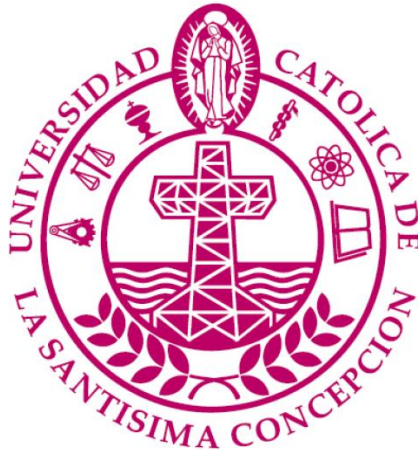


UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil



**EVALUACIÓN DEL RIESGO PARA LA SALUD HUMANA POR
METALES PESADOS EN SUELOS DE LA CIUDAD DE
TALCAHUANO, CHILE.**

José Ignacio Torres Retamal

PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía

Pedro Ignacio Tume Zapata

Profesor Informante

Francesc Xavier Ferraro Castillo

Concepción, 2016

RESUMEN

La presente tesis analiza los resultados de laboratorio de muestras de suelo extraídos de la ciudad de Talcahuano, Chile, donde se determinó la presencia y concentración de diversos metales pesados de interés toxicológico.

En base a los resultados de laboratorio, que determinó concentraciones de metales pesados de 140 muestras de suelo superficial obtenido en la ciudad de Talcahuano, se consideraron 12 elementos de interés, los cuales son: Arsénico (As), Bario (Ba), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Cromo(Cr), Litio (Li), Manganeso (Mn), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Vanadio (V) y Zinc (Zn).

Luego, se realizó un análisis estadístico que nos ayuda a entender la distribución y comportamiento de los datos obtenidos de laboratorio. Con el estudio realizado podremos hacer una evaluación del riesgo de la salud para la población de la ciudad de Talcahuano. Los grupos de interés que se evaluaron fueron niños(as), hombres adultos y mujeres adultas. Que se exponen a 3 vías de contacto con el suelo: ingesta, dermal e inhalación de partículas de suelo.

La ingesta de suelo se refiere a las partículas de suelo que son dirigidas al sistema oral digestivo de las personas. La absorción dérmica se produce mediante el contacto directo del suelo o sus partículas con la piel. La inhalación de partículas de suelo se debe a la exposición de partículas que se encuentran en suspensión y en el suelo, el polvo que se encuentra en la atmosfera que afecta la calidad del aire y la salud de las personas.

En el caso de la evaluación del riesgo para la población, se calculan parámetros indicados por normativas que nos indican el riesgo a la exposición de los contaminantes. Las normativas estan dadas por instituciones internacionales, pero principalmente por la United

States Environmental Protection Agency (USEPA) que ha abordado el problema de manera mas profunda, desarrollado una metodología para cuantificar los riesgos.

La evaluación del riesgo para la salud se divide en dos grandes áreas de análisis. Una de ellas es para el caso cancerígeno donde se establecen límites estadísticos seguros en la población y el otro caso es el no-cancerígeno que fija concentraciones seguras para las personas. En ambos casos el resultado se obtiene por medio de factores únicos de cada población y hábitos de conducta de los sujetos estudiados.

De los resultados obtenidos por la metodología de análisis del riesgo para la salud, se pueden dar recomendaciones y sugerir medidas para evitar problemas presentes y futuros a la salud de las personas que se encuentran en áreas de altas concentraciones de elementos contaminantes.

ABSTRACT

In the last few decades, over round the world, there is a big concern for the health of the people who are exposed to metals and metalloids. Even more populations that have a long exposure to dangerous sources. In Chile the subject of health risk assessment by metals and metalloids has running a short period of time. As little is known, it doesn't exist a clear norm where data can be compared or crossed.

Depending on their nature, the exposure to heavy metals and metalloids in the soil can bring toxicological problems in short, medium or long term. Given this concern, the present work seeks to analyze data collected in the city of Talcahuano and analyze them. Seeking to know if the present concentrations imply a risk to human health.

