministerio del Medio Ambiente:

“Proponer políticas y formular normas, planes y programas en materia de residuos y suelos contaminados, así como la evaluación del riesgo de productos químicos, organismos genéticamente modificados y otras sustancias que puedan afectar el medio ambiente”. (Ley 20.417, 2010)

### **1.1.2. Sitios potencialmente contaminados con residuos mineros tóxicos**

La contaminación del suelo es un problema importante porque se trata de un recurso no renovable que requiere largos periodos de formación, y, por otra parte, la migración de contaminantes, puede provocar serias consecuencias ambientales y a la salud de las personas.

Existe muy poca información de la contaminación del suelo que genera el sector minero, y además no se poseen planes de descontaminación de las múltiples minas que se encuentran abandonadas en el norte de Chile. (OCDE-CEPAL, 2005)

Con la aprobación de la Resolución Exenta N° 1.690 en diciembre de 2011, el Ministerio del Medio Ambiente establece la Metodología para la Identificación y Evaluación Preliminar de Suelos Abandonados con Presencia de Contaminantes a ser utilizada en los estudios que se realicen en Chile, la que tiene por objetivo definir los procedimientos para estandarizar la investigación de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC) en el país.

Como consecuencia, en 2011 el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) solicitó al Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) un estudio preliminar de SPPC que permita:

- Realizar un catastro de los sitios contaminados por relaves mineros.
- Evaluar con metodologías internacionales, el riesgo que suponen éstos para la salud de las personas.
- Elaborar planes de gestión que aseguren un adecuado tratamiento de estos sitios.

El año 2013 la Resolución exenta n°406, aprobó la Guía metodológica para la gestión de SPPC que complementa la resolución exenta n°1690, la que no se refería a la implementación de la evaluación del riesgo propiamente tal, ni al plan de acción para su gestión.

Las metodologías de evaluación de riesgos a la salud humana permiten establecer prioridades, a partir de la evaluación de la información ambiental, toxicológica y de salud por lo que se pueden proponer medidas de gestión fundamentadas en el potencial riesgo que los Pasivos Ambientales Mineros (PAM) suponen para la población. (MMA-CENMA, 2011)

### **1.1.3. Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes**

La metodología diseñada en la Guía está compuesta por tres niveles o fases.

- **Primer nivel:** identificación, priorización y jerarquización sistemática de los SPPC a escala regional, de manera de determinar hacia dónde concentrar los esfuerzos de investigación.
- **Segundo nivel:** a escala sitio-específica se aborda el estudio del sitio propiamente tal en forma más detallada para efectuar una evaluación preliminar sitio-específica del riesgo.
- **Tercer nivel:** considera la 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.

En el siguiente esquema (Figura 1) se resume las actividades asociadas a cada etapa.

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 1:** Metodología para estandarizar la investigación de SPPC (Guía Metodológica para la Gestión de SPPC, 2012)

La aplicación de la Guía metodológica permitirá realizar un diagnóstico a nivel nacional de los sitios que se encuentran contaminados que servirá para realizar estadísticas, identificar los contaminantes y determinar el riesgo que éstos significan.

## 1.2. Antecedentes Específicos.

### 1.2.1. Caso de Estudio: Escorial Nantoco

Los escoriales son vertederos de residuos (escorias) provenientes de industrias metalúrgicas que utilizaron procesos de fundición. Estos se consideran como Pasivos

Ambientales Mineros (PAM), ya que al acabar la extracción del mineral fueron abandonados, sin tomar medidas ambientales ni de cierre de faenas. Las escorias de fundición son materiales vítreos, de alta estabilidad química, poco lixiviables. Es por ello que bajo las condiciones climáticas de la región de Atacama, se deben considerar estos residuos como estables. (CENMA, 2012).

El Escorial Nantoco está ubicado en la comuna de Tierra Amarilla, provincia de Copiapó, Región de Atacama, específicamente en los 374601 m E / 6952989 m S (Zona 19J) de georreferencia (UTM/WGS84). Abarca 2,6 Ha y limita al este con un sitio de uso agrícola, al oeste con la ruta C-35, al norte con la Villa Nantoco donde se encuentra la escuela rural G44 Paul Harris, y al sur con un sitio de uso agrícola. En las siguientes imágenes (Figuras 2 y 3) se aprecia la cercanía del escorial con la Villa Nantoco y con la escuela Paul Harris.



**Figura 2:** Cercanía de Villa Nantoco con Escorial Nantoco

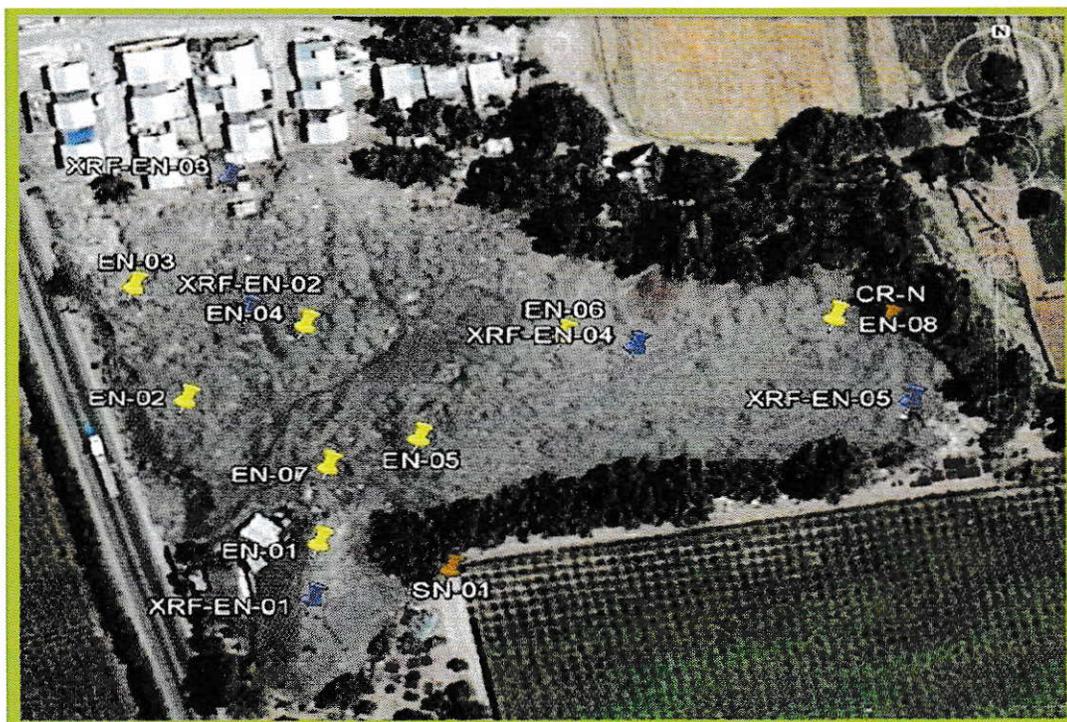


**Figura 3:** Cercanía de Escuela Paul Harris con Escorial Nantoco

### **1.2.2. Investigación preliminar y confirmatoria de SPPC en Comunas de Copiapó y Tierra Amarilla**

En el año 2012, el CENMA, de la Universidad de Chile, desarrolló un estudio para el Ministerio del Medio Ambiente que daba cuenta de la situación de SPPC, en las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla, lo que incluyó a varios relaves mineros y dos escoriales entre los que se encontraban el Escorial Nantoco.

En el estudio se realizó un muestreo del lugar, donde se obtuvo 8 muestras de escoria del escorial Nantoco (EN), una de suelo (SN-01), y una de sedimento (CR-N), como se muestra a continuación (Figura 4):

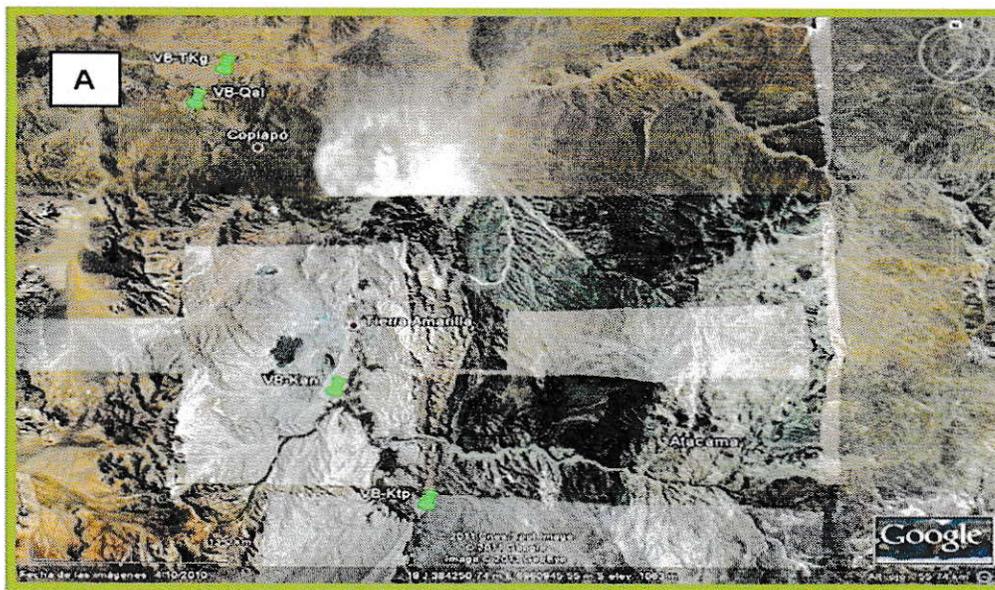


**Figura 4:** Puntos de muestreo en Escorial Nantoco

Además se realizó un muestreo de lugares no afectados por la actividad minera, para realizar una línea base que diera cuenta de las concentraciones naturales de metales en los suelos del sector.

Las rocas identificadas corresponden a suelos poco desarrollados característicos de la zona norte del país. Las rocas analizadas pertenecen a cuatro clases

- **TKg:** Batolito andino (principalmente granodiorita).
- **Qal:** Depósitos aluviales.
- **Kan:** Formaciones Abundancia y Nantoco. (Estas rocas albergan mineralización de óxidos y sulfuros de cobre)
- **Ktp:** Formaciones Totoralillo y Pabellón.



**Figura 5:** Puntos de muestreo de la línea base

Los resultados de la determinación de concentraciones totales de elementos metálicos (y semimetálicos), realizada en el Laboratorio de Química Ambiental de CENMA se presentan en la siguiente Tabla (Figura 6)

Concentración de metales UCL95%, 8 muestras $\text{mg kg}^{-1}$					
<b>Hg</b>	120	<b>Al</b>	17161	<b>B</b>	1280
<b>Zn</b>	5412	<b>Mn</b>	2324	<b>Fe</b>	137111
<b>As</b>	1375	<b>V</b>	228,4	<b>Cd</b>	26,26
<b>Cu</b>	20267	<b>Ba</b>	1233	<b>Mo</b>	193,2
<b>Ni</b>	524	<b>Co</b>	860,7	<b>Pb</b>	2566

**Figura 6:** Resultados estudio CENMA (2012)

Es importante destacar que estos valores superan ampliamente las normas canadienses de suelo, específicamente para uso residencial. (CENMA, 2012)

En Nantoco no se ha efectuado hasta ahora ningún estudio de evaluación de riesgos a la salud de las personas, por lo cual en el presente trabajo, se simularán 4 escenarios diferentes, por los cuales se podría sufrir contaminación por metales pesados. Estos escenarios incluyen:

- Una simulación de lluvia ácida, que contaminaría napas subterráneas;
- Simulación de ingestión de suelos y de adsorción por la piel, situaciones que afectarían a la salud de las personas
- Una simulación de incorporación a las plantas a través de sus raíces, lo que contaminaría cultivos.

### **1.2.3. Perfil Toxicológico de metales pesados objetos del presente trabajo**

#### **1.2.3.1. Efectos a la Salud por exposición al Arsénico**

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 ingestión de compuestos de arsénico con uno o dos metilos pueden producir diarrea y daño de los riñones. (Sistema de información ambiental regional Arequipa, 2015)

- **Exposición** La inhalación de niveles altos de arsénico inorgánico puede producir dolor de garganta e irritación de los pulmones. 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.
- **La ingestión** de niveles muy altos de arsénico puede ser fatal. La ingestión o inhalación prolongada de niveles bajos de arsénico inorgánico puede producir

oscurecimiento de la piel y la aparición 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 (sobrecrecimiento y engrosamiento del epitelio).
- **Carcinogenicidad.** Varios estudios han demostrado que la ingestión de arsénico inorgánico puede aumentar el riesgo de cáncer de piel, de hígado, de vejiga y de pulmón. La inhalación de arsénico inorgánico puede aumentar el riesgo de cáncer del pulmón. El Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) y la Agencia de Protección Medioambiental (EPA) de Estados Unidos, han determinado que el arsénico inorgánico es un elemento reconocido como carcinogénico en seres humanos. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha determinado que el arsénico inorgánico es carcinogénico en seres humanos (ATSDR, 2007). (Sistema de información ambiental regional Arequipa, 2015)
- **Efecto en niños.** Hay evidencia que sugiere que la exposición prolongada al arsénico puede reducir el cociente 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. (Sistema de información ambiental regional Arequipa, 2015)

#### **1.2.3.2. Efectos a la Salud por exposición al Plomo**

El plomo puede afectar a casi todos los órganos y sistemas en el cuerpo. El más sensible es el sistema nervioso, tanto en niños como en adultos.

- **Exposición prolongada.** Puede causar un deterioro en funciones del sistema nervioso, además de una debilidad en los dedos, las muñecas o los tobillos. También produce un pequeño aumento de la presión sanguínea, especialmente en personas de mediana edad y de edad avanzada, y puede causar anemia.
- **Exposición a niveles altos.** Puede dañar seriamente el cerebro y los riñones de niños y adultos y causar la muerte. En mujeres embarazadas, la exposición a niveles altos de plomo puede producir pérdida del embarazo. En hombres, la exposición a altos niveles puede alterar la producción de espermatozoides. (Sistema de información ambiental regional Arequipa, 2015)
- **Carcinogenicidad.** La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha determinado que el plomo inorgánico probablemente es carcinogénico en seres humanos y que no hay suficiente información para determinar si los compuestos orgánicos de plomo pueden producir cáncer en seres humanos. (Sistema de información ambiental regional Arequipa, 2015). El Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) ha determinado que es razonable predecir que el plomo y los compuestos de plomo son carcinogénicos en seres humanos. La US EPA ha determinado que el plomo es probablemente carcinogénico en seres humanos. Algunas ratas y ratones que recibieron dosis altas de un cierto tipo de compuesto de plomo desarrollaron tumores en el riñón.
- **Efectos en niños.** La exposición al plomo es más peligrosa para niños y el feto que para adultos. Pueden exponerse al ingerir trozos de pintura seca con plomo, chupando objetos pintados con pintura con plomo o tragando polvo o tierra que contienen plomo. Los niños son más sensibles que los adultos a la

intoxicación con plomo. Un niño que ingiere cantidades altas de plomo puede desarrollar anemia y sufrir serios dolores de estómago, debilidad muscular y daño cerebral.

Si un niño tiene una exposición crónica a bajas concentraciones de plomo, el plomo puede afectar su desarrollo mental y físico. El feto puede estar expuesto al plomo a través de la madre. Efectos dañinos incluyen nacimientos prematuros, bebés de menor tamaño, disminución de la capacidad mental del niño, dificultades de aprendizaje, y retardo del crecimiento en niños pequeños. Estos efectos son más comunes si la madre o el bebé estuvieron expuestos a niveles altos de plomo. Algunos efectos pueden durar más allá de la infancia. (Sistema de información ambiental regional Arequipa, 2015)

#### **1.2.3.3. Efectos a la Salud por exposición al Mercurio.**

El sistema nervioso es muy susceptible a todas formas de mercurio. El metilmercurio y los vapores de mercurio metálico son más nocivos que otras formas, ya que una mayor cantidad de mercurio llega al cerebro.

- **Exposición subcrónica y crónica** generalmente involucra a los riñones y/o a los componentes del sistema nervioso, los órganos blandos y el efecto depende de la forma de mercurio.
- **Exposición a altos niveles de mercurio metálico, inorgánico, u orgánico** puede dañar en forma permanente a los riñones, el cerebro, y al feto. Los efectos sobre la función cerebral pueden manifestarse como irritabilidad, timidez, temblores, alteraciones a la vista o la audición y problemas de la memoria.



- **Exposición por corto tiempo a altos niveles de vapores de mercurio metálico** puede causar lesiones al pulmón, náusea, vómitos, diarrea, aumento de la presión sanguínea o del pulso, salpullidos e irritación a los ojos. (Sistema de información ambiental regional Arequipa, 2015)
- **Carcinogenicidad** Basándose en datos toxicológicos disponibles, la EPA ha determinado que el cloruro mercúrico y el metilmercurio son posiblemente carcinogénicos en seres humanos. No se encontró evidencia de que los vapores de mercurio elemental o minerales de mercurio aumenten significativamente el riesgo de cáncer en seres humanos. (Sistema de información ambiental regional Arequipa, 2015)
- **Efectos en niños.** Niños pequeños son más sensibles al mercurio que adultos. El mercurio en el cuerpo de la madre pasa al feto, en donde puede acumularse. También puede pasar al niño a través de la leche materna. Efectos nocivos del mercurio que puede pasar de la madre al feto incluyen daño cerebral, retardo mental, incoordinación, ceguera, convulsiones e incapacidad para hablar. Niños con envenenamiento de mercurio pueden desarrollar problemas al sistema nervioso y sistema digestivo y lesiones al riñón. (Sistema de información ambiental regional Arequipa, 2015)

#### **1.2.4. Marco legal en Chile para contaminación con metales pesados.**

La nueva Ley de Bases Generales del Medio Ambiente en Chile (ley 20.417), establece que la contaminación es por definición “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 manera que si no se superan las concentraciones establecidas en cada una de las normas, o simplemente si éstas no existen, legalmente no se puede hablar de contaminación.

En ausencia de normas de calidad ambiental, el Reglamento del SEIA (artículo N° 11) establece que “las normas de calidad ambiental y de emisión que se utilizarán como referencia para los efectos de evaluar si genera o presenta el riesgo indicado en la letra a) y los efectos adversos indicados en la letra b), serán aquellas vigentes en los siguientes Estados: República Federal de Alemania, República de Argentina, Australia, República Federativa de Brasil, Confederación de Canadá, Reino de España, Estados Unidos Mexicanos, Estados Unidos de Norteamérica, Nueva Zelandia, Reino de los Países Bajos (Holanda), República de Italia, Japón, Reino de Suecia y Confederación Suiza.

En Chile no existe legislación acerca de las concentraciones máximas de metales pesados permitidas en el suelo, por lo que se utilizará la norma japonesa de calidad ambiental para contaminación de suelos (Figura 7) como referencia a los resultados obtenidos. Esto, debido a que los escenarios de simulación se realizarán con soluciones, y tal norma posee las concentraciones máximas en solución de los metales pesados objetos del presente estudio, a diferencia de las normas internacionales

utilizadas en el estudio de CENMA del año 2012, que rigen las concentraciones máximas totales de metales pesados en el suelo según su uso.

Environmental Quality Standards for Soil Pollution	
Substance	Target level of soil quality examined through leaching and content tests
cadmium	0.01 mg/l in sample solution and less than 0.4mg/kg in rice for agricultural land
total cyanide	not detectable in sample solution
organic phosphorus	not detectable in sample solution
lead	0.01 mg/l or less in sample solution
chromium (VI)	0.05 mg/l or less in sample solution
arsenic	0.01 mg/l or less in sample solution, and less than 15 mg/kg in soil for agricultural land (paddy fields only)
total mercury	0.0005 mg/l or less in sample solution
alkyl mercury	not detectable in sample solution
PCBs	not detectable in sample solution
copper	less than 125 mg/kg in soil for agricultural land (paddy fields only)
dichloromethane	0.02 mg/l or less in sample solution

**Figura 7:** Estándar de calidad ambiental Japonés para contaminación de suelos.  
(Ministry of the environment, Government of Japan, 2015)

### **1.3. Hipótesis y objetivos**

#### **1.3.1. Hipótesis**

El contacto o la ingesta de partículas de escoria provenientes de Escorial Nantoco constituyen un peligro sanitario para poblaciones del sector, debido al alto contenido de arsénico, plomo y mercurio que contiene el suelo, por lo que se requiere gestión ambiental en el lugar.

#### **1.3.2. Objetivo General**

Contribuir a la evaluación del riesgo que representa el Escorial Nantoco en la salud del asentamiento urbano Villa Nantoco en la comuna de Tierra Amarilla, y si se requiere, proponer un plan de gestión ambiental para este sitio.