The health risk assessment focuses on a population that contemplates three groups with physiological and behavioral differences, as are adult men, adult women and children. The study groups are exposed to three way exposure to the soil Ingestion, dermal contact and inhalation of soil particles.

TABLA DE CONTENIDOS

	Páginas
Resumen	III
Tabla de Contenidos	VII
Índice de Figuras	IX
Índice de Tablas	XI
1 Introducción	1
1.1 Presentación del tema	1
1.2 Objetivos generales.....	3
1.2.1 Objetivo Principal.....	3
1.2.2 Objetivos secundarios.....	3
1.3 Hipótesis.....	4
1.4 Alcance	5
2 Metodología	7
2.1 Evaluación del riesgo a la salud Humana	7
2.2 Perfil toxicológico de los elementos	10
2.2.1 Elementos cancerígenos	11
2.2.2 Elementos no cancerígenos	13
2.3 Caracterización de la exposición humana.....	15
2.3.1 Grupos considerados para la evaluación	15
2.3.2 Vías de exposición consideradas	16
2.4 Evaluación de la exposición humana	17
2.4.1 Ingestión de suelo	17
2.4.2 Absorción dérmica por contacto con el suelo	21

2.4.3	Inhalación de partículas procedentes del suelo	29
2.5	Teoría y método en la evaluación de riesgo para la salud.....	32
2.5.1	Caracterización del riesgo no cancerígeno	32
2.5.2	Caracterización del riesgo cancerígeno	38
3	Resultados	44
3.1	Evaluación del riesgo para la salud	45
3.1.1	Estimación de factores previos para la Evaluación del riesgo de la salud....	45
3.1.2	Riesgo no cancerígeno	48
3.1.3	Riesgo no cancerígeno para la concentración máxima encontrada de Arsénico, evaluando a niños(as).....	52
3.1.4	Riesgo cancerígeno	57
3.1.5	Riesgo cancerígeno para la concentración máxima encontrada de Arsénico, evaluando a niños(as).....	59
3.2	Resumen de tablas comparativas del riesgo cancerígeno y no cancerígeno de las muestras encontradas en los suelos de Talcahuano	65
4	Conclusiones.....	67
5	Bibliografía.....	68

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso que genera el riesgo a la salud humana.....	4
Figura 2. Mapa ciudad de Talcahuano, Región del Biobío. Fuente (Google, 2016).	5
Figura 3. Esquema metodológico de las etapas en la Evaluación de riesgos a la salud Humana definida por USEPA.	9
Figura 4. Grupos considerados en la evaluación.	15
Figura 5. Vías de exposición seleccionadas para el estudio.	16

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores recomendados USEPA para calcular la exposición de ingesta de suelo de los grupos considerados.	19
Tabla 2. Peso corporal BW de los grupos considerados.....	20
Tabla 3. Tiempo de exposición dependiendo del caso cancerígeno o no cancerígeno.	20
Tabla 4. Área superficial corporal expuesta para Hombres adultos por áreas.	23
Tabla 5. Área superficial corporal expuesta para Mujeres adultas por áreas.	24
Tabla 6. Área superficial corporal expuesta para Niños(as) por áreas.....	25
Tabla 7. Factores de adherencia a la piel según actividad para niños(as).....	25
Tabla 8. Factores de adherencia a la piel según actividad para adultos (hombres y mujeres).....	26
Tabla 9. Factores de adherencia a la piel general.	26
Tabla 10. Factores de adherencia recomendados para partes del cuerpo para actividades con suelo.....	27
Tabla 11. Fracción de absorción dermal (ABS) de los elementos.....	28
Tabla 12. Tasas de inhalación de suelo.....	30
Tabla 13. Factores de emisión (PEF).....	31
Tabla 14. Dosis de referencia para ingestión (RfDing).....	34
Tabla 15. Dosis de referencia para absorción dérmica (RfDderm).....	36
Tabla 16. Dosis de referencia para inhalación (RfDinh).....	37
Tabla 17. Reglas de decisión límites tolerables riesgo cancerígeno.....	39
Tabla 18. Factores de pendiente por ingestión (RfDinh).....	40
Tabla 19. Factor de pendiente por absorción dermal ajustado (SFderm).....	41
Tabla 20. Factor de unidad de riesgo por inhalación (IUR).	42