#### **1.3.3. Objetivos Específicos**

- Determinar las condiciones experimentales para medir concentraciones de metales tóxicos en solución, que simulen escenarios de exposición relevante.
- Determinar concentraciones de metales tóxicos en diferentes soluciones que simulen escenarios de exposición relevante, para muestras del Escorial Nantoco y para muestras de zonas no intervenidas por la actividad minera en la comuna de Tierra Amarilla.
- Evaluar el riesgo a la salud de las personas, asociado a las concentraciones encontradas en los distintos escenarios de exposición relevantes.
- Diseñar un plan de gestión del sitio considerando los resultados del trabajo.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Equipos y materiales

- Chancadora
- Mortero
- Balanza de Laboratorio, incertidumbre de  $\pm 0,01$  gramos.
- Espátula desechable
- Matraz aforo 100 mL, 200 mL, 1000 mL
- Botella HDPE 500 mL
- Matraz Earlenmayer 250 mL
- Agitador rotatorio, velocidad angular de  $30 \pm 2$  r.p.m.
- Baño de agua
- Embudo de filtración
- Filtro fibra de vidrio borosilicato, sin material aglutinante, 0,7 mm 90 mm de diámetro.
- Medidor de pH, incertidumbre de  $\pm 0,05$  unidades de pH a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Plancha calefactora
- Agitador magnético
- Tubos de centrifuga 15 mL
- Gradilla
- Pipeta aforada 1 mL , 5mL , 8 mL, 15 mL
- Propipeta
- Parafilm
- Guantes de nitrilo
- Equipo Analizador ICP-OES Perkin Elmer modelo AAnalyst 700
- Equipo Analizador EAA Perkin Elmer modelo Optima3300XL

## 2.2. Reactivos

- Ácido nítrico concentrado Merck P.A
- Ácido nítrico 10% Merck P.A
- Ácido Sulfúrico concentrado Merck P.A
- Ácido clorhídrico concentrado Merck P.A
- Ácido clorhídrico 10% Merck P.A
- Agua desionizada P.A
- Permanganato de Potasio Merck P.A
- Persulfato de Potasio Merck P.A
- Hidroxilamina Merck P.A
- Cloruro de Sodio Merck P.A
- Cloruro de Potasio Merck P.A
- Sulfato de estaño Merck P.A
- Fosfato Monosódico Merck P.A
- Fosfato Disódico Merck P.A
- Gas Argón
- Standar de Hg 100 ppb Lsol-13-1544
- Standar de metales 100 ppm High purity standards QCS-26

## 2.3. Toma de muestras y preservación

Para el estudio se utilizará las mismas muestras del Escorial Nantoco empleadas en la "Investigación preliminar y confirmatoria de suelos con potencial presencia de contaminantes (SPPC), es decir, del estudio CENMA 2012. Éstas muestras fueron tomadas del nivel superficial a 10 - 30 cm de profundidad colectadas con palas plásticas, envasadas en bolsas plásticas tipo Ziploc y transportadas en recipiente adiabático (cooler).

## **2.4. Procedimientos y Análisis de muestras**

Los análisis experimentales son efectuados en el Laboratorio de Química Ambiental del Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA). Este lugar 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.

### **2.4.1. Escenarios de exposición relevantes**

Se determinan las condiciones experimentales para simular 4 escenarios relevantes de exposición a metales pesados (mercurio, plomo, arsénico), los que consisten en:

#### **2.4.1.1. Metales Lixiviables**

Simula las condiciones de lluvia ácida que arrastra contaminantes hasta las napas subterráneas. Se utiliza el protocolo experimental SPLP

- T° digestión: 25° C
- Tiempo de digestión: 18 horas
- Extractante: Mezcla sulfo-nítrica (60:40)

**Procedimiento experimental:** Se realiza una prueba de presencia de carbonatos adicionando ácido nítrico concentrado a cada muestra de suelo, si se observan

burbujas se está en presencia de carbonatos, lo que condiciona el tipo de extractante a utilizar.

Se toman muestras de 20 g de cada suelo y para suelos con carbonato se agregan 400 g de una mezcla sulfo-nitrica de pH 4,2. Los suelos sin carbonato se digieren con 400 g de mezcla sulfo-nitrica de pH 5,0. Luego las muestras se agitan en un agitador rotatorio de velocidad angular de  $30 \pm 2$  r.p.m y a una temperatura de 25°C durante 18 horas. Pasado dicho tiempo se filtra y se mide el pH. Luego se adiciona ácido nítrico con el objetivo de que el pH quede menor que 2.

Del filtrado obtenido se separan 10 mL para análisis de ICP (Pb, As) y 100 mL para análisis de absorción atómica (Hg). Como control del proceso se preparan 4 blancos de reactivo, 4 fortificaciones de Blancos de reactivo (Spikes) tanto para metales (de  $0.75 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$ ) como para mercurio (de  $5 \text{ ug} \times \text{L}^{-1}$ ).

#### **2.4.1.2. Metales Bioaccesibles**

Simula la ingestión de suelo

- T° digestión: 37° C
- Tiempo de digestión: 2 horas
- Extractante: Buffer HCl-KCl

**Procedimiento experimental:** A 10 gramos de muestra se adicionan 200 mL de solución buffer HCl-KCl de pH 2, y se deja reaccionar en un baño termostatado a 37°C durante 2 horas. Luego se filtra al vacío y se mide el pH para verificar que éste se ha mantenido en 2. Del filtrado obtenido se separan 10 mL para análisis de ICP (Pb,As) y 100 mL para análisis de absorción atómica (Hg). Como control del proceso se preparan

4 blancos de reactivo, 4 fortificaciones de Blancos de reactivo (Spikes) tanto para metales (de  $0.75 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$ ) como para mercurio (de  $5 \text{ ug} \times \text{L}^{-1}$ ).

#### **2.4.1.3. Metales Solubles para humanos**

Simula la adsorción a través de la piel por contacto dérmico

- T° digestión:  $37^\circ \text{ C}$
- Tiempo de digestión: 2 horas
- Extractante: Agua desionizada

**Procedimiento experimental:** A 10 gramos de muestra, se adicionan 200 mL de agua desionizada, y se dejan a  $37^\circ \text{C}$  durante 2 horas en baño termorregulado, agitando frecuentemente. Luego se filtra al vacío, y se adiciona ácido nítrico para bajar el pH a un valor menor que 2. Del filtrado acidificado obtenido se separan 10 mL para análisis de ICP (Pb,As) y 100 mL para análisis de absorción atómica-VF (Hg). Como control del proceso se preparan 4 blancos de reactivo, 4 fortificaciones de Blancos de reactivo (Spikes) tanto para metales (de  $0.75 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$ ) como para mercurio (de  $5 \text{ ug} \times \text{L}^{-1}$ ).

#### **2.4.1.4. Metales Solubles para plantas**

Simula la incorporación a las plantas a través de las raíces.

- T° digestión:  $25^\circ \text{ C}$
- Tiempo de digestión: 2 horas
- Extractante: KCl + Buffer de fosfato

**Procedimiento experimental:** A 10 gramos de muestra, se agrega 200 mL de solución de KCl + buffer de fosfato de pH 7, luego se dejan a  $25^\circ \text{ C}$  en un baño durante 2 horas.

Pasado dicho tiempo se filtra al vacío y se mide el pH para verificar que éste se ha mantenido en 7. Del filtrado obtenido se separan 10 mL para análisis de ICP (Pb,As) y 100 mL para análisis de absorción atómica (Hg). Como control del proceso se preparan 4 blancos de reactivo, 4 fortificaciones de Blancos de reactivo (Spikes) tanto para metales (de  $0.75 \text{ mg} \times \text{L}^{-1}$ ) como para mercurio (de  $5 \text{ ug} \times \text{L}^{-1}$ ).

Todos los análisis se realizarán en triplicado por cada muestra de escoria de Escorial Nantoco. Se incluye también la realización de blancos de reactivos, y muestras blanco de suelo (cuarzo molido) así como blancos fortificados de reactivos. En Tabla 1 se resume el protocolo experimental:

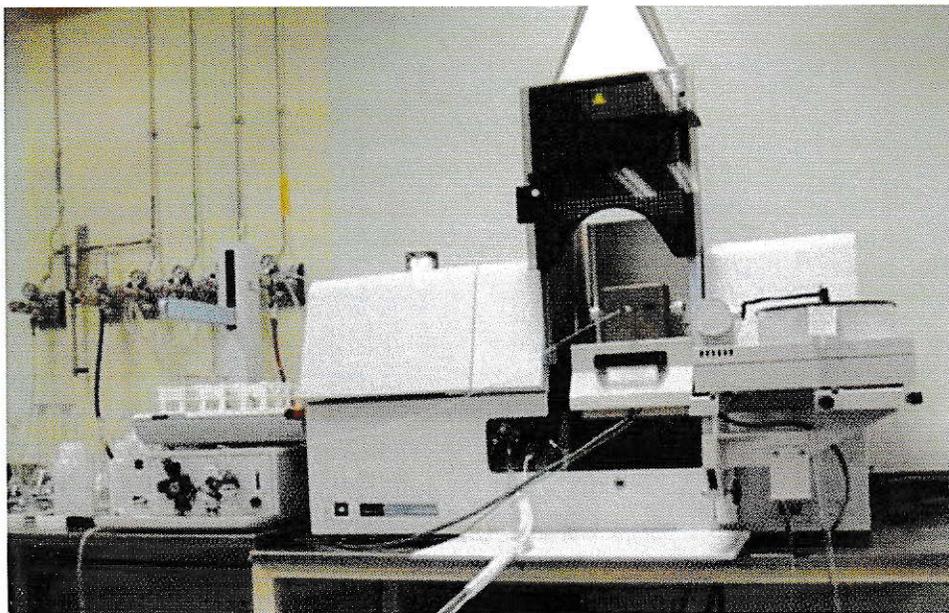
**Tabla 1:** Resumen de protocolo experimental

<b>Fracción de metales en el suelo</b>	<b>Lixiviables</b> (simula las condiciones de lluvia ácida que arrastra contaminantes hasta las napas)	<b>Bioaccesibles</b> (simula la ingestión de suelo)	<b>Solubles para humanos</b> (simula la adsorción a través de la piel)	<b>Solubles para plantas</b> (simula la incorporación a las plantas a través de las raíces)
Acido para digestión	$\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$	HCl	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{O}$ , KCl
Temperatura para digestión	25 °C	37 °C	37 °C	25 °C
Tiempo de digestión	18 horas	2 horas	2 horas	2 horas
Otras condiciones	Procedimiento SPLP para evaluación de toxicidad extrínseca de residuos	Tampón de pH 2	-	Tampón de pH 7 - 8

#### 2.4.2. Determinación de concentración de mercurio por EAA-VF

La determinación de mercurio en solución, se realizará utilizando la metodología EPA 7470, la cual consiste en que las muestras acuosas se digieren con ácido sulfúrico, ácido nítrico, permanganato de potasio y persulfato de potasio con el fin de oxidar los compuestos organo-mercurio a ión mercúrico.

Una vez que las muestras digeridas se han enfriado, se añade cloruro de hidroxilamina con sulfato de sodio para reducir el exceso de permanganato. A continuación se añade sulfato de estaño para efectuar la reducción a mercurio elemental. Se mide la absorbancia a 253,7 nm y a partir de una curva de calibración se determina la concentración de mercurio en la muestra utilizando para ello un equipo Perkin Elmer modelo AAnalyst 700 que se ilustra en la Figura 8 (EPA, 1994)

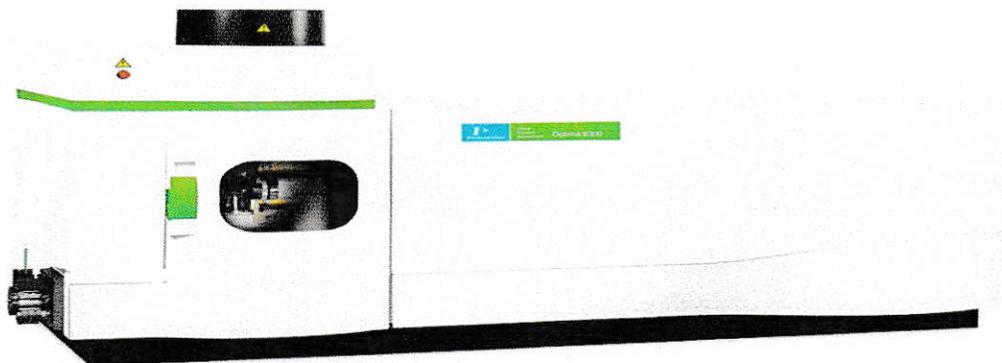


**Figura 8:** Equipo Perkin Elmer modelo AAnalyst 700

### **2.4.3. Determinación de concentración de plomo y arsénico por ICP-OES**

Mediante la espectroscopia de emisión con plasma de acoplamiento inductivo es posible determinar de forma cuantitativa la mayoría de los elementos de la tabla periódica a niveles de traza y ultra-traza, partiendo de muestras en disolución acuosa. La muestra, en forma líquida, es transportada por medio de una bomba peristáltica hasta el sistema nebulizador donde es transformada en aerosol gracias a la acción de gas argón. Dicho aerosol es conducido a la zona de ionización que consiste en un plasma generado al someter un flujo de gas argón a la acción de un campo magnético oscilante inducido por una corriente de alta frecuencia.

En estas condiciones, los átomos presentes en la muestra son ionizados/excitados. Al volver a su estado fundamental, estos iones o átomos excitados emiten radiaciones de una longitud de onda que es característica de cada elemento. Esta radiación pasa a través de un sistema óptico que separa la radiación según su longitud de onda. A continuación un detector mide la intensidad de cada una de las radiaciones relacionando ésta con la concentración de cada elemento en la muestra. El equipo utilizado para efectuar este análisis es Perkin Elmer modelo Optima 8300 (Figura 9, Universidad de Alicante, 2015)



**Figura 9:** Equipo Perkin Elmer modelo Optima 8300

## **2.5. Evaluación del riesgo a la salud de las personas**

Para evaluar los riesgos que constituyen las concentraciones de los metales (mercurio, plomo, arsénico) obtenidos por los métodos anteriormente descritos, en la salud de las personas, se utilizó como referencia la Guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes, específicamente la metodología de trabajo fase III (actividad 1), esto quiere decir, evaluación de la exposición, evaluación de la toxicidad, caracterización del riesgo y análisis de la incertidumbre. (Guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes, 2012)

Para realizar una evaluación acertada del riesgo, es necesario determinar las rutas de exposición en conjunto con los receptores de exposición, para luego con aquella información realizar un modelo conceptual de exposición, el cual cumple un rol importante debido a que en éste se esquematiza la situación en términos de los factores que inciden en la cadena de riesgos:

- Fuente de contaminación
- Contaminantes de interés
- Distribución en las matrices ambientales

- Mecanismos de movilización
- Rutas de exposición
- Potenciales receptores

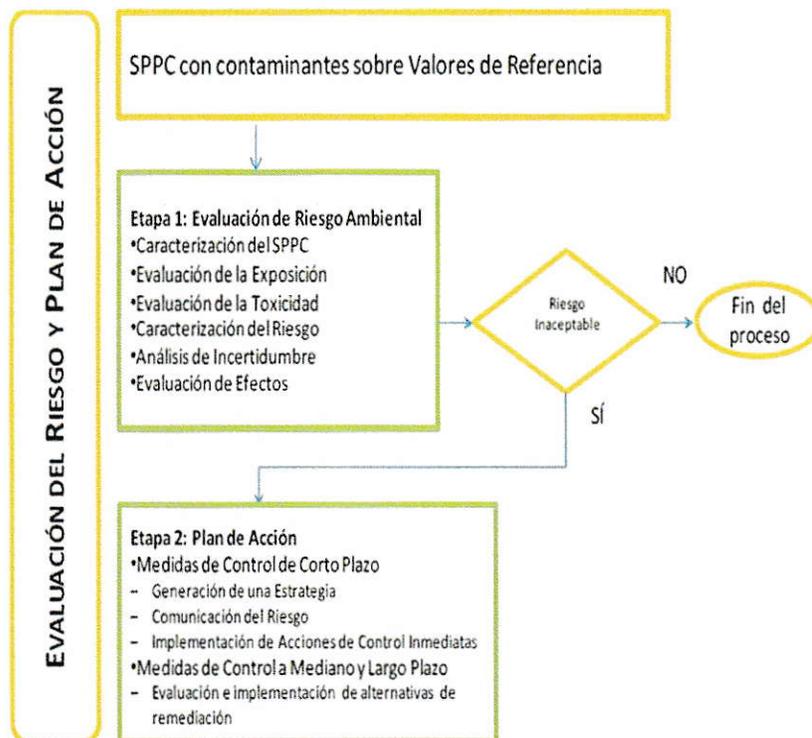
**Antecedentes recabados en las etapas previas de investigación.** Una ruta de exposición puede ser completa, potencial o incompleta. Una ruta de exposición completa es el caso en que existe evidencia que:

- Todos los elementos de una vía de exposición existen, han existido o van a existir (en un tiempo cercano)
- Todos los elementos de la vía de exposición están conectados
- Los contaminantes están presentes en el medio ambiental de contacto
- Los contaminantes están presentes en el punto de exposición

Por lo que ésta es la definición que corresponde al presente caso de estudio, es decir, al Escorial Nantoco.

## **2.6. Plan de gestión ambiental**

Si se determina la necesidad de la elaboración de un plan de gestión ambiental, se utilizará como referencia la guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes, específicamente la metodología de trabajo fase III (Figura 10, actividad 2), esto quiere decir, medidas de control a corto plazo, y medidas de control a mediano y largo plazo. (Guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes, 2012)



**Figura 10:** Esquema Evaluación del riesgo y plan de acción. (Guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes, 2012)

### III. RESULTADOS

#### 3.1. Tablas de pH

A continuación se muestran los resultados de los pH de cada una de las muestras en los diferentes escenarios de exposición relevantes

**Tabla 2:** pH en Lixiviabes a 25°C

Muestra	Tipo de muestra	pH
EN-01	Escoria	6,50
EN-02	Escoria	6,41
EN-03	Escoria	6,27
EN-04	Escoria	3,29
EN-05	Escoria	3,45
EN-06	Escoria	3,44
EN-07	Escoria	3,51
EN-08	Escoria	3,59
SN-01	Suelo	7,55
CR-N	Sedimento	3,60
VBKan-01	Suelo	7,06
VBKan-02	Suelo	7,19
VBKan-03	Suelo	7,07
VBKtp-01	Suelo	7,18
VBKtp-02	Suelo	6,23
VBKtp-03	Suelo	6,48
VBQal-01	Suelo	7,31
VBQal-02	Suelo	6,80
VBQal-03	Suelo	2,28
VBTKg-01	Suelo	3,35
VBTKg-02	Suelo	2,65
VBTKg-03	Suelo	7,05



Se observa que los valores de pH son variables respecto al tipo de suelo, y en el caso de las muestras de escoria, las correspondientes a EN-01, EN-02 y EN-03 presentan pH cercano al neutro a diferencia de las demás que son ácidas.

**Tabla 3:** pH en Bioaccesibles a 37°C

Muestra	Tipo de muestra	pH
EN-01	Escoria	1,66
EN-02	Escoria	1,54
EN-03	Escoria	1,96
EN-04	Escoria	1,60
EN-05	Escoria	1,57
EN-06	Escoria	1,89
EN-07	Escoria	1,76
EN-08	Escoria	1,60
SN-01	Suelo	1,82
CR-N	Sedimento	1,57
VBKan-01	Suelo	2,04
VBKan-02	Suelo	1,70
VBKan-03	Suelo	1,51
VBKtp-01	Suelo	1,61
VBKtp-02	Suelo	1,62
VBKtp-03	Suelo	1,63
VBQal-01	Suelo	1,63
VBQal-02	Suelo	1,85
VBQal-03	Suelo	1,59
VBTKg-01	Suelo	1,80
VBTKg-02	Suelo	1,60
VBTKg-03	Suelo	1,87

Se observa que todos los pH se encuentran menores o muy cercanos a 2, esto debido a que en esta digestión se utilizó HCl junto a un buffer para simular las condiciones del estómago, lo que resulto bien ya que el buffer no se vio afectado en su capacidad amortiguadora.

**Tabla 4:** pH en Solubles para humanos a 37°C

Muestra	Tipo de muestra	pH
EN-01	Escoria	3,83
EN-02	Escoria	2,95
EN-03	Escoria	3,63
EN-04	Escoria	3,56
EN-05	Escoria	3,25
EN-06	Escoria	2,24
EN-07	Escoria	4,26
EN-08	Escoria	5,70
SN-01	Suelo	5,89
CR-N	Sedimento	7,68
VBKan-01	Suelo	7,25
VBKan-02	Suelo	6,53
VBKan-03	Suelo	6,35
VBKtp-01	Suelo	6,57
VBKtp-02	Suelo	7,28
VBKtp-03	Suelo	6,56
VBQal-01	Suelo	6,31
VBQal-02	Suelo	6,22
VBQal-03	Suelo	6,68
VBTKg-01	Suelo	6,28
VBTKg-02	Suelo	6,02
VBTKg-03	Suelo	6,03

Esta simulación se realizó con agua desionizada, por lo que los pH reflejan el valor de cada una de las muestras, siendo las muestras de escorias más ácidas que las muestras obtenidas en los sitios de línea base.