Tabla 21. Factor de pendiente por inhalación (SFinh).....	43
Tabla 22. Resumen estadístico de las concentraciones de metales pesados en los suelos de Talcahuano en [mg/kg] con un n=140	44
Tabla 23. Área superficial corporal expuesta para los tres grupos.	46
Tabla 24. Producto del Área de superficie corporal expuesta (SA) y Factor de adherencia a la piel (AF) para los tres grupos estudiados.....	47
Tabla 25. Coeficiente de peligrosidad (HQ) por Ingestión para los 3 grupos.....	48
Tabla 26. Coeficiente de peligrosidad (HQ) por absorción dérmica para los 3 grupos.	49
Tabla 27. Coeficiente de peligrosidad (HQ) por inhalación para los 3 grupos.	50
Tabla 28. Resumen de la Total exposición del índice de peligrosidad (TEHI).....	51
Tabla 29. Índice de peligrosidad cancerígeno por ingestión para los 3 grupos.	57
Tabla 30 Índice de peligrosidad cancerígeno por contacto dermal para los 3 grupos.....	57
Tabla 31. Índice de peligrosidad cancerígeno inhalación para los 3 grupos.	57
Tabla 32. Total exposición del índice de peligrosidad cancerígeno (TCRI).....	58
Tabla 33. Tabla resumen de la Total exposición del índice de peligrosidad (TEHI) y de la Total exposición del índice de peligrosidad cancerígena (TCRI).....	65
Tabla 34. Tabla resumen de riesgo cancerígeno y no cancerígeno, para cada elemento. .	66

1 Introducción

1.1 Presentación del tema

En las últimas décadas, alrededor del mundo, existe una gran preocupación por la salud de las personas que están expuestas a metales pesados. En Chile el tema de la evaluación de riesgo a la salud por metales pesados lleva poco tiempo. Como se conoce poco, no existe una normativa clara, donde se puedan comparar o cruzar datos.

Con el fuerte y rápido desarrollo de los últimos años de la zona industrial, comercial y urbano de la ciudad de Talcahuano, ha dado lugar a la alteración del medio ambiente, en especial el suelo de la ciudad, que recibe la carga de metales pesados. El desarrollo industrial y económico, trae con sigo la llegada de población a establecerse en zonas contiguas; exponiendo el desarrollo urbano a contaminantes de forma directa.

Dependiendo de su naturaleza, la exposición a metales pesados o metaloides en el suelo, nos pueden traer problemas toxicológicos a corto, mediano o largo plazo. Dado esta inquietud y preocupación, el presente trabajo busca Evaluar el riesgo para la salud de las personas en la ciudad de Talcahuano. Buscando saber si las concentraciones presentes implican un riesgo eminente.

La evaluación del riesgo para la salud, en este estudio, se enfocó en tres grupos con diferencias fisiológicas y conductuales, como lo son los hombres adultos, mujeres adultas y niños(as). Los grupos de estudio se exponen al suelo por 3 vías: ingesta, contacto dermal e inhalación de partículas de suelo.

La ingesta de suelo se refiere a las partículas de suelo que son dirigías al sistema oral digestivo de las personas en estudio.

La absorción dérmica se produce mediante el contacto de la epidermis con el suelo. La epidermis como es la capa exterior de la piel, tiene contacto directo con el medio y tiene características de permeabilidad riesgosa para la salud.

La inhalación de partículas de suelo se debe a la exposición de partículas que se encuentran en suspensión y en el suelo. El polvo que se encuentra en la atmosfera es generado tanto de forma natural o artificial por labores industriales humanas. Esto afecta la calidad del aire y la salud de las personas (USEPA, 2011).

En el mundo existen muchos estudios donde se hace la Evaluación del riesgo para la salud por metales pesados encontrados en los suelos superficiales de diversas ciudades del mundo, tales como Luanda en Angola (Ferreira-Baptista & De Miguel, 2005), o Beijing en China (Chen, y otros, 2016).