**Tabla 5:** pH en Solubles para plantas a 25°C

Muestra	Tipo de muestra	pH
EN-01	Escoria	6,92
EN-02	Escoria	6,90
EN-03	Escoria	6,93
EN-04	Escoria	6,86
EN-05	Escoria	6,94
EN-06	Escoria	6,95
EN-07	Escoria	6,93
EN-08	Escoria	6,95
SN-01	Suelo	6,96
CR-N	Sedimento	6,96
VBKan-01	Suelo	6,98
VBKan-02	Suelo	6,95
VBKan-03	Suelo	6,96
VBKtp-01	Suelo	6,99
VBKtp-02	Suelo	6,99
VBKtp-03	Suelo	6,91
VBQal-01	Suelo	6,95
VBQal-02	Suelo	6,92
VBQal-03	Suelo	6,93
VBTKg-01	Suelo	7,04
VBTKg-02	Suelo	6,96
VBTKg-03	Suelo	6,99

En esta simulación se utilizó un buffer de fosfatos, con la finalidad de mantener un pH neutro, lo que se consiguió a cabalidad.

### **3.2. Extracción de As, Pb y Hg en Línea base y Escorial Nantoco**

A continuación se exponen los resultados obtenidos de los 4 experimentos que se describieron en el método experimental, junto a los resultados de concentraciones de metales totales que se obtuvieron en el estudio anteriormente realizado en CENMA, para luego comparar los valores obtenidos en gráficos que mostrarán la extracción de metales que se obtuvo en cada una de los experimentos..

### 3.2.1. Metales Bioaccesibles

En cada una de las situaciones de los 3 distintos metales se puede observar que al comparar los valores de concentraciones de metales totales con las concentraciones de la extracción que se realizó en el experimento de bioaccesibles, estas últimas son muy menores. Ésta situación se puede visualizar en los gráficos (Figuras 11 a 16) que se muestran a continuación:

#### 3.2.1.1. Arsénico

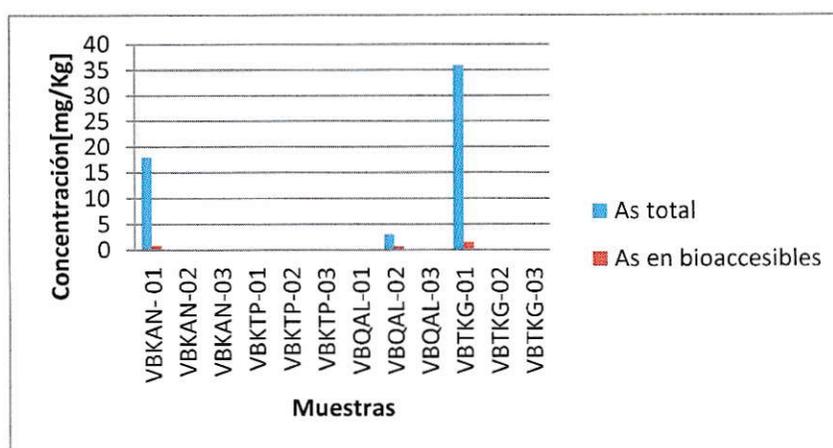


Figura 11: Extracto de arsénico en bioaccesibles en Línea base

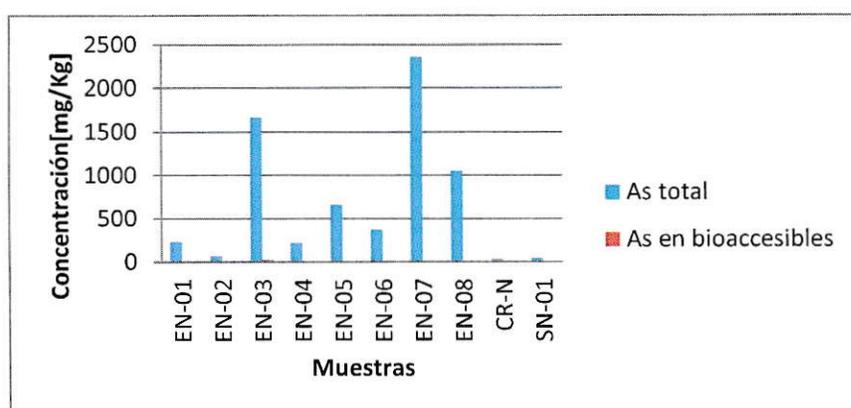


Figura 12: Extracto de arsénico en bioaccesibles en Escorial Nantoco

### 3.2.1.2. Plomo

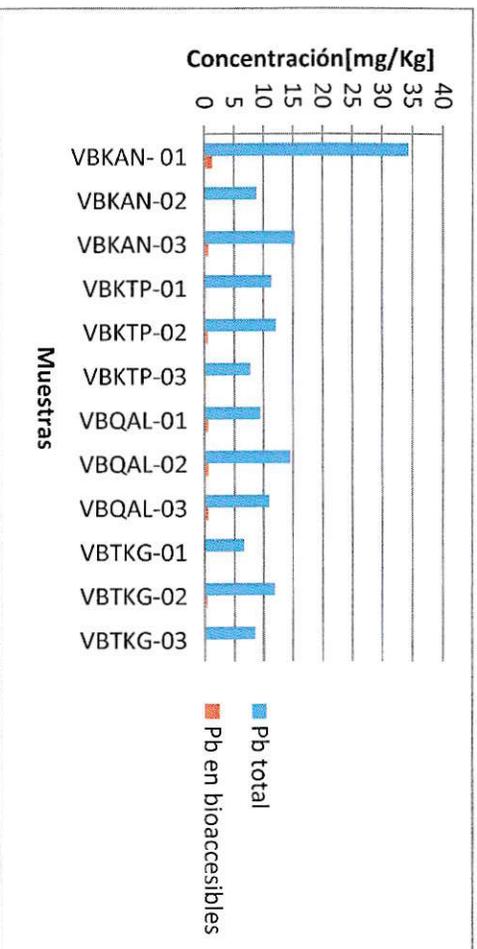


Figura 13: Extracto de plomo en bioaccesibles en Línea base

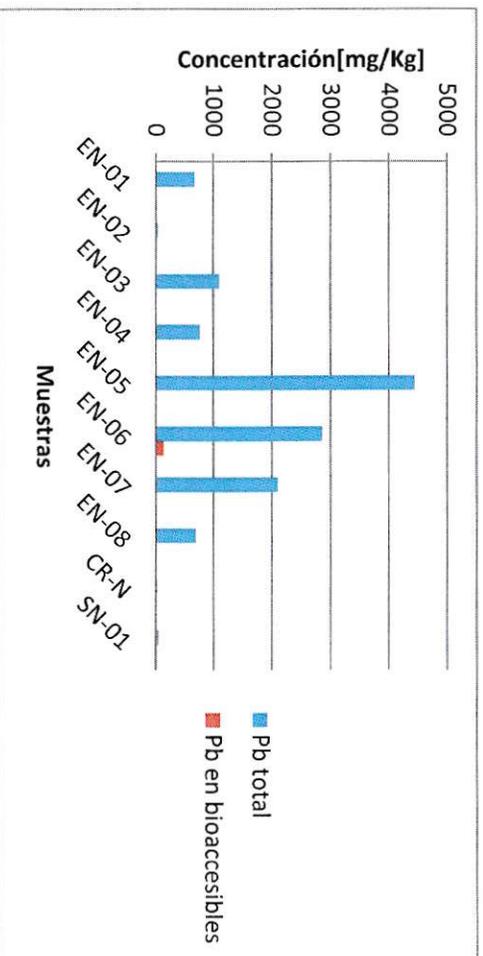


Figura 14: Extracto de plomo en bioaccesibles en Escorial Nantoco

### 3.2.1.3. Mercurio

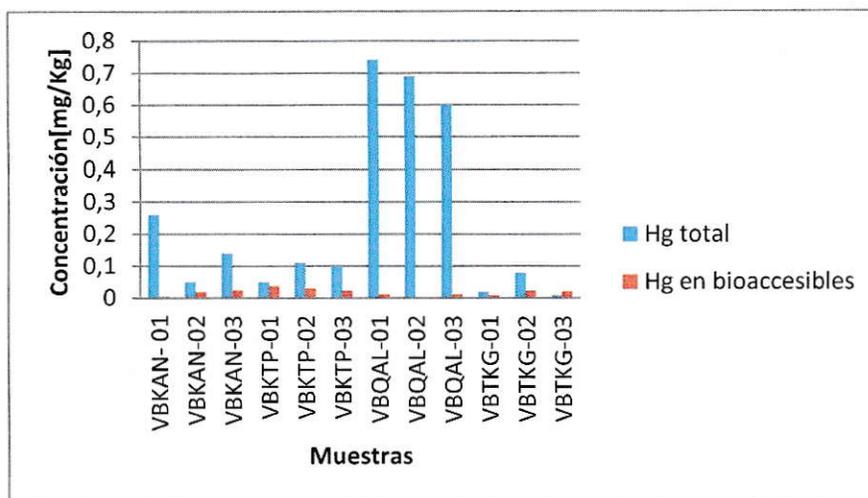


Figura 15: Extracto de mercurio en bioaccesibles en Línea base

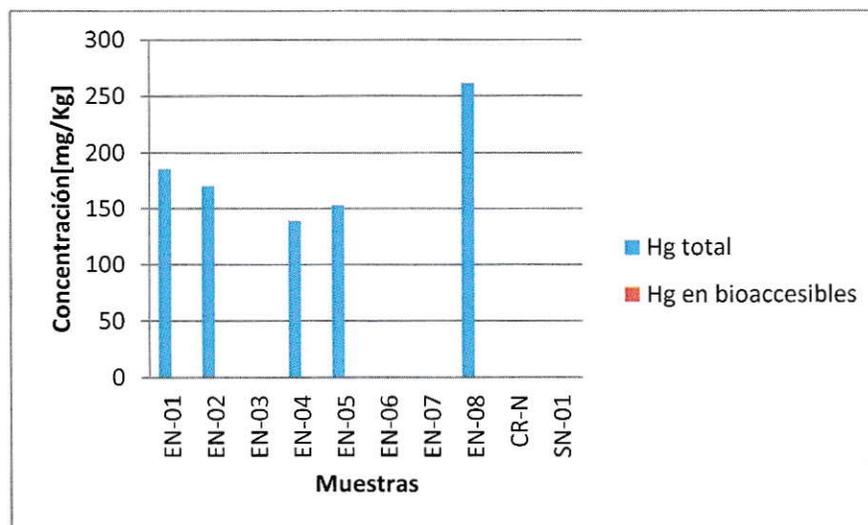


Figura 16: Extracto de mercurio en bioaccesibles en Escorial Nantoco

### 3.2.2. Metales solubles en humanos

Esta extracción que se realizó con agua desionizada, presenta valores aún menores que la del experimento de bioaccesibles, debido principalmente a la influencia del pH en el que se efectuó.

#### 3.2.2.1 Arsénico soluble

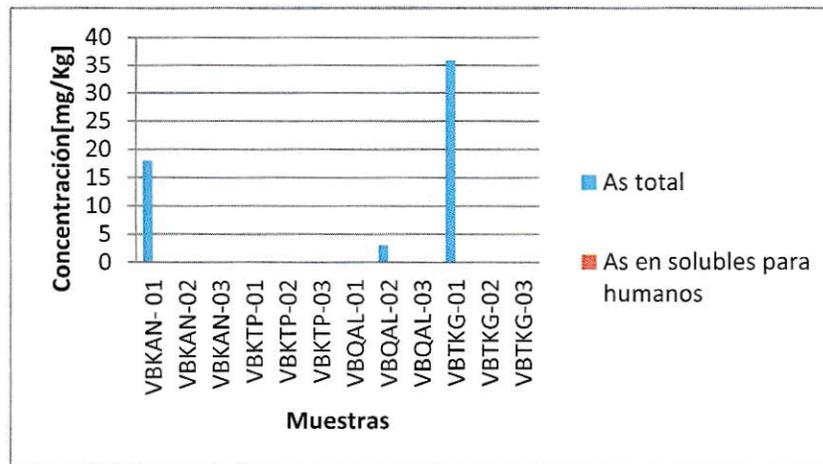


Figura 17: Extracto de arsénico en solubles para humanos en Línea base

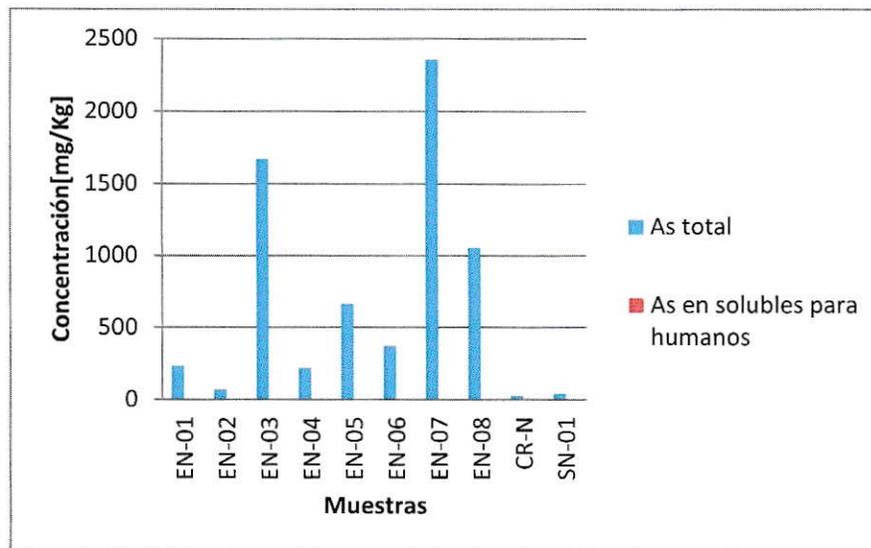


Figura 18: Extracto de arsénico en solubles para humanos en Escorial Nantoco

### 3.2.2.2. Plomo soluble

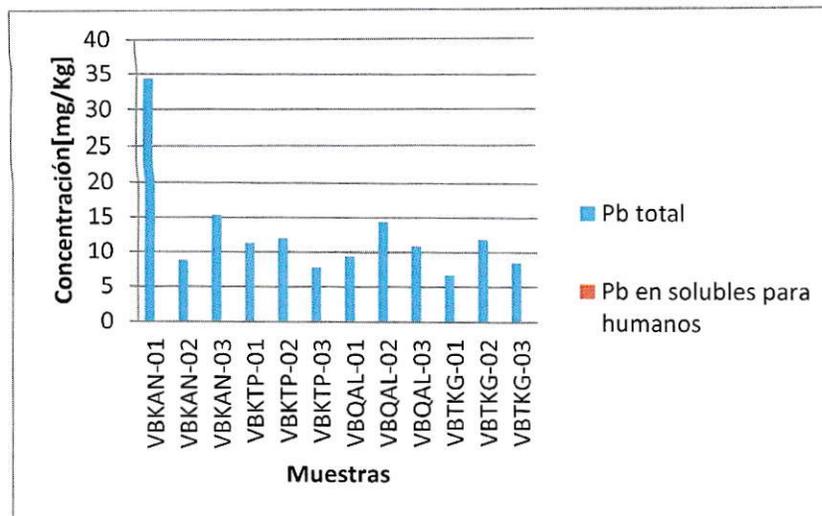


Figura 19: Extracto de plomo en solubles para humanos en Línea base

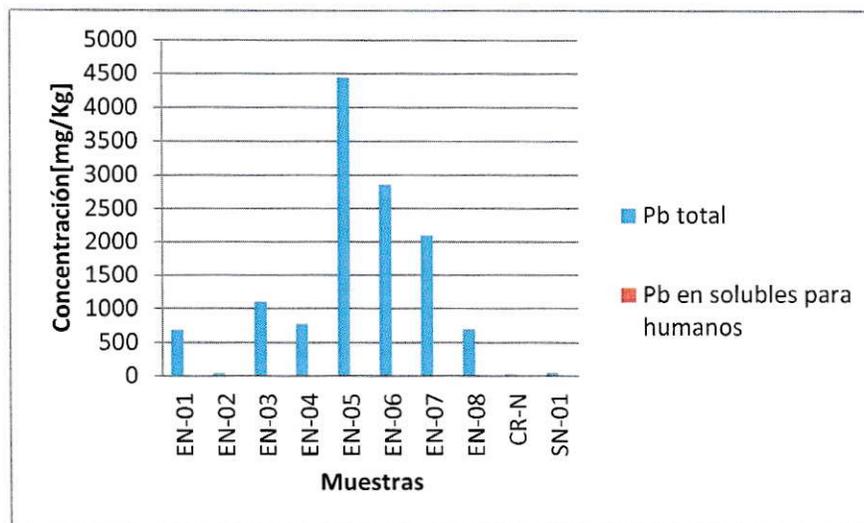


Figura 20: Extracto de plomo en solubles para humanos en Escorial Nantoco

### 3.2.2.3. Mercurio soluble

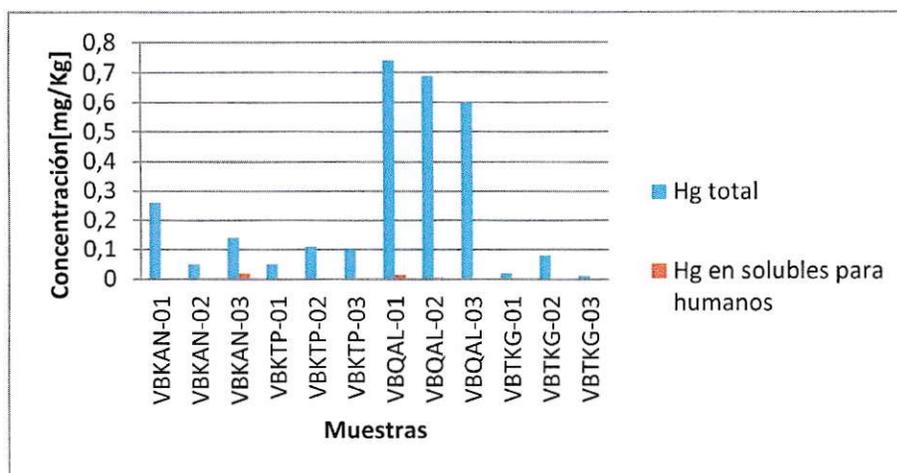


Figura 21: Extracto de mercurio en solubles para humanos en Línea base

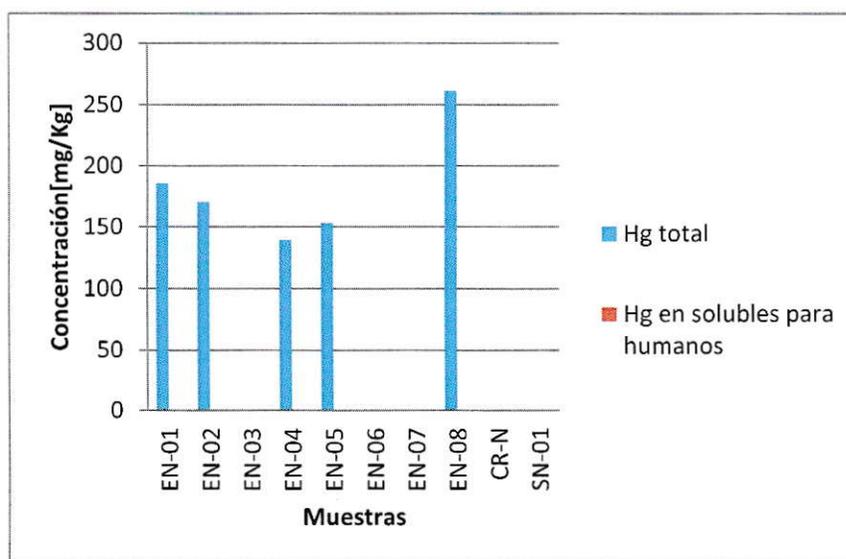


Figura 22: Extracto de mercurio en solubles para humanos en Escorial Nantoco

### 3.2.3. Metales solubles en plantas

Al igual que en los experimentos anteriores se observa una pequeña cantidad de extracción de concentración de los 3 metales pesados objetos del estudio. Los gráficos a continuación ayudan a ver que respecto de los valores de concentraciones totales, los de ésta extracción no se visualizan.

#### 3.2.3.1. Arsénico soluble

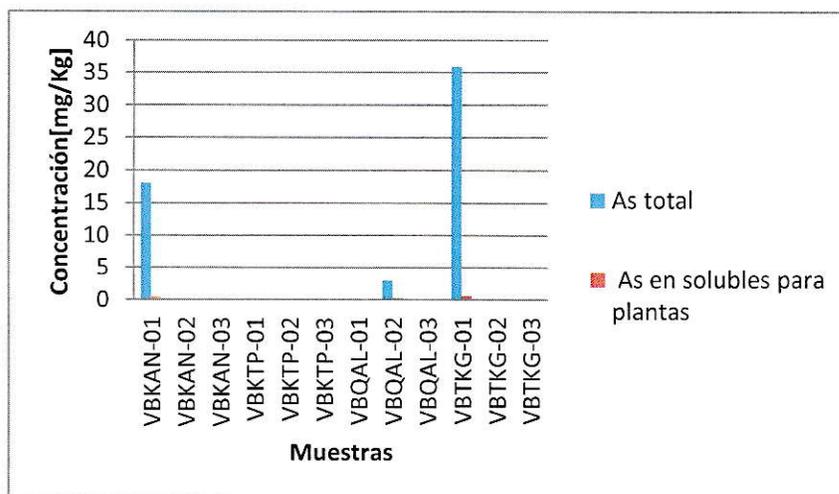


Figura 23: Extracto de arsénico en solubles en plantas en Línea base

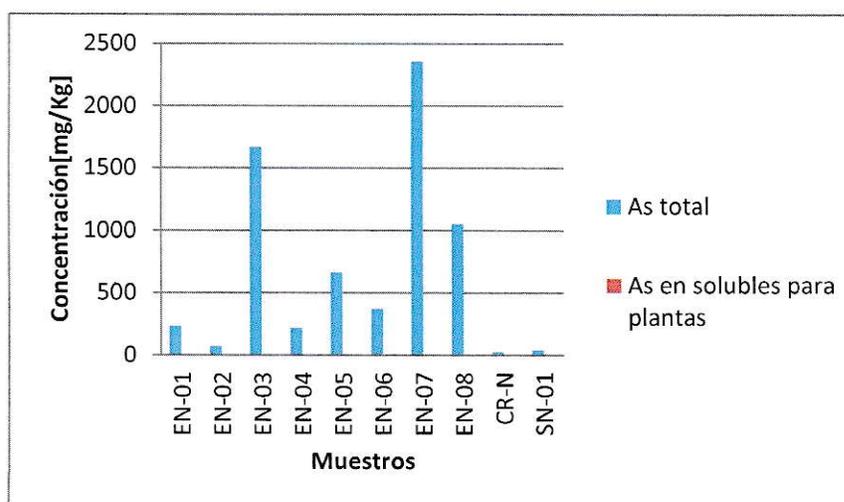


Figura 24: Extracto de arsénico en solubles en plantas en Escorial Nantoco

### 3.2.3.2. Plomo soluble

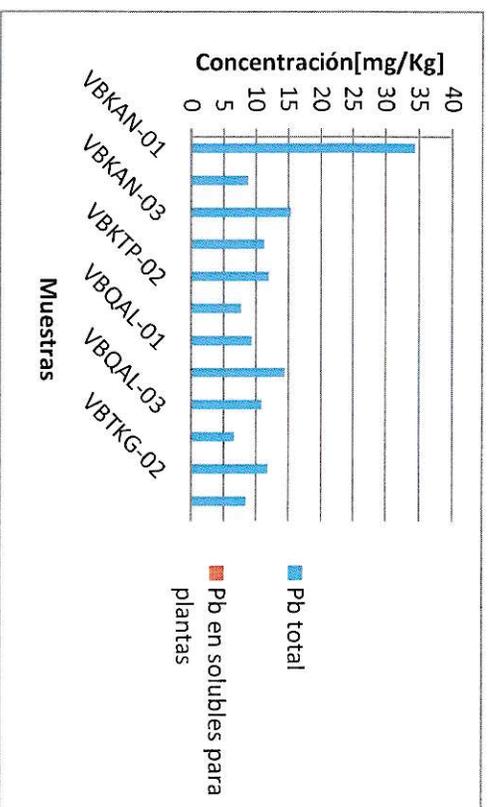


Figura 25: Extracto de plomo en solubles en plantas en Línea base

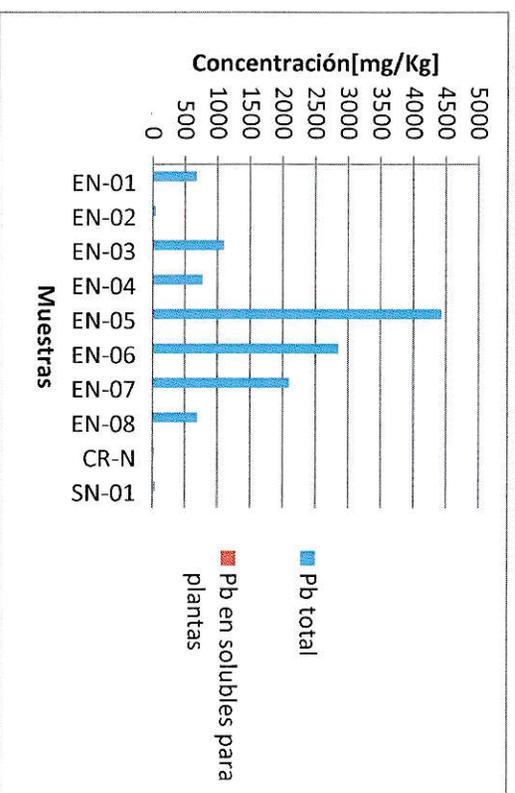


Figura 26: Extracto de plomo en solubles en plantas en Escorial Nantoco

### 3.2.3.3. Mercurio Soluble

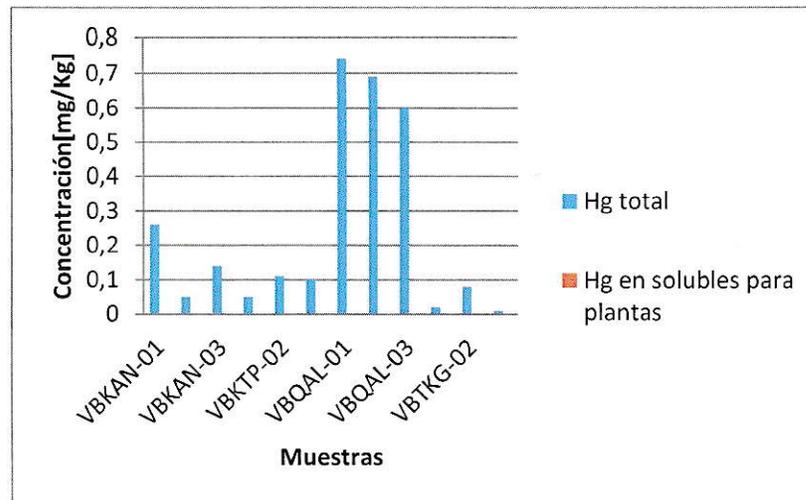


Figura 27: Extracto de mercurio en solubles en plantas en Línea base

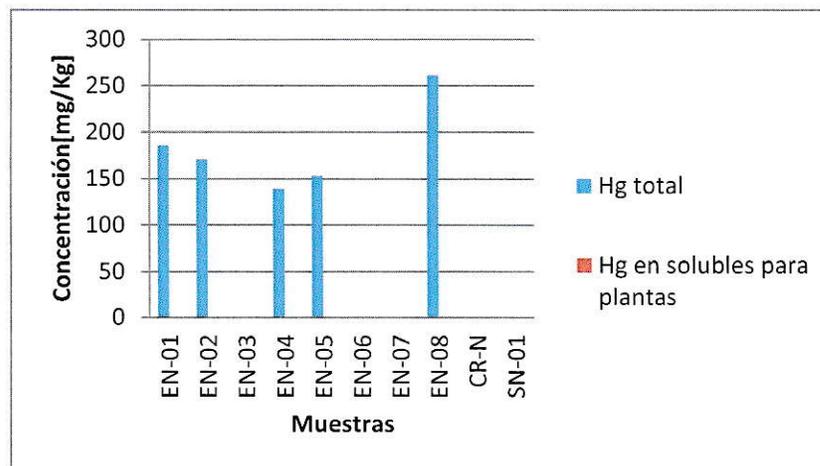


Figura 28: Extracto de mercurio en solubles en plantas en Escorial Nantoco

### 3.2.4. Metales Lixiviables

#### 3.2.4.1. Comparación Extracción SPLP con Decreto Supremo 148:

Para el caso del experimento que simula la lixiviación de metales pesados a napas subterráneas de agua, se comparará con los valores de concentraciones máximas permisibles estipuladas en el Decreto Supremo 148, el cual es el reglamento sanitario para el manejo de residuos peligrosos. Luego de la tabla se exponen los gráficos de la comparación, en los cuales se observa que ninguna de las concentraciones máximas permisibles de los 3 diferentes metales es sobrepasada.

- DS 148:
  - Concentración máximas permisible As: 5,0 mg/L
  - Concentración máximas permisible Pb: 5,0 mg/L
  - Concentración máximas permisible Hg: 0,2 mg/L

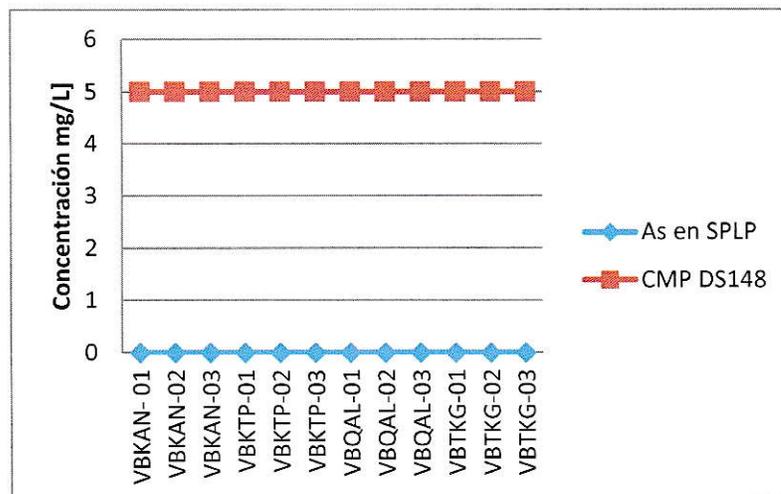
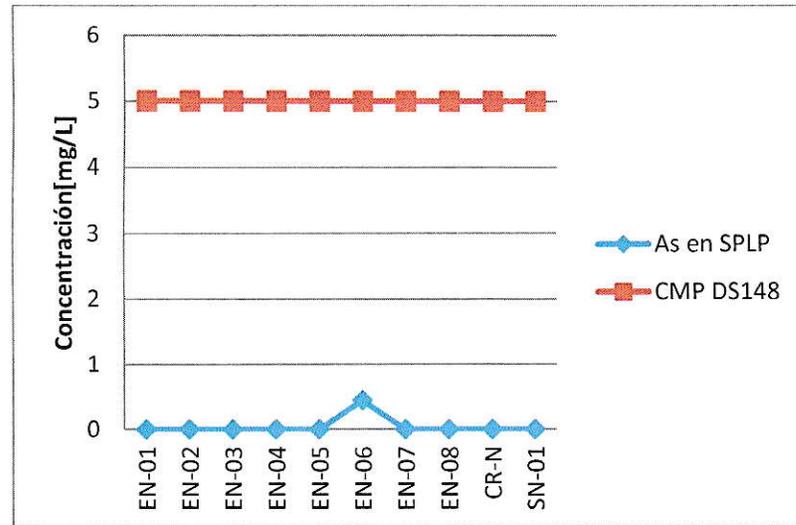
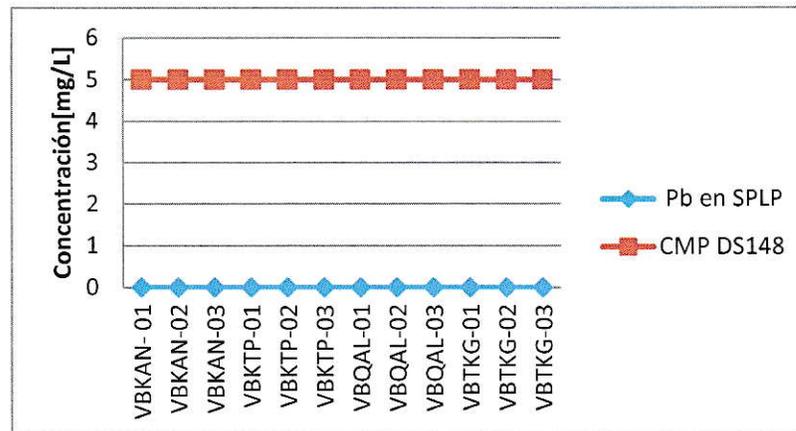


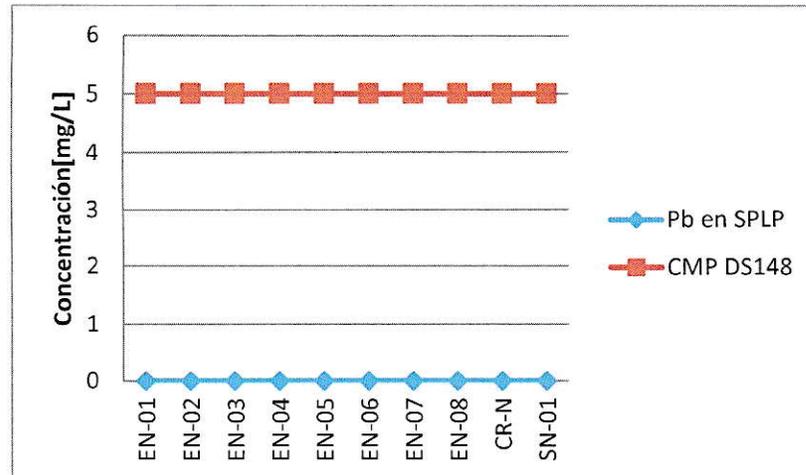
Figura 29: Comparación de arsénico en línea base con DS148



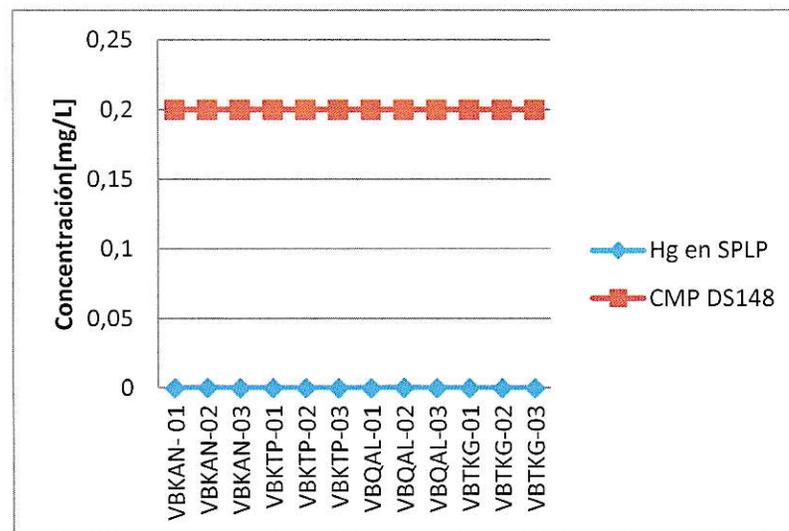
**Figura 30:** Comparación de arsénico en Escorial Nantoco con DS148



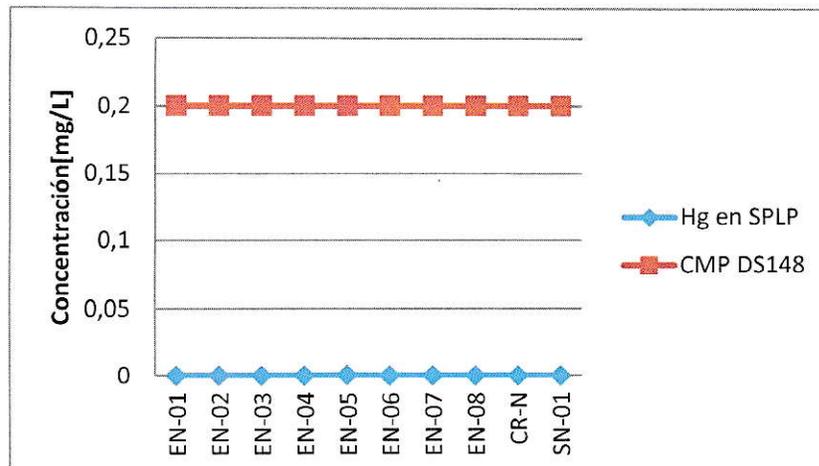
**Figura 31:** Comparación de plomo en línea base con DS148



**Figura 32:** Comparación de plomo en Escorial Nantoco con DS148



**Figura 33:** Comparación de mercurio en línea base con DS148



**Figura 34:** Comparación de mercurio en Escorial Nantoco con DS148

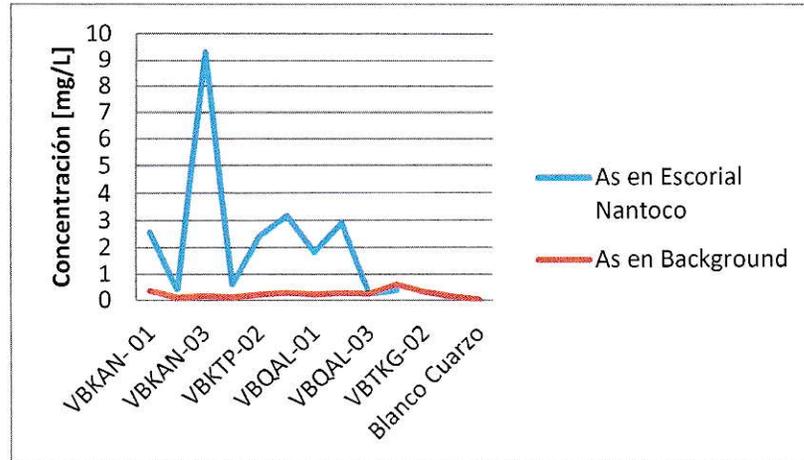
### 3.3. Comparación con Línea base y Norma Japonesa

#### 3.3.1. Metales Bioaccesibles

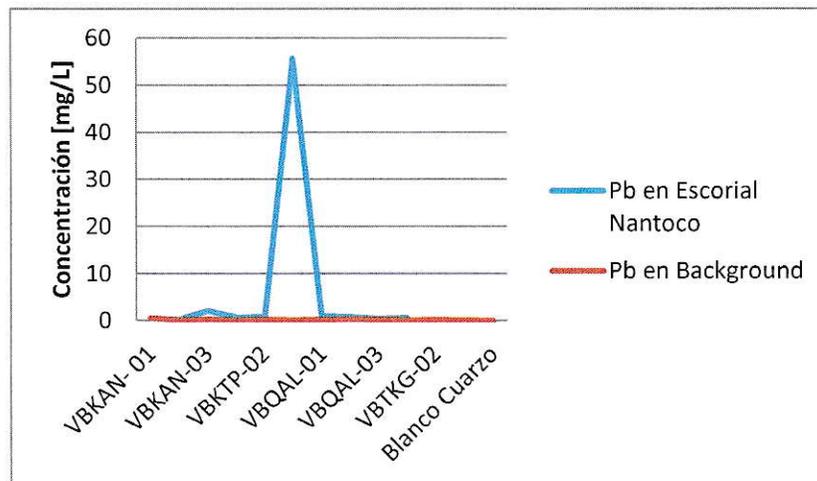
En la comparación con las concentraciones de línea base, los valores de As y Pb son mayores en Escorial Nantoco, y lo contrario sucede en el caso del Hg. Cuando se compara con la Norma japonesa se observa que As la supera en varios puntos, el Pb en uno notoriamente, mientras que en el Hg no se supera en ninguno.