En Chile también existen estudios donde se evalúa el riesgo para la salud, en la comuna de Andacollo (Salinas, Rebolledo, & Cortes, 2012) que estimó los riesgos en la salud humana asociado con desechos de los procesos de extracción de minerales, que se encuentran como depósitos de relaves de grandes dimensiones dispuestas en la zona urbana de la comuna. También se tiene un estudio que abarca las comunas de Concón, Quintero y Puchuncavi (Salgado, 2014) que toma de forma más general el tema; El estudio evaluó y formuló un plan de manejo de los riesgos a la salud de las personas y de los riesgos ecológicos a la biota terrestre, por la exposición a contaminantes ambientales asociados a la actividad industrial y energética.

1.2 Objetivos generales

1.2.1 Objetivo Principal

Evaluación del riesgo para la salud humana por metales pesados en suelos superficiales de la ciudad de Talcahuano, Chile. Implementando metodologías descritas por United States Environmental Protection Agency (USEPA, United States Environmental Agency, Protection Exposure Factors Handbook, 2011).

1.2.2 Objetivos secundarios

1. Estimar el riesgo de la población de Talcahuano a estos contaminantes del suelo, clasificándolos en cancerígenos y no cancerígenos.
2. Analizar resultados de la evaluación del riesgo para dar recomendaciones y así evitar problemas a la salud.

1.3 Hipótesis

Todas las actividades humanas son susceptibles de provocar cambios en el entorno, los suelos no están ajenos a estas alteraciones. La contaminación del suelo por acción del hombre se debe principalmente a procesos y actividades industriales, que generan contaminantes que se van depositando en los suelos, los más habituales de encontrar son los metales pesados e hidrocarburos (Nerín de la Puerta, 2008).

El desarrollo industrial y económico, trae consigo la llegada de población a establecerse a zonas contiguas; exponiendo a las personas de forma directa a contaminantes. Las industrias, la minería, el transporte y ciertas prácticas agrícolas generan la contaminación del suelo, que actúa como almacén de residuos, provocando su degradación.

Los metales pesados, dependiendo de su concentración, pueden ser nocivos para la salud en el ser humano y otros seres vivos. Además los metales pesados tienden a acumularse en la cadena alimenticia generando un ciclo en la contaminación (USEPA, 2016).

Lo que se quiere mostrar es que la actividad industrial genera contaminantes, como los metales pesados, que en contacto con el ser humano por diferentes vías pueden provocar problemas a la salud, dependiendo de las concentraciones en que se encuentren. El resumen se puede ver en la siguiente figura.

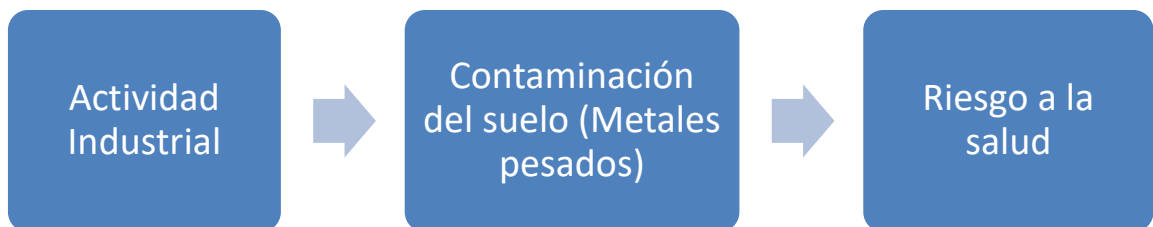


Figura 1. Esquema del proceso que genera el riesgo a la salud humana.

1.4. Alcance

Con el fuerte y rápido desarrollo de las últimas décadas Talcahuano experimentó un cambio económico sustantivo que ha repercutido, hasta el día de hoy, tanto en la región como a nivel país (SUBDERE, 2016). Es por ello, que se quiso hacer un estudio que determine la presencia potencial de contaminantes peligrosos en el suelo, evaluando el riesgo para la salud de las personas por la presencia de metales pesados en el área de estudio. Es por estas razones, se decidió estudiar las concentraciones de metales pesados de 140 muestras de suelo superficial obtenido en la ciudad de Talcahuano, considerando 12 elementos de interés, los cuales son: Arsénico (As), Bario (Ba), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Litio (Li), Manganeseo (Mn), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Vanadio (V) y Zinc (Zn).

Talcahuano es una ciudad y comuna, que se encuentra en la zona centro-sur de Chile, pero que geográficamente es el centro del país. Talcahuano pertenece a la provincia de Concepción en la región del Biobío. La ciudad limita al sur con Hualpén, al sudeste con Concepción y al noroeste con el Océano Pacífico. La ciudad tiene una superficie de $92,3 \text{ km}^2$ y una población que se estima en 151.524 habitantes (INE, 2012).



Figura 2. Mapa ciudad de Talcahuano, Región del Biobío. Fuente (Google, 2016).

Una rápida detección de niveles peligrosos de contaminantes, puede hacer la diferencia en la salud de la población. Es por ello que es importante desarrollar normativas y métodos que puedan controlar y mitigar las concentraciones de contaminantes en los suelos de zonas urbanas de Talcahuano. Problemas mayores con los contaminantes y/o metales pesados pueden afectar además de la salud, el desarrollo, productividad y futuro de una zona.

2 Metodología

2.1 Evaluación del riesgo a la salud Humana

La evaluación del riesgo para la salud humana corresponde a la caracterización de los efectos potencialmente adversos, derivados de la exposición de determinados agentes ambientales. También describe los posibles efectos negativos en base a evaluaciones de resultados de proyectos de investigación. La exploración de estos resultados busca encontrar el tipo y magnitud de los efectos en la salud bajo determinados parámetros y condiciones de exposición, además de evaluar el número y características de los potenciales afectados a diversos niveles y duraciones de exposición. En resumen, la evaluación de riesgo caracteriza, cualitativa o cuantitativamente, la magnitud o severidad del efecto adverso y la extensión y probabilidad de exposición (MMA, 2012).

En otras palabras las etapas evalúan el peligro y naturaleza de posibles efectos adversos para la salud de los seres humanos que están expuestos a productos químicos o elementos, que se encuentran en el medio ambiente.

Esta evaluación del riesgo puede ser llevada a análisis en un presente o en un tiempo futuro, extrapolando con datos registrados. La evaluación de riesgo a la salud, ayuda a tener una proyección en el tiempo y poder así implementar sistemas de mitigación a los problemas de salud en áreas donde el desarrollo urbano e industrial crece día a día.

La evaluación del riesgo para la salud humana incluye 4 pasos básicos (USEPA, 2016):

Paso 1. Identificación de los contaminantes de interés (peligro).

Paso 2. Evaluación Dosis-respuesta.

Paso 3. Evaluación de la exposición.

Paso 4 Análisis de riesgo.

Para trabajar con las 4 etapas, previamente, es necesario tener una planificación del proceso de evaluación (USEPA, 2017). Estas etapas la USEPA las define como:

Identificación de los contaminantes: Establece los tipos de efectos adversos para la salud que pueden ser causados por la exposición a algún agente en cuestión, y caracterizar la calidad y el peso de la evidencia que respalda esta identificación.

Evaluación Dosis-respuesta: Relaciona la dosis de exposición y el incremento de probabilidad de aparición o de la seriedad de efectos adversos para la salud que previamente fueron descritas en el *Paso 1* (Identificación de los contaminantes). Describiendo cualitativa o cuantitativamente las propiedades inherentes de los contaminantes que tienen potencial de causar efectos dañinos a la salud.

Evaluación de la exposición: La evaluación de la exposición es el proceso de medir o estimar la magnitud, frecuencia y duración de la exposición humana a un agente en el medio ambiente, o la estimación de exposiciones futuras para un agente que aún no se ha lanzado. Una evaluación de la exposición incluye cierta discusión sobre el tamaño, la naturaleza y los tipos de poblaciones humanas expuestas al agente.

Análisis de riesgo: El análisis del riesgo resume e integra la información para sintetizar una conclusión general sobre el riesgo. Un análisis del riesgo transmite el juicio del evaluador de riesgo en cuanto a la naturaleza y presencia o ausencia de riesgos, junto con información sobre cómo se evaluó el riesgo, dónde aún existen supuestos e incertidumbres y dónde se deberán tomar decisiones políticas.