#### Norma japonesa:

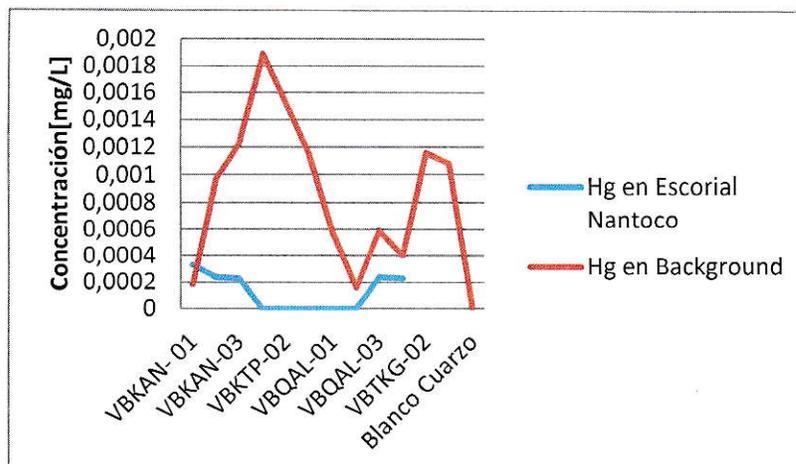
- As=0,010 mg/L
- Pb=0,010 mg/L
- Hg=0,00050 mg/L



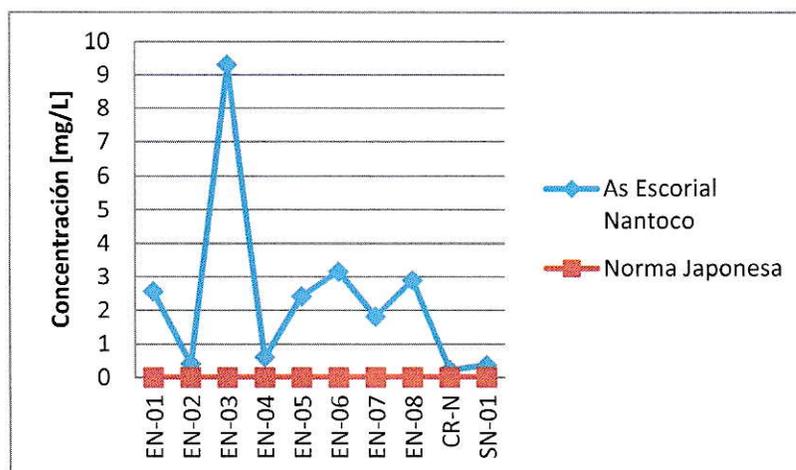
**Figura 35:** Comparación de arsénico extraído en Escorial Nantoco con la línea base correspondiente a la fracción bioaccesibles



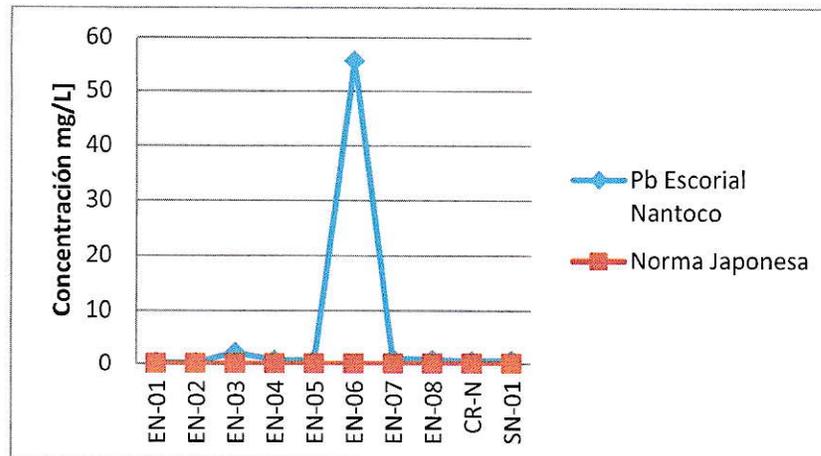
**Figura 36:** Comparación de plomo extraído en Escorial Nantoco con la línea base correspondiente a la fracción bioaccesibles



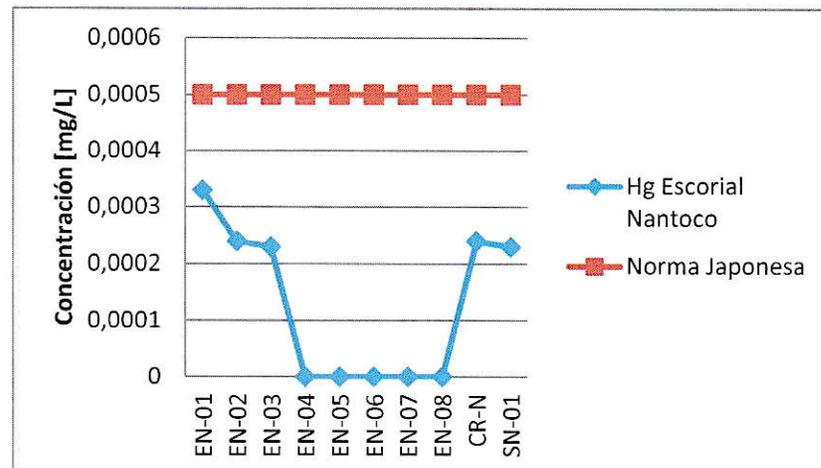
**Figura 37:** Comparación de mercurio extraído en Escorial Nantoco con la línea base correspondiente a la fracción bioaccesibles



**Figura 38:** Comparación de arsénico en la fracción bioaccesibles con norma Japonesa



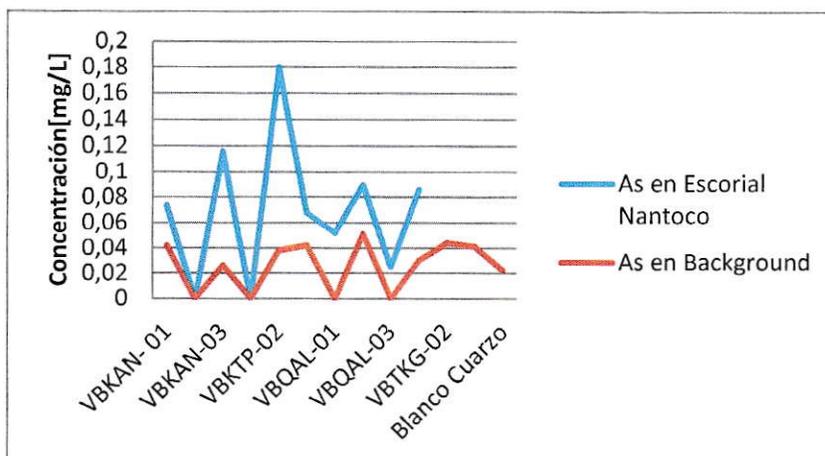
**Figura 39:** Comparación de plomo en la fracción bioaccesibles con norma Japonesa



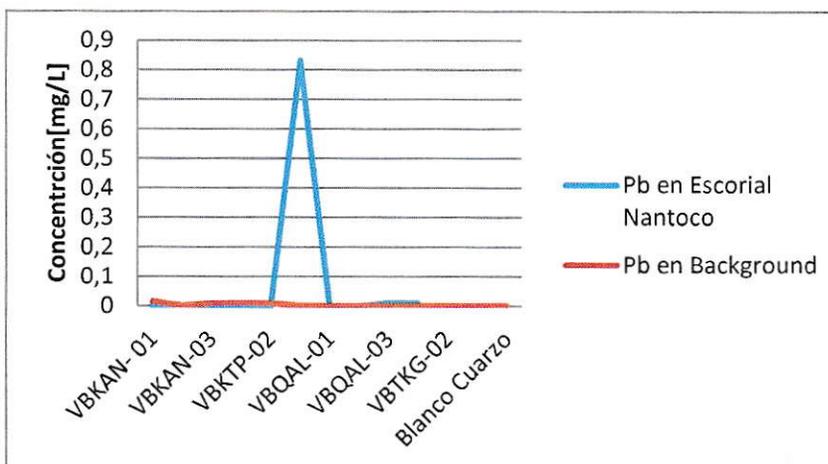
**Figura 40:** Comparación de mercurio en la fracción bioaccesibles con norma Japonesa

### 3.3.2. Metales Solubles en Humanos

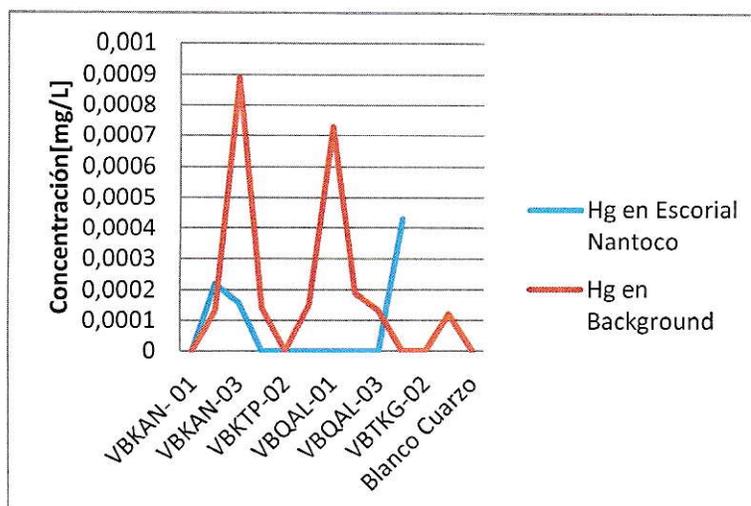
En esta simulación de exposición relevante, se observa que al comparar los resultados con la Línea base nuevamente el As se ve mayor en varios puntos, el Pb en uno y el Hg es más irregular. En el caso de la comparación con la normativa japonesa se observa que el As la supera en muchos casos, el Pb la supera ampliamente en la muestra EN-06 y el Hg en ninguno de los casos.



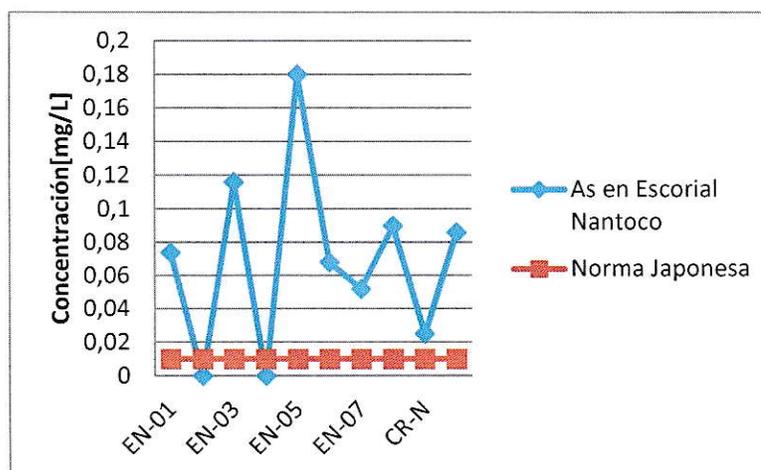
**Figura 41:** Comparación de arsénico extraído en Escorial Nantoco con la Línea base correspondiente a la fracción solubles en humanos



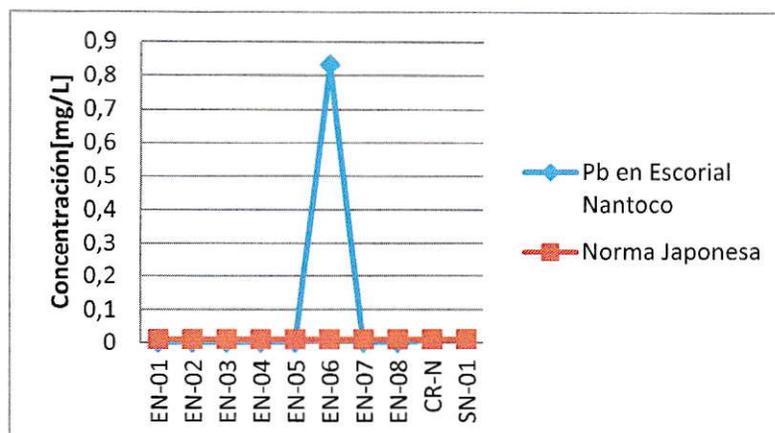
**Figura 42:** Comparación de plomo extraído en Escorial Nantoco con la Línea base correspondiente a la fracción solubles en humanos



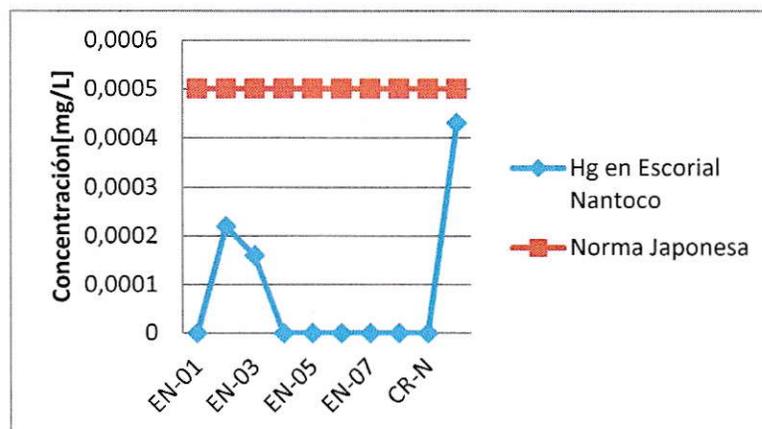
**Figura 43:** Comparación de mercurio extraído en Escorial Nantoco con la Línea base correspondiente a la fracción solubles en humanos



**Figura 44:** Comparación de arsénico en la fracción solubles en humanos con norma Japonesa



**Figura 45:** Comparación de plomo en la fracción solubles en humanos con norma Japonesa

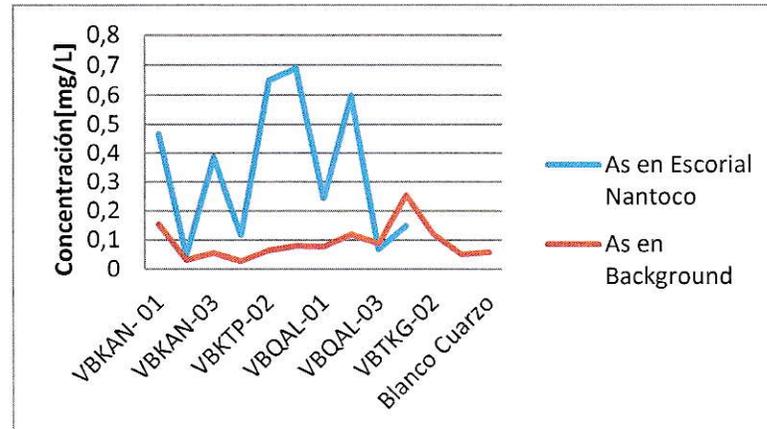


**Figura 46:** Comparación de mercurio en la fracción solubles en humanos con norma Japonesa

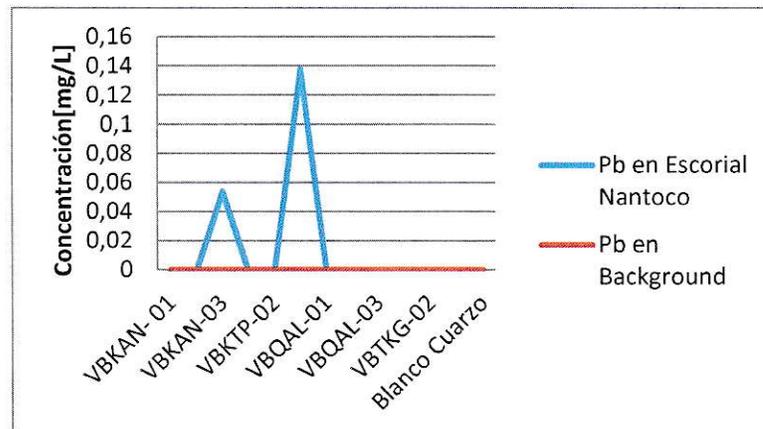
### 3.3.3. Metales Solubles en plantas

Finalmente en la simulación de incorporación de metales pesados a plantas a través de sus raíces, se obtienen resultados similares a los otros experimentos. En la comparación con la línea base el As es el metal que en mayores ocasiones sobrepasa al background, el Pb lo sobrepasa en 2 muestras y el Hg extraído es menor en las muestras de escoria que en las de la línea base. Respecto a la comparación con la

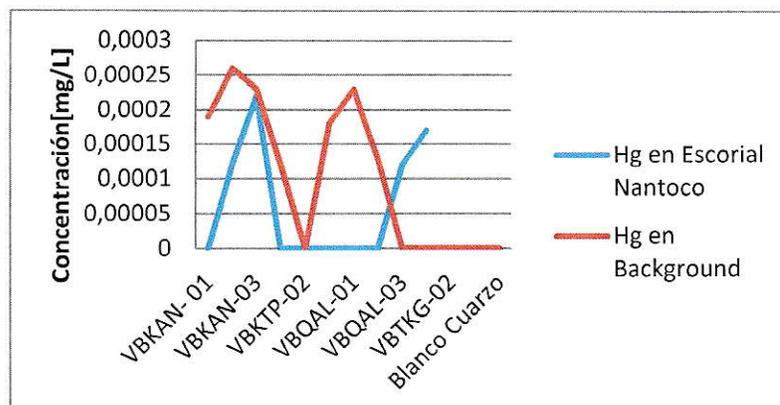
norma japonesa se puede decir que el As y el Pb la sobrepasan y por su parte el Hg se mantiene en valores menores.



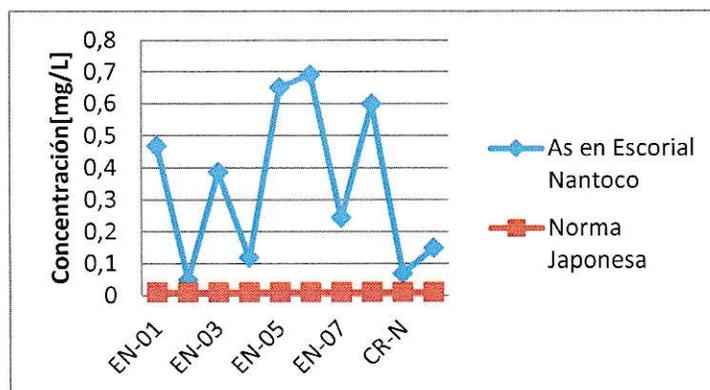
**Figura 47:** Comparación de arsénico extraído en Escorial Nantoco con la Línea base correspondiente a la fracción soluble en plantas



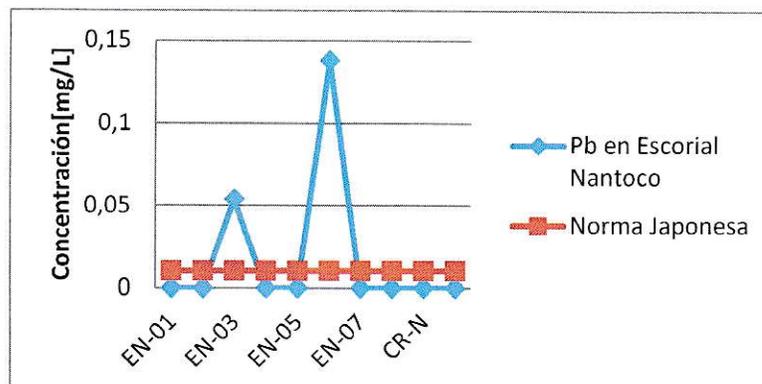
**Figura 48:** Comparación de plomo extraído en Escorial Nantoco con la Línea base correspondiente a la fracción soluble en plantas



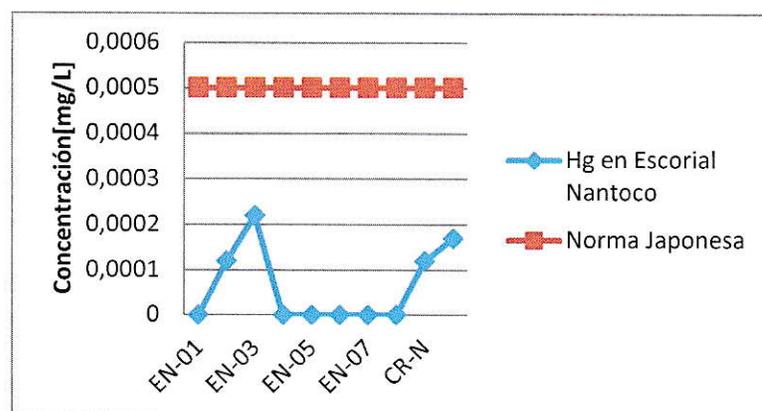
**Figura 49:** Comparación de mercurio extraído en Escorial Nantoco con la Línea base correspondiente a la fracción soluble en plantas



**Figura 50:** Comparación de arsénico en la fracción solubles en plantas con norma Japonesa



**Figura 51:** Comparación de plomo en la fracción solubles en plantas con norma Japonesa



**Figura 52:** Comparación de mercurio en la fracción solubles en plantas con norma Japonesa



### 3.4. Evaluación del riesgo a la salud de las personas

#### 3.4.1. Evaluación de la exposición

##### 3.4.1.1. Rutas y Receptores de exposición

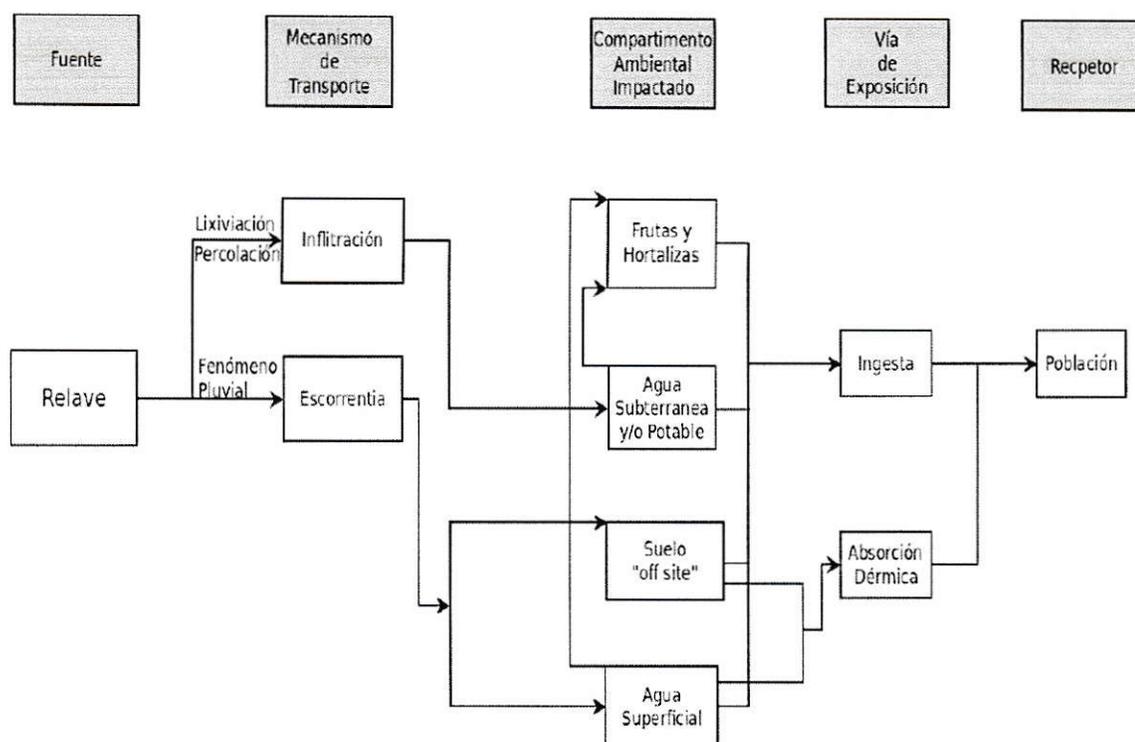
En referencia a los receptores de exposición, se sabe que el Escorial Nantoco está en contacto directo con la Villa Nantoco, un pequeño poblado de Tierra Amarilla, en el cual se encuentra la escuela Paul Harris que cuenta con 68 niños matriculados, en educación parvularia y básica. (MINEDUC,2015).