Las etapas de la evaluación del riesgo a las saludes humanas señaladas y definidas por United States Environmental Protection Agency (USEPA) se relacionan como lo muestra la siguiente figura:

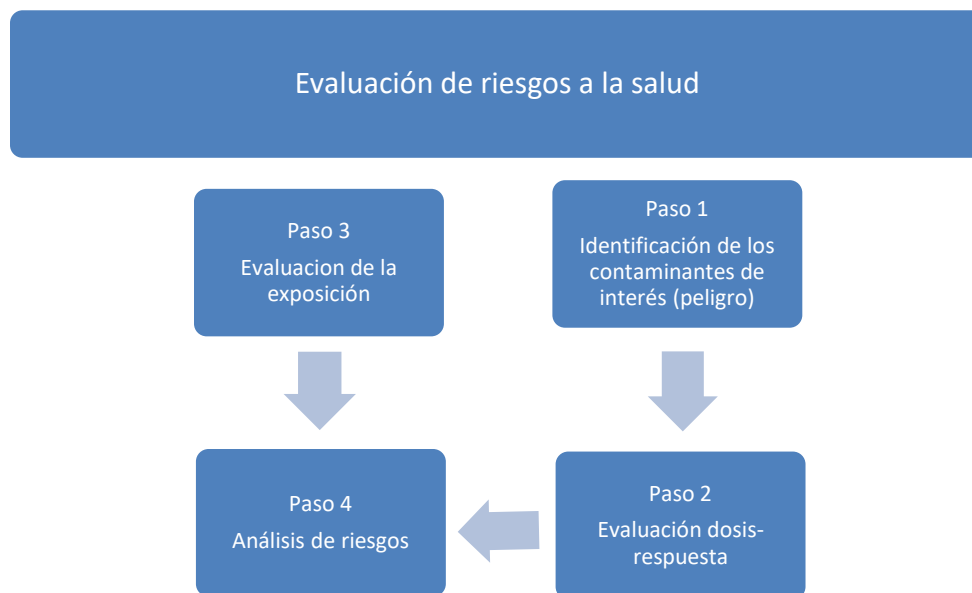


Figura 3. Esquema metodológico de las etapas en la Evaluación de riesgos a la salud Humana definida por USEPA.

El modelo está enfocado principalmente a contaminantes químicos, esto no quiere decir que la metodología pueda ser aplicada en otros ámbitos del estudio de contaminación ejercida por elementos similares. Puede ser llevada a un amplio rango de contaminantes.

2.2 Perfil toxicológico de los elementos

Algunos elementos, metales y metaloides que nos rodean tienen funciones importantes en nuestro cuerpo, mientras que otros son muy peligrosos y dañinos. Actualmente los efectos tóxicos de los elementos traza de mayor incidencia medioambiental están bien descritos por la literatura e informes científicos.

Al contrario de otros contaminantes, los elementos estudiados, se pueden encontrar de forma natural en el medio ambiente debido a los ciclos biogeoquímicos de la tierra, que determinan la concentración de las sustancias en el medio. Pero las conductas y procesos humanos modifican las concentraciones naturales y la forma de distribución en que se las puede encontrar.

Existen elementos que son indispensables para el mantenimiento del sistema bioquímico de los humanos, llamados oligoelementos, que son fundamentales en las funciones del sistema todos los individuos. Por otra parte si algunos oligoelementos esenciales para la vida sobrepasan determinadas concentraciones dan lugar a patologías tóxicas y problemas en el desarrollo humano. Dado el carácter acumulativo afectan tanto el medioambiente como la salud humana, sobre todo si son emisiones prolongadas, aunque sean a niveles bajos, pueden incrementar sustancialmente el riesgo.

La principal fuente de contaminación está dada por la actividad humana, que con sus hábitos domésticos y procesos industriales son el mayor foco de problemas ambientales. Los elementos estudiados podemos clasificarlos dado el criterio de la discusión preliminar y/o en base a la evidencia científica. De esta forma tendremos cancerígenos y no cancerígenos.