Se toma este punto como importante debido a que los niños que estudian en aquel establecimiento se reconocen como los receptores de exposición más propensos a sufrir los síntomas y enfermedades que aquejan a las personas que se encuentran en contacto con metales pesados.

El Escorial Nantoco, además colinda con un predio agrícola de frutas y hortalizas, que podrían incorporar los metales a través de sus raíces, por lo que se realizó la simulación de incorporación de los metales pesados, sin embargo, no se tomarán en consideración en este inciso del trabajo, al igual que la situación de lixiviación a napas subterráneas, ya que la caracterización del riego se realiza en situaciones que afecten directamente a las personas y no al medio ambiente.

#### **3.4.1.2. Modelo conceptual de exposición**

En base a los antecedentes anteriormente expuestos, y que no se visualiza la incorporación de nuevos medios de transporte, rutas de exposición, receptores, entre otros, que podrían incidir en cambios de los escenarios de exposición previstos, se mantiene el modelo conceptual realizado anteriormente por el equipo profesional de CENMA en la evaluación preliminar del sitio (Figura 53) De ella se desprende que las principales rutas o vías de exposición de los contaminantes hacia la población que se encuentra en el lugar son la ingesta y absorción dérmica de las partículas del escorial.



**Figura 53:** Modelo conceptual de rutas de exposición (CENMA, 2012)

### 3.4.1.3. Cálculo de Dosis de exposición

Para realizar el cálculo de la dosis de exposición a la que se encuentran sujetos los receptores de la villa Nantoco, se utilizarán 2 ecuaciones distintas, una que establece la exposición por concepto de ingesta de suelo, y otra por concepto de contacto dérmico. Éstas son promediadas sobre un período de exposición determinado y normalizada por el peso corporal del receptor. En la práctica, la ingesta media más utilizada es la diaria, que se expresa como masa de contaminante por unidad de peso del receptor y día.

### 1. Ingestión de suelo:

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

Donde:

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

$C_s$  = Concentración del contaminante en el suelo (mg/kg)

$TIs$  = Tasa de ingestión de suelo o polvo contaminado (mg/día)

$P$  = Peso corporal (kg)

$FE$  = Factor de exposición

### 2. Contacto dérmico con suelo:

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

Donde:

$I_{ds}$  = Dosis absorbida media diaria debido a contacto dérmico con polvo o suelo con presencia de contaminantes (mg/kg·día)

$C_s$  = Concentración del contaminante en el suelo (mg/kg)

$S_c$  = Superficie corporal expuesta (cm<sup>2</sup>/día)

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

$ABS$  = Factor de absorción dérmica (adimensional)

$P$  = Peso corporal (kg)

$FE$  = Factor de exposición

Datos necesarios:

**Tabla 6:** 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	200	100	100
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> .dia	0,001	0,001	0,001

Fuente:(Exposure Factors Handbook, 2011)

**Tabla 7:** Efectos cancerígenos

Contaminante	Efectos cancerígenos			Efectos crónicos	
	FPC <sub>oral</sub> , (mg/kg.d) <sup>-1</sup>	IUR <sub>nh</sub> , (ug/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	Clasificación evidencia cáncer	DRf <sub>oral</sub> , (mg/kg.d)	CRf <sub>inhal</sub> , (mg/m <sup>3</sup> )
Cobre				4,0·10 <sup>-2</sup>	
Zinc				3,0·10 <sup>-1</sup>	
Arsénico	1,50	4,3·10 <sup>-3</sup>	A	3,0·10 <sup>-4</sup>	1,5·10 <sup>-5</sup>
Plata				5,0·10 <sup>-3</sup>	
Cadmio		1,8. 10 <sup>-3</sup>	B1	1,0·10 <sup>-3</sup>	1,0·10 <sup>-5</sup>
Mercurio			D	3,0·10 <sup>-4</sup>	3,0·10 <sup>-4</sup>
Plomo (b)			B2		

Fuente: (USEPA RSL,2010)

Tabla 8: Absorción dermal

Elemento	PEF	Absorción dermal	Absorción gastrointestinal	ABS inhalatoria
Cobre	1,36E+09	0,001	1*	1
Zinc	1,36E+09	0,001	1*	1
Arsénico	1,36E+09	0,03*	0,59**	1
Plata	1,36E+09	0,001	0,04*	1
Cadmio	1,36E+09	0,001*	0,025*	1
Mercurio inorg.	1,36E+09	0,001	0,07*	1

ABS<sub>dermal</sub>: Fracción del contaminante absorbido por la piel desde un material en contacto con la piel (adimensional) Fuente: (USEPA, 2011)

### 3.4.2. Evaluación de la toxicidad

La relación dosis-respuesta es la correspondencia entre una cantidad de tóxico y la magnitud de su efecto. Para realizar la evaluación de toxicidad en el marco de la metodología *Superfund* de US EPA, se consideran:

- Los tipos de efectos adversos a la salud humana asociado a los elementos o sustancias de interés
- La relación entre la magnitud de la exposición y los efectos adversos
- La incertidumbre asociada a cada químico en particular

La información anteriormente descrita se deriva de datos experimentales obtenidos con mamíferos (ratas, ratones, conejos, perros o monos) para luego extrapolarlos a humanos. De aquí surgen los conceptos de dosis de referencia (DdR), la que indica un nivel no nocivo de concentración de elementos, y el Factor de Potencia Cancerígena (FPC). A este último grupo se incluye el peso de evidencia cancerígena (A, B, B1, B2, C, D, E).

En el caso de los metales del presente estudio se sabe por medio de la US EPA que el arsénico está catalogado en el grupo A, es decir, como cancerígeno humano conocido; el plomo está catalogado en el grupo 2B, es decir, probables carcinógenos humanos; y el mercurio por su parte en el grupo 3, es decir, en los no clasificados.

Para el cálculo del índice de peligro no cancerígeno (efectos no umbral), se debe dividir la dosis de exposición por el valor de la dosis de referencia, luego se suman los índices de peligro de un mismo contaminante por diferentes rutas de exposición y se obtiene el índice de peligro total, si ese valor es mayor que 1 se está en presencia de un sitio que podrá repercutir negativamente en la salud de las personas.

La US EPA ha hecho el trabajo de analizar la información toxicológica de buena calidad que existe y la ha acumulado en varias tablas electrónicas para consulta en línea o en publicaciones periódicas. Estas tablas constituyen las mejores fuentes de información sobre índices de toxicidad disponible, de las cuales se obtendrán los datos necesarios para realizar la caracterización del riesgo como se muestra a continuación.

(Guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes, 2012)

### **3.5. Caracterización del riesgo**

#### **3.5.1. Caracterización del riesgo por ingesta**

##### **3.5.1.1. Evaluación no cancerígena por Arsénico en niños**

- Mayor concentración encontrada en Escorial Nantoco: 23,03 [mg/kg]
- Tasa ingestión niños: 200 mg/día
- Peso corporal niño: 16 kg

El arsénico inorgánico tiene una DdR para la vía oral de 0,0003 mg/kg-día

$$\text{Factor de exposición} = \frac{(\text{Tiempo de exposición efectivo}) \times (\text{Duración de exposición})}{(\text{Periodo de exposición total}) \times (\text{Tiempo de exposición})}$$

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

$$FE = 0,90$$

Entonces al aplicar la ecuación por ingesta:

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

Sabiendo que el mayor valor de concentración de As encontrado en Escorial Nantoco es 23,03 [mg/kg], la tasa de ingestión en niños es 200 mg/día, el peso corporal es de 16 kg y el factor de exposición es 0,90 queda:

$$I = 10^{-6} \times \frac{23,03 \left[ \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right] \times 200 \left[ \frac{\text{mg}}{\text{día}} \right]}{16 \text{ kg}} \times 0,90$$

$$I = 2,59 \times 10^{-4} \left[ \frac{\text{mg}}{\text{kgxdía}} \right]$$

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

Luego:

$$\text{Índice de Peligro} = \frac{I}{DdR}$$

$$\text{Índice de peligro} = \frac{2,59 \times 10^{-4} \left[ \frac{\text{mg}}{\text{kgxdía}} \right]}{3,00 \times 10^{-4} \left[ \frac{\text{mg}}{\text{kgx día}} \right]}$$

$$\text{Índice de peligro} = 0,86$$

### 3.5.1.2. Evaluación cancerígena por Arsénico en adultos

- Mayor concentración encontrada en Escorial Nantoco: 23,03 [mg/kg]
- Tasa ingestión adultos 100 mg/ día
- Peso corporal adultos: 70kg

El arsénico inorgánico tiene una DdR para la vía oral de 0,0003 mg/kg-día

**Factor de Potencia Cancerígena (FPC)** para cáncer de piel por exposición por vía oral de  $1,5 \text{ (mg/kg-día)}^{-1}$

$$\text{Factor de exposición} = \frac{(\text{Tiempo de exposición efectivo}) \times (\text{Duración de exposición})}{(\text{Periodo de exposición total}) \times (\text{Tiempo de exposición})}$$

$$FE = \frac{(365 \frac{\text{días}}{\text{año}} \times 70 \text{ años})}{(70 \text{ años}) \times (365 \frac{\text{días}}{\text{año}})}$$

$$FE = 1,00$$

Entonces al aplicar la ecuación por ingesta:

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

Sabiendo que el mayor valor de concentración de As encontrado en Escorial Nantoco es 23,03 [mg/kg], la tasa de ingestión en adultos es 100 mg/día , el peso corporal es de 70 kg y el factor de exposición es 1,00 queda:

$$I = 10^{-6} \times \frac{23,03 \left[ \frac{mg}{kg} \right] \times 100 \left[ \frac{mg}{día} \right]}{70 \text{ kg}} \times 1,00$$

$$I = 3,29 \times 10^{-5} \left[ \frac{mg}{kg \times día} \right]$$

Luego:

$$\text{Riesgo individual} = I \times FPC$$

$$\text{Riesgo individual} = 3,29 \times 10^{-5} \left[ \frac{mg}{kg \times día} \right] \times 1,5 \left[ \frac{kg \times día}{mg} \right]$$

$$\text{Riesgo individual} = 4,94 \times 10^{-5}$$

Lo que indica una probabilidad de Cáncer de 4,94 individuos en una población de 100.000 personas.

Por otra parte:

$$\text{Riesgo poblacional} = \text{Riesgo individual} \times \text{población total}$$

Si el Riesgo individual lo multiplicamos por 100 habitantes de la villa Nantoco, se obtiene la incidencia de Cáncer

$$\text{Incidencia de Cáncer} = 4,94 \times 10^{-5} \times 100$$

$$\text{Incidencia de Cáncer} = 4,94 \times 10^{-3}$$

### 3.5.1.3. Evaluación no cancerígena por Mercurio en niños

- Mayor concentración encontrada en Escorial Nantoco: 0,00632 [mg/kg]
- Tasa ingestión niños: 200 mg/día
- Peso corporal: niño = 16 kg

El mercurio inorgánico tiene una DdR para la vía oral de 0,0003 mg/kg-día

$$\text{Factor de exposición} = \frac{(\text{Tiempo de exposición efectivo}) \times (\text{Duración de exposición})}{(\text{Periodo de exposición total}) \times (\text{Tiempo de exposición})}$$

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

$$FE = 0,90$$

Entonces al aplicar la ecuación por ingesta:

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

Sabiendo que el mayor valor de concentración de Hg encontrado en Escorial Nantoco es 0,00632 [mg/kg], la tasa de ingestión en niños es 200 mg/día , el peso corporal es de 16 kg y el factor de exposición es 0,90 queda:

$$I = 10^{-6} \times \frac{0,00632 \left[ \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right] \times 200 \left[ \frac{\text{mg}}{\text{día}} \right]}{16 \text{ kg}} \times 0,90$$

$$I = 7,11 \times 10^{-8} \left[ \frac{\text{mg}}{\text{kg} \times \text{día}} \right]$$

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

Luego:

$$\text{Índice de Peligro} = \frac{I}{DdR}$$

$$\text{Índice de peligro} = \frac{7,11 \times 10^{-8} \left[ \frac{\text{mg}}{\text{kg} \times \text{día}} \right]}{3,00 \times 10^{-4} \left[ \frac{\text{mg}}{\text{kg} \times \text{día}} \right]}$$

$$\text{Índice de peligro} = 2,37 \times 10^{-4}$$

### 3.5.2. Caracterización del riesgo por contacto dérmico

#### 3.5.2.1. Evaluación no cancerígena por Arsénico en niños

- Mayor concentración encontrada en Escorial Nantoco: 0,44 [mg/kg]
- Superficie corporal: 7440 cm<sup>2</sup> piel total
- Adherencia dérmica: 0,001 mg/cm<sup>2</sup>xdía
- Absorción dermal: 0,03
- Peso corporal: 16 kg

El arsénico inorgánico tiene una DdR para la vía oral de 0,0003 mg/kg-día

$$\text{Factor de exposición} = \frac{(\text{Tiempo de exposición efectivo}) \times (\text{Duración de exposición})}{(\text{Periodo de exposición total}) \times (\text{Tiempo de exposición})}$$

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

$$FE = 0,90$$

Entonces al aplicar la ecuación por contacto dérmico:

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

Sabiendo que el mayor valor de concentración de As encontrado en Escorial Nantoco es 0,44 [mg/kg], la superficie corporal en niños es de 7440 cm<sup>2</sup> de piel total, el factor de adherencia dérmica es 0,001 mg/cm<sup>2</sup> x día, la absorción dermal es 0,03 en el caso del As, el peso corporal es de 16 kg y el factor de exposición es 0,90 se tiene:

$$I_{ds} = 10^{-6} \times \frac{(0,44 \frac{mg}{Kg} \times 7440 \text{ cm}^2 \times 0,001 \frac{mg}{\text{día} \times \text{cm}^2} \times 0,03)}{16 \text{ Kg}} \times 0,90$$

$$I = 5,52 \times 10^{-9} [\frac{mg}{kg \times día}]$$

El factor 10<sup>-6</sup> es para convertir los [mg/kg] en [mg/mg] y así ordenar las unidades

Para obtener la dosis de referencia dermal, y con ella calcular el índice de peligro se debe multiplicar la dosis de referencia oral por la absorción dérmica

$$\text{Dosis de referencia dermal} = (3 \times 10^{-4}) \times 0,03$$

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

$$\text{Índice de Peligro} = \frac{I}{DdR}$$

$$\text{Índice de peligro} = \frac{5,52 \times 10^{-9} [\frac{mg}{kg \times día}]}{9,00 \times 10^{-6} [\frac{mg}{kg \times día}]}$$

$$\text{Índice de peligro} = 6,13 \times 10^{-4}$$

Si se suma este valor con el valor obtenido anteriormente por ingesta el cual resultado ser 0,86 se tiene el índice de peligro total por arsénico.

$$\text{Índice de peligro total As} = 6,13 \times 10^{-4} + 0,86$$

$$\text{Índice de peligro total As} = 0,86$$

### 3.5.2.2. Evaluación cancerígena por Arsénico en adultos

- Mayor concentración encontrada en Escorial Nantoco: 0,44 [mg/kg]
- Superficie corporal: 19400 cm<sup>2</sup> piel total
- Adherencia dérmica: 0,001 mg/cm<sup>2</sup>xdía
- Absorción dermal: 0,03
- Peso corporal: 70 kg
- El arsénico inorgánico tiene una DdR para la vía oral de 0,0003 mg/kg-día
- Factor de Potencia Cancerígena (FPC) para cáncer de piel por exposición por vía oral de 1,5 (mg/kg-día)<sup>-1</sup>

$$\text{Factor de exposición} = \frac{(\text{Tiempo de exposición efectivo}) \times (\text{Duración de exposición})}{(\text{Periodo de exposición total}) \times (\text{Tiempo de exposición})}$$

$$FE = \frac{(365 \frac{\text{días}}{\text{año}} \times (30 \text{ años}))}{(30 \text{ años}) \times (365 \frac{\text{días}}{\text{año}})}$$

$$FE = 1,00$$

Entonces al aplicar la ecuación por contacto dérmico:

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

Sabiendo que el mayor valor de concentración de As encontrado en Escorial Nantoco es 0,44 [mg/kg], la superficie corporal en adultos es de 19400 cm<sup>2</sup> de piel total, el factor de adherencia dérmica es 0,001 mg/cm<sup>2</sup> x día, la absorción dermal es 0,03 en el caso del As, el peso corporal es de 16 kg y el factor de exposición es 1,00 se tiene:

$$I_{ds} = 10^{-6} \times \frac{(0,44 \frac{mg}{Kg} \times 19400 \text{ cm}^2 \times 0,001 \frac{mg}{\text{día} \times \text{cm}^2} \times 0,03)}{70 \text{ Kg}} \times 1,00$$

$$I = 3,66 \times 10^{-9} \left[ \frac{mg}{kg \times día} \right]$$

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

$$\text{Dosis de referencia dermal} = (3 \times 10^{-4}) \times 0,03$$

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

$$\text{Índice de Peligro} = \frac{I}{DdR}$$

$$\text{Índice de peligro} = \frac{3,66 \times 10^{-9} \left[ \frac{mg}{kg \times día} \right]}{9,00 \times 10^{-6} \left[ \frac{mg}{kg \times día} \right]}$$

$$\text{Índice de peligro} = 4,07 \times 10^{-4}$$

Para obtener el riesgo individual se multiplica el índice de peligro por el factor de potencia cancerígena y como es en el caso de absorción por la piel, con la absorción dérmica

$$\text{Riesgo individual} = I \times FPC \times 0,03$$

$$\text{Riesgo individual} = 4,07 \times 10^{-4} \left[ \frac{mg}{kg \times día} \right] \times 1,5 \left[ \frac{kg \times día}{mg} \right] \times 0,03$$

$$\text{Riesgo individual} = 1,83 \times 10^{-5}$$

Lo que indica una probabilidad de Cáncer de 1,83 individuos en una población de 100.000 personas.

$$\text{Riesgo poblacional} = \text{Riesgo individual} \times \text{población total}$$

Si el Riesgo individual lo multiplicamos por 100 habitantes de la villa Nantoco, se obtiene la incidencia de Cáncer

$$\text{Incidencia de Cáncer} = 1,83 \times 10^{-5} \times 100$$

$$\text{Incidencia de Cáncer} = 1,83 \times 10^{-3}$$

### 3.5.2.3. Evaluación no cancerígena por Mercurio en niños

Mayor concentración encontrada en Escorial Nantoco: 0,00846 [mg/kg]

Superficie corporal: 7440 cm<sup>2</sup> piel total

Adherencia dérmica: 0,001 mg/cm<sup>2</sup>xdía

Absorción dermal: 0,001

Peso corporal: 16 kg

El mercurio inorgánico tiene una DdR para la vía oral de 0,0003 mg/kg-día

$$\text{Factor de exposición} = \frac{(\text{Tiempo de exposición efectivo}) \times (\text{Duración de exposición})}{(\text{Periodo de exposición total}) \times (\text{Tiempo de exposición})}$$

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

$$FE = 0,90$$

Entonces al aplicar la ecuación por contacto dérmico:

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

Sabiendo que el mayor valor de concentración de Hg encontrado en Escorial Nantoco es 0,00846 [mg/kg], la superficie corporal en niños es de 7440 cm<sup>2</sup> de piel total, el factor de adherencia dérmica es 0,001 mg/cm<sup>2</sup>xdía, la absorción dermal es 0,001 en el caso del Hg, el peso corporal es de 16 kg y el factor de exposición es 0,90 se tiene:

$$I_{ds} = 10^{-6} \times \frac{(0,00846 \frac{mg}{Kg} \times 7440 \text{ cm}^2 \times 0,001 \frac{mg}{dia \times \text{cm}^2} \times 0,001)}{16 \text{ Kg}} \times 0,90$$

$$I = 3,54 \times 10^{-12} [\frac{mg}{kg \times dia}]$$

El factor 10<sup>-6</sup> es para convertir los [mg/kg] en [mg/mg] y así ordenar las unidades

$$\text{Dosis de referencia dermal} = (3 \times 10^{-4}) \times 0,001$$

$$DdR = 3,00 \times 10^{-7}$$

$$\text{Índice de Peligro} = \frac{I}{DdR}$$

$$\text{Índice de peligro} = \frac{3,54 \times 10^{-12} [\frac{mg}{kg \times dia}]}{3,00 \times 10^{-7} [\frac{mg}{kg \times dia}]}$$

$$\text{Índice de peligro} = 1,18 \times 10^{-5}$$

Si se suma este valor con el valor obtenido anteriormente por ingesta el cual resultado ser 2,37 x 10<sup>-4</sup> se tiene el índice de peligro total por mercurio.

$$\text{Índice de peligro total Hg} = 1,18 \times 10^{-5} + 2,37 \times 10^{-4}$$

$$\text{Índice de peligro total Hg} = 2,49 \times 10^{-4}$$

### 3.5.3. Caracterización del riesgo de Pb en la sangre

Para el caso de la caracterización del riesgo del plomo se utiliza el modelo computacional IEUBKwin, en el cual se ingresó el promedio de la concentración de plomo total encontrada en el suelo del Escorial Nantoco 15,62 mg/kg, la cual es equivalente al límite superior del intervalo de confianza de la media (95%).

El modelo supone una concentración promedio constante de plomo en el aire ambiental. Este Pb en el aire se estimó a partir de la concentración observada en el suelo superficial del escorial y resuspendidos en el aire por acción del viento estimada de la siguiente forma:

$$\text{Concentración Pb en el aire} = C_{Pb} \times (1/PEF)$$

$$\text{Concentración Pb en el aire} = 15,62 \text{ mg/kg} \times (1/1,36 \times 10^9)$$

$$\text{Concentración Pb en el aire} = 1,15 \times 10^{-8} \text{ mg/m}^3$$

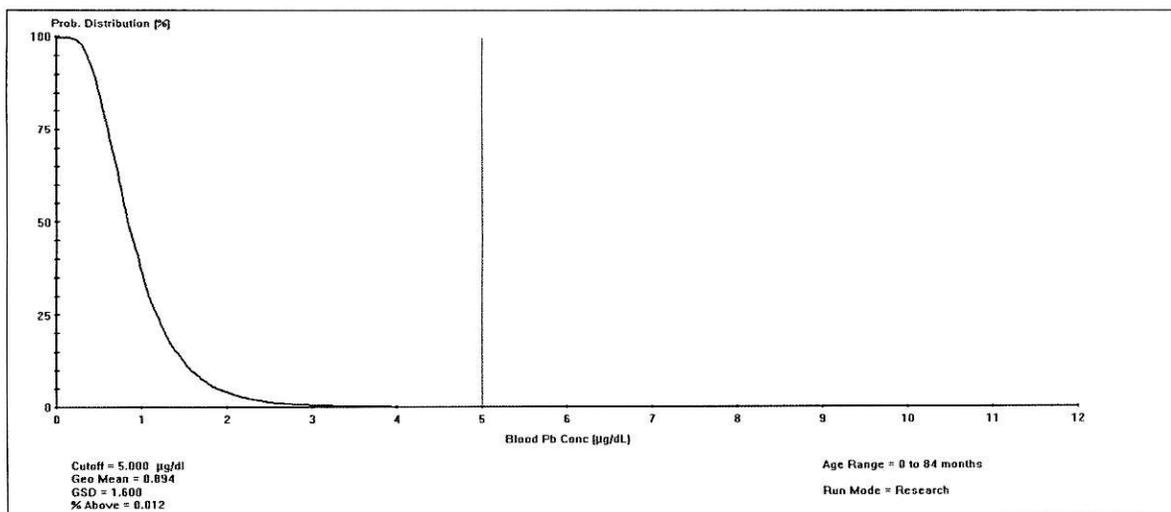
$$\text{Concentración Pb en el aire} = 1,15 \times 10^{-5} \text{ } \mu\text{g/m}^3$$

Donde:

$C_{Pb}$ : Concentración de Pb 95% UCL

PEF: Factor de emisión de partículas (USEPA)

Para los parámetros restantes se utilizaron aquellos incluidos por defecto en el modelo.



**Figura 54:** Curva de distribución del riesgo asociado al plomo en Escorial Nantoco

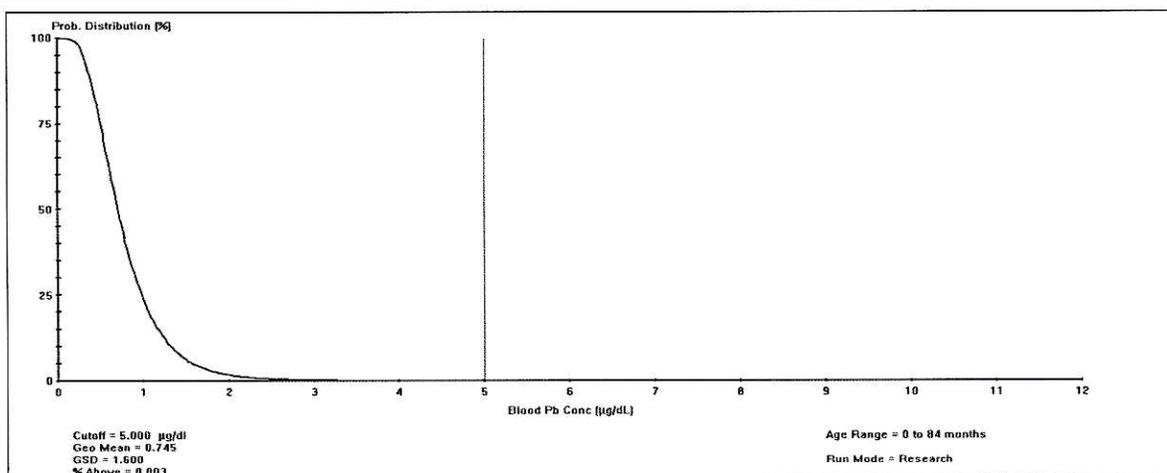
De lo que se desprende que 0,012 % de los niños exceden el nivel de referencia de 5 µg/dL en Escorial Nantoco. Además se adjunta una curva con el promedio del plomo total en la línea base, el cual fue de 0,45 mg/kg

$$\text{Concentración Pb en el aire} = C_{Pb} \times (1/PEF)$$

$$\text{Concentración Pb en el aire} = 0,45 \text{ mg/kg} \times (1/1,36 \cdot 10^9)$$

$$\text{Concentración Pb en el aire} = 3,31 \cdot 10^{-10} \text{ mg/m}^3$$

$$\text{Concentración Pb en el aire} = 3,31 \cdot 10^{-7} \text{ µg/m}^3$$



**Figura 55:** Curva de distribución del riesgo asociado al plomo en la Línea base

De lo que se desprende que 0,003 % de los niños exceden el nivel de referencia de 5 µg/dL en la línea base.

### 3.6 Análisis de la incertidumbre

En todo el proceso de la evaluación de riesgos, se tiene inherente una considerable incertidumbre. A continuación se hará mención de las que son más comunes, y es necesario tenerlas en cuenta para poder realizar una correcta interpretación de los resultados, y de esa manera, tomar las decisiones correctas.

- **Fuentes de incertidumbre genéricas:** Éstas corresponden a la incertidumbre que está asociada a la información de la toxicidad de los contaminantes y los efectos en la salud que provocan, información que tiene un error asociado y que en efecto puede ir cambiando en el tiempo conforme se efectúan nuevos estudios de toxicidad. A continuación se lista los casos en que se encuentra asociada esta incertidumbre.
  - De la extrapolación de dosis altas a dosis bajas cuando se conducen estudios de ensayos para cáncer y es necesario estimar dosis a muy bajos niveles de riesgo.
  - De la extrapolación de datos obtenidos para animales experimentales a humanos
  - Debida a diferencias entre individuos (susceptibilidad) asociados intrínsecamente con los criterios de toxicidad.
  
- **Fuentes de incertidumbre en el cálculo de la concentración:** Se produce debido a suposiciones usadas en el modelo matemático o consideraciones estadísticas.
  
- **Fuentes de incertidumbre en el cálculo de la dosis de exposición:** Esto debido a que las dosis estimadas son promedios a lo largo del tiempo. Pueden provenir:

- De las variables de origen
- De la estimación de dosis de exposición usando modelos matemáticos
- Al suponer que los factores de exposición humanos son valores puntuales en vez de funciones distribucionales.

(Guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes, 2012)

#### IV. DISCUSIÓN

A pesar que en el estudio confirmatorio de contaminación en Escorial Nantoco del año 2012 se informaron resultados alarmantes en cuanto a la concentración de metales pesados presentes en las muestras analizadas, al realizar la caracterización del riesgo según la metodología aprobada, los valores obtenidos de índice de peligro total no superan el valor 1, por lo que la población que se encuentra en contacto con el escorial, es decir, los habitantes de la Villa Nantoco no debiesen presentar las diversas complicaciones de salud que sufren las personas que son víctimas de contaminación por arsénico, plomo o mercurio.

Esta situación puede tener su explicación en que aunque el arsénico está ampliamente distribuido en la corteza terrestre en un gran número de minerales, como por ejemplo, arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), rejalgar ( $\text{As}_4\text{S}_4$ ) y oropimente ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ); el plomo principalmente como galena ( $\text{PbS}$ ), la cerusita ( $\text{PbCO}_3$ ), y la crocoísa ( $\text{PbCrO}_4$ ); y el mercurio principalmente como cinabrio ( $\text{HgS}$ ), y montroidita ( $\text{HgO}$ ), las escorias que provienen de procesos de fundición de minería como es en este caso de estudio, son materiales vítreos, estables y poco lixiviables (los resultados de lixiviación fueron menores que los límites de detección de los equipos de análisis).

Por lo que se puede decir que si bien el escorial posee en sí mismo altas concentraciones de los metales analizados, la extracción que se produjo de éstos al simular las situaciones de exposición relevantes fue mínima. Siguiendo con este mismo punto se puede señalar que una de las formas más efectivas de remediar suelos contaminados con metales pesados como el arsénico, el plomo y el mercurio es justamente mediante una tecnología de remediación a la cual se le denomina

vitrificación in situ, la cual a grandes rasgos consiste en introducir electrodos que funden el suelo a más de 1200 °C inmovilizando los metales cuando se enfría.

Es debido a los resultados obtenidos en el índice de peligro (menores que 1) y a los argumentos recientemente planteados que se desestima la elaboración de un plan de gestión.

Sin embargo, si se observan los resultados comparativos de las extracciones principalmente de arsénico (la mayoría de los puntos), y plomo (un punto en todos los resultados) con los valores obtenidos de la línea base, es fácil visualizar que los valores en Escorial Nantoco son superiores en cada uno de los escenarios de exposición relevantes. Ahora si a todo esto se le suma que dichos valores también superan ampliamente la normativa de referencia que se eligió, es decir, la de estándares de calidad medioambiental de contaminación de suelos en Japón, y que todo el proceso de determinación de índice de peligro posee diversas incertidumbres de toda índole, y además teniendo presente que existe una escuela que recibe a 68 niños menores de 14 años a metros del escorial, surge la inquietud de realizar las siguientes propuestas:

- Se propone complementar el presente estudio adicionando el escenario de exposición relevante que simula la inhalación de partículas.
- Se propone realizar la evaluación de los efectos a la salud humana a través de un monitoreo biológico, el que debiese ser efectuado por el Ministerio de Salud de Chile.

- Se propone realizar un cierre perimetral inmediato de la zona que impida la migración de partículas del escorial a la Villa Nantoco, como medida precautoria a corto plazo.
- Se propone trasladar el Escorial Nantoco a algún relleno sanitario de seguridad, como por ejemplo CONFINOR, el que queda en la misma región de Atacama, como medida precautoria a mediano o largo plazo.

Por último es importante señalar, que si bien Chile es un país en vías de desarrollo que está siendo sujeto a evaluación por organismos internacionales de los cuales es parte, y que la ley 20.417 supone varias mejoras en cuanto a legalidad y competencia en varios ámbitos, es inaceptable que un país que posee más de la mitad de las exportaciones al extranjero basado en la industria de la minería, no tenga normativa que regule la contaminación de suelos.

Situación que demuestra que falta mucho camino por recorrer, en cuanto a legalidad ambiental y al derecho de vivir en un medioambiente libre de contaminación como lo señala la constitución chilena.



## V. CONCLUSIONES

Al analizar los resultados obtenidos en el presente trabajo se puede concluir que:

1. Se rechaza la hipótesis inicial de trabajo, la cual suponía que las partículas de Escorial Nantoco que entran en contacto con la piel de los pobladores de la Villa Nantoco, así también como las que son ingeridas por los mismos, presentan una amenaza a la salud de aquellas personas debido a los contenidos de arsénico, plomo y mercurio que poseen.
2. Se cumple con el objetivo general del trabajo el cual consiste en contribuir a la evaluación del riesgo que representa el Escorial Nantoco en la salud del asentamiento urbano Villa Nantoco en la comuna de Tierra amarilla.
3. Se determinaron las condiciones experimentales de las simulaciones de escenarios de exposición relevantes, las que se realizaron por triplicado en las muestras de escoria, sin mayores inconvenientes.
4. Se determinaron las concentraciones de los metales pesados objetos del presente estudio, en los 4 escenarios de exposición relevantes. Consiguiendo las mismas en mg/Kg para la introducción en las ecuaciones de cálculo de dosis de exposición, y en mg/L para la comparación con la normativa japonesa de calidad de suelos.
5. Se realizó la comparación de las extracciones con los resultados obtenidos de las muestras recolectadas en sitios libres de actividad minera, de lo que se desprende que los valores de Arsénico son superiores en variados puntos respecto de la línea base, los de Plomo en un punto en específico, y los de Mercurio en su mayoría son menores que la línea base.
6. Se compararon los resultados de lixiviación con los valores máximos permitidos en el Decreto Supremo 148, de lo que se ratifica que la lixiviación del escorial es mínima.

7. Se desestima la necesidad de un plan de gestión en el lugar, considerando que de la simulación realizada en el modelo computacional IEUBKwin un 0,012 % de los niños exceden el nivel de referencia de 5 µg/dL de plomo en la sangre debido a las partículas de Escorial Nantoco.
  
8. Por último se desestima la necesidad de un plan de gestión ambiental en el lugar, considerando los resultados del índice de peligro total calculado, el cual fue de 0,86 en el caso del Arsénico y  $2,49 \times 10^{-4}$  en el caso del Mercurio.

## VI. REFERENCIAS

- Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades, 2015. Evaluación toxicológica y vías de exposición. [En Línea] [http://www.atsdr.cdc.gov/es/training/pha\\_professional2/module3/sv7.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/training/pha_professional2/module3/sv7.html)
- Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental, 2015. Estimación dosis de exposición [En Línea] <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/eco/030079/030079-10d.pdf>
- Centro Nacional del Medio Ambiente, 2012. Investigación preliminar y confirmatoria de suelos con potencial presencia de contaminantes (SPPC).Comunas de Copiapó y Tierra Amarilla. [En Línea] <http://www.24horas.cl/incoming/article1673163.ece/BINARY/Informe%20Cenma%20U%20Chile%202012%20-20SPPC%20Copiap%C3%B3%20y%20TA>
- Confinor, 2015 [En Línea] <http://www.confinorsa.cl/nuestra-empresa.html>
- Environmental Protection Agency, 1994. Method 7470A Mercury in liquid waste (Manual cold-vapor technique). <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/7470a.pdf>
- Fundación Chile, 2012. Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes. [http://www.academia.edu/7694773/Guia\\_metodologica\\_para\\_la\\_gesti%C3%B3n\\_de\\_sitios\\_contaminados\\_-\\_CHILE](http://www.academia.edu/7694773/Guia_metodologica_para_la_gesti%C3%B3n_de_sitios_contaminados_-_CHILE)
- Instituto Nacional de Ecología Mexicano, 2015. La evaluación de riesgos para la salud humana <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/400/cap3.html>
- Instituto Nacional de Ecología Mexicano, 2015. La evaluación del riesgo por sustancias tóxicas <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetas/422/evaluacion.html>
- Medvinsky, et al, 2015. Informe sobre la situación de los Relaves Mineros en Chile para ser presentado en el cuarto informe periódico de Chile para el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, perteneciente al consejo

Económico Social de la Naciones Unidas. Fundación Relaves Chile y Fundación Terram. [http://tbinternet.ohchr.org/Treaties/CESCR/Shared%20Documents/CHL/INT\\_CESCR\\_CSS\\_CHL\\_20605\\_S.pdf](http://tbinternet.ohchr.org/Treaties/CESCR/Shared%20Documents/CHL/INT_CESCR_CSS_CHL_20605_S.pdf)

- Ministerio de Educación de Chile, 2015. Ficha establecimiento Escuela Paul Harris [En Línea] <http://www.mime.mineduc.cl/mvc/mime/ficha?rbd=445>
- Ministry of the environment, Government of Japan, 2015. Environmental quality standards for soil pollution [En Línea] <https://www.env.go.jp/en/water/soil/sp.html>
- Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) y Comisión Económica Para América Latina y el Caribe (CEPAL). *Evaluaciones del desempeño ambiental, Chile*. Naciones Unidas, 2005. p.26-34
- Sistema de información ambiental regional Arequipa, 2015. Perfil toxicológico de Arsénico (As), Número CAS 7440-38-2 <http://181.65.172.167/siararequipa/admDocumento.php> accion=bajar&docadjunto=164.
- Sistema de información ambiental regional Arequipa, 2015. Perfil toxicológico de Plomo (Pb), Número CAS 7439-92-1 <http://181.65.172.167/siararequipa/admDocumento.php>.
- Sistema de información ambiental regional Arequipa, 2015. Perfil toxicológico de Mercurio (Hg), Número CAS 7439-97-6 <http://181.65.172.167/siararequipa/admDocumento.php?>
- Universidad de Alicante, 2015. Espectroscopía de de emisión por plasma de acoplamiento inductivo. <http://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-analisis/espectroscopia-de-emision-por-plasma-de-acoplamiento-inductivo.html>



## VII. ANEXOS

### 7.1 Tablas de concentraciones obtenidas:

**Tabla 9:** Concentraciones totales y concentraciones obtenidas de las extracciones en bioaccesibles realizadas en todas las muestras respecto de arsénico, plomo y mercurio.

Muestra	Tipo de muestra	As total [mg/Kg]	As en bioaccesibles [mg/Kg]	Pb total [mg/Kg]	Pb en bioaccesibles [mg/Kg]	Hg total [mg/Kg]	Hg en bioaccesibles [mg/Kg]
EN-01	Escoria	232,18	6,22	682,72	0,90	185,80	0,00632
EN-02	Escoria	71,08	1,04	48,24	0,65	170,60	0,00478
EN-03	Escoria	1669,66	23,03	1105,75	5,39	<LD	0,00460
EN-04	Escoria	218,84	1,51	773,94	1,77	139,25	0,00204
EN-05	Escoria	662,76	5,94	4441,46	1,93	153,20	0,00135
EN-06	Escoria	373,33	7,86	2856,91	137,99	<LD	0,00199
EN-07	Escoria	2357,71	4,49	2102,08	2,48	<LD	0,00172
EN-08	Escoria	1054,16	7,14	696,51	2,01	261,43	0,00079
CR-N	Sedimento	28,16	0,57	31,31	1,33	<LD	0,00469
SN-01	Suelo	42,36	0,92	49,22	1,73	<LD	0,00455
VBKAN-01	Suelo	17,97	0,83	34,36	1,35	0,26	0,00364
VBKAN-02	Suelo	<LD	0,22	8,81	0,14	0,05	0,01863
VBKAN-03	Suelo	<LD	0,36	15,38	0,61	0,14	0,02372
VBKTP-01	Suelo	<LD	0,27	11,30	0,21	0,05	0,03758
VBKTP-02	Suelo	<LD	0,49	12,04	0,45	0,11	0,03010
VBKTP-03	Suelo	<LD	0,63	7,73	0,22	0,10	0,02248
VBQAL-01	Suelo	<LD	0,50	9,38	0,56	0,74	0,01138
VBQAL-02	Suelo	3,04	0,63	14,45	0,64	0,69	0,00313
VBQAL-03	Suelo	<LD	0,55	10,88	0,57	0,60	0,01170
VBTKG-01	Suelo	35,93	1,45	6,66	0,15	0,02	0,00778
VBTKG-02	Suelo	<LD	0,72	11,84	0,39	0,08	0,02270
VBTKG-03	Suelo	<LD	0,32	8,48	0,12	0,01	0,02083

**Tabla 10:** Concentraciones totales y concentraciones obtenidas de las extracciones en solubles en humanos realizadas en todas las muestras respecto de arsénico, plomo y mercurio.

Muestra	Tipo de muestra	As total [mg/Kg]	As soluble para humanos [mg/Kg]	Pb total [mg/Kg]	Pb soluble para humanos [mg/Kg]	Hg total [mg/Kg]	Hg soluble para humanos [mg/Kg]
EN-01	Escoria	232,18	0,18	682,72	<LD	185,80	0,00161
EN-02	Escoria	71,08	0,01	48,24	<LD	170,60	0,00432
EN-03	Escoria	1669,66	0,28	1105,75	0,07	<LD	0,00303
EN-04	Escoria	218,84	0,02	773,94	<LD	139,25	0,00155
EN-05	Escoria	662,76	0,44	4441,46	<LD	153,20	0,00082
EN-06	Escoria	373,33	0,16	2856,91	2,00	<LD	0,00130
EN-07	Escoria	2357,71	0,12	2102,08	<LD	<LD	0,00095
EN-08	Escoria	1054,16	0,22	696,51	<LD	261,43	0,00098
CR-N	Sedimento	28,16	0,06	31,31	0,02	<LD	0,00173
SN-01	Suelo	42,36	0,21	49,22	0,02	<LD	0,00846
VBKAN-01	Suelo	17,97	0,10	34,36	0,03	0,26	0,00091
VBKAN-02	Suelo	<LD	0,02	8,81	<LD	0,05	0,00249
VBKAN-03	Suelo	<LD	0,06	15,38	0,02	0,14	0,01770
VBKTP-01	Suelo	<LD	0,03	11,30	0,02	0,05	0,00271
VBKTP-02	Suelo	<LD	0,09	12,04	0,02	0,11	0,00192
VBKTP-03	Suelo	<LD	0,10	7,73	0,01	0,10	0,00305
VBQAL-01	Suelo	<LD	0,03	9,38	<LD	0,74	0,01421
VBQAL-02	Suelo	3,04	0,12	14,45	<LD	0,69	0,00382
VBQAL-03	Suelo	<LD	0,02	10,88	<LD	0,60	0,00240
VBTKG-01	Suelo	35,93	0,07	6,66	0,01	0,02	0,00173
VBTKG-02	Suelo	<LD	0,11	11,84	<LD	0,08	0,00176
VBTKG-03	Suelo	<LD	0,10	8,48	<LD	0,01	0,00228

**Tabla 11:** Concentraciones totales y concentraciones obtenidas de las extracciones en solubles en plantas realizadas en todas las muestras respecto de arsénico, plomo y mercurio.

Muestra	Tipo de muestra	As total [mg/Kg]	As en solubles para plantas [mg/Kg]	Pb total [mg/Kg]	Pb en solubles para plantas [mg/Kg]	Hg total [mg/Kg]	Hg en solubles para plantas [mg/Kg]
EN-01	Escoria	232,18	1,14	682,72	<LD	185,80	0,00157
EN-02	Escoria	71,08	0,12	48,24	<LD	170,60	0,00243
EN-03	Escoria	1669,66	0,93	1105,75	0,13	<LD	0,00431
EN-04	Escoria	218,84	0,29	773,94	<LD	139,25	0,00147
EN-05	Escoria	662,76	1,60	4441,46	<LD	153,20	0,00124
EN-06	Escoria	373,33	1,68	2856,91	0,33	<LD	0,00199
EN-07	Escoria	2357,71	0,59	2102,08	<LD	<LD	0,00153
EN-08	Escoria	1054,16	1,47	696,51	<LD	261,43	0,00128
CR-N	Sedimento	28,16	0,17	31,31	<LD	<LD	0,00237
SN-01	Suelo	42,36	0,37	49,22	<LD	<LD	0,00362
VBKAN-01	Suelo	17,97	0,37	34,36	<LD	0,26	0,00019
VBKAN-02	Suelo	<LD	0,07	8,81	<LD	0,05	0,00026
VBKAN-03	Suelo	<LD	0,13	15,38	<LD	0,14	0,00023
VBKTP-01	Suelo	<LD	0,06	11,30	<LD	0,05	0,00012
VBKTP-02	Suelo	<LD	0,15	12,04	<LD	0,11	0,00009
VBKTP-03	Suelo	<LD	0,19	7,73	<LD	0,10	0,00018
VBQAL-01	Suelo	<LD	0,19	9,38	<LD	0,74	0,00023
VBQAL-02	Suelo	3,04	0,29	14,45	<LD	0,69	0,00013
VBQAL-03	Suelo	<LD	0,22	10,88	<LD	0,60	0,00010
VBTKG-01	Suelo	35,93	0,61	6,66	<LD	0,02	0,00010
VBTKG-02	Suelo	<LD	0,27	11,84	<LD	0,08	0,00011
VBTKG-03	Suelo	<LD	0,12	8,48	<LD	0,01	0,00006

**Tabla 12:** Concentraciones de arsénico, plomo y mercurio en fracción de lixiviables:

Muestra	Tipo de muestra	As (mg/L)	Pb (mg/L)	Hg (mg/L)
EN-01	Escoria	<0,165	<0,054	<0,00017
EN-02	Escoria	<0,165	<0,054	<0,00017
EN-03	Escoria	<0,165	<0,054	<0,00017
EN-04	Escoria	<0,165	<0,054	<0,00017
EN-05	Escoria	<0,165	<0,054	0,0004
EN-06	Escoria	0,4462	<0,054	<0,00017
EN-07	Escoria	<0,165	<0,054	<0,00017
EN-08	Escoria	<0,165	<0,054	<0,00017
CR-N	Sedimento	<0,165	<0,054	<0,00017
SN-01	Suelo	<0,165	<0,054	<0,00017
VBKAN- 01	Suelo	<0,165	<0,054	<0,00017
VBKAN-02	Suelo	<0,165	<0,054	0,0002
VBKAN-03	Suelo	<0,165	<0,054	<0,00017
VBKTP-01	Suelo	<0,165	<0,054	<0,00017
VBKTP-02	Suelo	<0,165	<0,054	<0,00017
VBKTP-03	Suelo	<0,165	<0,054	<0,00017
VBQAL-01	Suelo	<0,165	<0,054	<0,00017
VBQAL-02	Suelo	<0,165	<0,054	0,0002
VBQAL-03	Suelo	<0,165	<0,054	<0,00017
VBTKG-01	Suelo	<0,165	<0,054	<0,00017
VBTKG-02	Suelo	<0,165	<0,054	<0,00017
VBTKG-03	Suelo	<0,165	<0,054	<0,00017

**Tabla 13:** Concentración de arsénico, plomo y mercurio en fracción de bioaccesibles:

Muestra	Tipo de muestra	As (mg/L)	Pb (mg/L)	Hg (mg/L)
EN-01	Escoria	2,572	0,372	0,00033
EN-02	Escoria	0,419	0,263	0,00024
EN-03	Escoria	9,309	2,180	0,00023
EN-04	Escoria	0,615	0,719	<0,00012
EN-05	Escoria	2,429	0,789	<0,00012
EN-06	Escoria	3,170	55,64	<0,00012
EN-07	Escoria	1,822	1,008	<0,00012
EN-08	Escoria	2,905	0,820	<0,00012
CR-N	Sedimento	0,230	0,539	0,00024
SN-01	Suelo	0,373	0,700	0,00023
VBKAN- 01	Suelo	0,353	0,542	0,00018
VBKAN-02	Suelo	0,094	0,062	0,00097
VBKAN-03	Suelo	0,151	0,251	0,00122
VBKTP-01	Suelo	0,108	0,085	0,00189
VBKTP-02	Suelo	0,199	0,182	0,00152
VBKTP-03	Suelo	0,259	0,090	0,00115
VBQAL-01	Suelo	0,205	0,228	0,00058
VBQAL-02	Suelo	0,255	0,259	0,00016
VBQAL-03	Suelo	0,224	0,229	0,00059
VBTKG-01	Suelo	0,594	0,064	0,00040
VBTKG-02	Suelo	0,298	0,160	0,00116
VBTKG-03	Suelo	0,134	0,051	0,00108
Blanco Cuarzo	Suelo	<0,033	<0,042	<0,00017

**Tabla 14:** Concentración de arsénico, plomo y mercurio en fracción de solubles en humanos:

Muestra	Tipo de muestra	As (mg/L)	Pb (mg/L)	Hg (mg/L)
EN-01	Escoria	0,074	<0,008	<0,00012
EN-02	Escoria	<0,015	<0,008	0,00022
EN-03	Escoria	0,116	<0,008	0,00016
EN-04	Escoria	<0,015	<0,008	<0,00012
EN-05	Escoria	0,180	<0,008	<0,00012
EN-06	Escoria	0,068	0,832	<0,00012
EN-07	Escoria	0,052	<0,008	<0,00012
EN-08	Escoria	0,090	<0,008	<0,00012
CR-N	Sedimento	0,025	0,010	<0,00012
SN-01	Suelo	0,086	0,010	0,00043
VBKAN- 01	Suelo	0,042	0,015	<0,00012
VBKAN-02	Suelo	<0,015	<0,008	0,00013
VBKAN-03	Suelo	0,026	0,009	0,00089
VBKTP-01	Suelo	<0,015	0,010	0,00014
VBKTP-02	Suelo	0,038	0,009	<0,00012
VBKTP-03	Suelo	0,042	<0,008	0,00015
VBQAL-01	Suelo	<0,015	<0,008	0,00073
VBQAL-02	Suelo	0,051	<0,008	0,00019
VBQAL-03	Suelo	<0,015	<0,008	0,00013
VBTKG-01	Suelo	0,030	<0,008	<0,00012
VBTKG-02	Suelo	0,044	<0,008	<0,00012
VBTKG-03	Suelo	0,041	<0,008	0,00012
Blanco Cuarzo	Suelo	0,022	<0,008	<0,00012

**Tabla 15:** Concentración de arsénico, plomo y mercurio en fracción de solubles en plantas:

Muestra	Tipo de muestra	As (mg/L)	Pb (mg/L)	Hg (mg/L)
EN-01	Escoria	0,468	<0,008	<0,00012
EN-02	Escoria	0,050	<0,008	0,00012
EN-03	Escoria	0,387	0,054	0,00022
EN-04	Escoria	0,119	<0,008	<0,00012
EN-05	Escoria	0,651	<0,008	<0,00012
EN-06	Escoria	0,691	0,138	<0,00012
EN-07	Escoria	0,245	<0,008	<0,00012
EN-08	Escoria	0,599	<0,008	<0,00012
CR-N	Sedimento	0,070	<0,008	0,00012
SN-01	Suelo	0,149	<0,008	0,00017
VBKAN- 01	Suelo	0,154	<0,008	0,00019
VBKAN-02	Suelo	0,032	<0,008	0,00026
VBKAN-03	Suelo	0,056	<0,008	0,00023
VBKTP-01	Suelo	0,027	<0,008	0,00012
VBKTP-02	Suelo	0,064	<0,008	<0,00012
VBKTP-03	Suelo	0,079	<0,008	0,00018
VBQAL-01	Suelo	0,077	<0,008	0,00023
VBQAL-02	Suelo	0,119	<0,008	0,00013
VBQAL-03	Suelo	0,088	<0,008	<0,00012
VBTKG-01	Suelo	0,254	<0,008	<0,00012
VBTKG-02	Suelo	0,120	<0,008	<0,00012
VBTKG-03	Suelo	0,051	<0,008	<0,00012
Blanco Cuarzo	Suelo	0,058	<0,008	<0,00012

## 7.2. Análisis de As y Pb en lixiviados:

cenma		DETERMINACION DE METALES POR ICP EN LIXIVIADOS SPLP LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL CENMA		Código: FLQAS-001102 Revisión: 01 Página 1 de 2			
<b>Información General</b>							
N° Solicitud	6238	N° CA: -					
Fecha	01/07/2015(L) - 15/07/20	Hora Análisis: -					
Analista	Jesús Martínez						
Método	ILQAS-0011						
Equipo	ICP-OES Perkin Elmer	N°: 8300					
Estándar de Calibración	QCS-26 High-Purity.	N°: 1410015					
MRC(Multiestandar) I MR	ICP-200-7,5 High-	N°: 1229733					
Descripción de la Muestra	Suelo	N° Batch: -					
<b>Control de Calidad</b>							
<b>CRITERIO DE ACEPTABILIDAD</b>							
	Cd	Cr	As	Pb	Se	Ag	Ba
	concentración (mg/L)						
Bco.	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
MRC.	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-
MR.	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-
Spike.	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-	20% +/-
Duplicado (cv)	10% +/-	10% +/-	10% +/-	10% +/-	10% +/-	10% +/-	10% +/-
<b>Elementos de Control de Calidad de Análisis</b>							
	Cd	Cr	As	Pb	Se	Ag	Ba
	concentración (mg/L)						
Bco	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
λ (nm)	226,502	283,555	193,693	220,351	196,022	328,067	493,402
Pendiente	9904	46580	482,7	1549	429,60	46640	2762000
r2	0,999908	0,999931	0,999982	0,999764	0,999884	0,999920	0,999937
MR Teórico	0,300	0,750	0,750	0,750	0,750	0,075	0,750
MR Experimental	0,3079	0,7467	0,7650	0,7629	0,7538	0,0805	0,7610
% rec	102,63	99,56	102,00	101,72	100,51	107,33	101,47
LD	0,062	0,069	0,165	0,054	0,222	0,075	0,061
LC	0,206	0,23	0,55	0,181	0,741	0,25	1,386

Figura 56: Control de calidad de extracción de As y Pb en lixiviados

## 7.3. Análisis de Hg en lixiviados:

 DETERMINACION DE MERCURIO EN MUESTRAS LIQUIDAS LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL CENMA		Código: FLQAL-001801 Revisión: 02 Pag.1 de 1	
Información General			
N° Solicitud	6238		
Fecha	22-Jul-15	Hora Análisis	12:00
Analista	P.Ayala/PR		
Método	: ILQAL 018		
Equipo	: Perkin Elmer Analyst 700		
Estándar de Calibración	: Hg 1000 ppm/Merck	N°	: HC 105996
MRC(Multiestandar) ó MR	: Hg 1000 ppm/Merck	N°	: HC 619721
Descripción de la Muestra	SPLP de suelos y relaves (Exte. 2)		
N° Libro de Digestion Hg	01 2014	N° Batch	40
Control de Calidad			
Criterio de aceptabilidad		Elementos de Control de Calidad de Análisis	
Bco.	<LD	Blanco	<LD
MR.	± 20%	MR teo. (ppb)	2,00
Spike.	± 20%	MR exp. (ppb)	1,74
Duplicado (±E)	± 20%	% rec	87,1
Lámpara	70 ± 20	Spike teo. (ppb)	5,00
		Spike exp. (ppb)	4,24
		% rec	84,9
Parametros de trabajo		Muestra (ug/L)	<LD
λ (nm)	253,7	Muestra D (ug/L)	<LD
Pendiente	0,00876	Duplicado (±E)	N/A
r2	0,999427		
Energía lámpara	66		
Limite de detección	0,170 ug/L		

Figura 57: Control de calidad de extracción de Hg en lixiviados

## 7.4. Análisis de Hg en fracción de bioaccesibles:

 DETERMINACION DE MERCURIO EN MUESTRAS LIQUIDAS LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL CENMA		Código: FLQAL-001801 Revisión: 02 Pag.1 de 1	
Información General			
N° Solicitud	6238		
Fecha	02-Sept-15	Hora Análisis	12:00
Analista	P.Ayala/PR		
Método	: ILQAL 018		
Equipo	: Perkin Elmer Analyst 700		
Estándar de Calibración	: Hg 1000 ppm/Merck	N°	: HC 105996
MRC(Multiestandar) ó MR	: Hg 1000 ppm/Merck	N°	: HC 619721
Descripción de la Muestra	Bioaccesible - Dig. Humanos pH2		
N° Libro de Digestion Hg	01 2014	N° Batch	57
Control de Calidad			
Criterio de aceptabilidad		Elementos de Control de Calidad de Análisis	
Bco.	<LD	Blanco	<LD
MR.	± 20%	MR teo. (ppb)	2,00
Spike.	± 20%	MR exp. (ppb)	1,68
Duplicado (±E)	± 20%	% rec	84,1
Lámpara	70 ± 20	Spike teo. (ppb)	5,00
		Spike exp. (ppb)	4,41
		% rec	88,1
Parametros de trabajo		Muestra (ug/L)	<LD
λ (nm)	253,7	Muestra D (ug/L)	<LD
Pendiente	0,00965	Duplicado (±E)	n/a
r2	0,999893		
Energía lámpara	66		
Limite de detección	0,170 ug/L		

Figura 58: Control de calidad de extracción de Hg en bioaccesibles

## 7.5. Análisis de Hg en fracción de solubles en humanos:

 DETERMINACION DE MERCURIO EN MUESTRAS LIQUIDAS LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL CENMA		Código: FLQAL-001801 Revisión: 02 Pag.1 de 1	
Información General			
N° Solicitud	6238		
Fecha	20-Ago-15	Hora Análisis	12:00
Analista	P.Ayala/PR		
Método	: ILQAL 018		
Equipo	: Perkin Elmer Analyst 700		
Estándar de Calibración	: Hg 1000 ppm/Merck	N°	: HC 105996
MRC(Multiestandar) ó MR	: Hg 1000 ppm/Merck	N°	: HC 619721
Descripción de la Muestra	Bioaccesible - Dérmico		
N° Libro de Digestion Hg	01 2014	N° Batch	55
Control de Calidad			
<b>Criterio de aceptabilidad</b>		<b>Elementos de Control de Calidad de Análisis</b>	
Bco.	<LD	Blanco	<LD
MR.	± 20%	MR teo. (ppb)	2,00
Spike.	± 20%	MR exp. (ppb)	1,84
Duplicado (%E)	± 20%	% rec	92,1
Lámpara	70 ± 20	Spike teo. (ppb)	5,00
<b>Parametros de trabajo</b>		Spike exp. (ppb)	4,41
λ (nm)	253,7	% rec	88,1
Pendiente	0,00965	Muestra (ug/L)	<LD
r2	0,999893	Muestra D (ug/L)	<LD
Energía lámpara	66	Duplicado (%E)	n/a
Limite de detección	0,170 ug/L		

Figura 59: Control de calidad de extracción de Hg en solubles en humanos

## 7.6. Análisis de Hg en fracción de solubles en plantas:

 DETERMINACION DE MERCURIO EN MUESTRAS LIQUIDAS LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL CENMA		Código: FLQAL-001801 Revisión: 02 Pag.1 de 1	
Información General			
N° Solicitud	6238		
Fecha	02-Sept-15	Hora Análisis	12:00
Analista	P.Ayala/PR		
Método	: ILQAL 018		
Equipo	: Perkin Elmer Analyst 700		
Estándar de Calibración	: Hg 1000 ppm/Merck	N°	: HC 105996
MRC(Multiestandar) ó MR	: Hg 1000 ppm/Merck	N°	: HC 619721
Descripción de la Muestra	Soluble - Plantas Exte. KCI-buffer fosfato pH7		
N° Libro de Digestion Hg	01 2014	N° Batch	56
Control de Calidad			
<b>Criterio de aceptabilidad</b>		<b>Elementos de Control de Calidad de Análisis</b>	
Bco.	<LD	Blanco	<LD
MR.	± 20%	MR teo. (ppb)	2,00
Spike.	± 20%	MR exp. (ppb)	1,66
Duplicado (%E)	± 20%	% rec	83,0
Lámpara	70 ± 20	Spike teo. (ppb)	5,00
<b>Parametros de trabajo</b>		Spike exp. (ppb)	4,48
λ (nm)	253,7	% rec	89,6
Pendiente	0,00965	Muestra (ug/L)	<LD
r2	0,999893	Muestra D (ug/L)	<LD
Energía lámpara	64	Duplicado (%E)	N/A
Limite de detección	0,170 ug/L		

Figura 60: Control de calidad de extracción de Hg en solubles en plantas