2.2.1 Elementos cancerígenos

2.2.1.1 Arsénico

El arsénico (As) es un elemento y mineral, que se encuentra distribuido ampliamente en la naturaleza en forma de Arsénico Inorgánico. Los efectos tóxicos y cancerígenos del arsénico están muy bien descritos. En intoxicaciones por arsénico inorgánico se ven problemas en el tracto gastrointestinal, anormalidades en el sistema nervioso periférico y problemas en la sangre. También se pueden producir problemas fetos. Los tipos de cáncer que se le atribuyen al arsénico son cáncer a la piel, pulmón, hígado, entre otros (Lenntech, 2017).

2.2.1.2 Cromo

El Cromo (Cr) es un elemento natural que se encuentra en la corteza terrestre, presentándose en diferentes formas y estados. La toxicidad y efectos cancerígenos están principalmente relacionados con el Cromo (IV), produciendo enfermedades respiratorias como cáncer al pulmón. También puede producir dermatitis, úlceras, problemas renales y cáncer al estómago por el consumo de agua contaminada (Lenntech, 2017).

2.2.1.3 Níquel

El níquel (Ni) es un elemento que en su estado puro tiene un color blanco platinado y al contacto es bastante duro. Los efectos tóxicos se producen principalmente por el contacto y a nivel respiratorio por procesos industriales, produciendo dermatitis, complicaciones en mucosidades y casos de asma. También se relaciona a riesgo con diferentes tipos de cáncer relacionado a las vías respiratorias.

2.2.1.4 Plomo

El Plomo (Pb) es un elemento y metal pesado de color gris, con una baja temperatura de fusión que se encuentra en la corteza terrestre. Se ha demostrado que el plomo es un serio peligro para la salud humana, provocando problemas principalmente en los niños(as) y fetos en gestación, produciendo nacimientos prematuros, problemas de desarrollo, bajo peso e incluso abortos. Además en adultos puede causar anemia hemolítica, dolores articulares, alteraciones neuronales, problemas endocrinos, etc. Existe evidencia que ha determinado una relación con el cáncer y formación de tumores.

2.2.2 Elementos no cancerígenos

2.2.2.1 Bario

El Bario (Ba) es un elemento metálico de color blanco platinado. La exposición durante cortos tiempos y altas concentraciones puede producir malestares gastrointestinales y debilidad muscular. La (USEPA) ha determinado que no existe evidencia de relacionar la ingestión e inhalación de bario con el cáncer.

2.2.2.2 Cobalto

El Cobalto (Co) es un elemento de color gris plateado, duro. Algunos estudios señalan que la exposición de altas concentraciones de cobalto no radioactivo puede producir problemas en embarazos, pero no se han encontrado defectos en hijos de mujeres tratadas con cobalto. Además no existe evidencia que la exposición a cobalto no radioactivo consumido por medio de agua o alimentos produzca cáncer.

2.2.2.3 Cobre

El Cobre (Cu) es un metal metálico encontrado naturalmente en el ambiente rocas, suelo, agua y aire. Altos niveles de cobres pueden ser dañinos para el ser humano, por ejemplo, la inhalación de grandes concentraciones pueden generar problemas de irritación en las mucosas de la vía respiratoria. La USEPA ha determinado que el cobre no presenta problemas cancerígenos.

2.2.2.4 Litio

El Litio (Li) es un metal sólido, el más ligero, con un bajo punto de fusión y reactivo. La exposición directa por inhalación en altas concentraciones puede producir sensación de quemadura, tos, falta de aire e irritación. Al contacto puede causar enrojecimientos y a la exposición por ingestión puede producir dolores abdominales náuseas y vómitos. (Lenntech, 2016)

2.2.2.5 Manganese

El Manganese (Mn) es un elemento metálico de color plateado en su estado puro, pero es difícil encontrarlo en ese estado dado que se combina con otras sustancias y elementos. Niveles altos de concentración manganese pueden producir problemas al sistema nervioso, alterando el comportamiento y velocidad de respuesta. Es importante señalar que no existe evidencia científica que relacione altas concentraciones de manganese con el cáncer. (ATSDR, 2012).

2.2.2.6 Mercurio

El Mercurio (Hg) es un metal, de un color blanco platinado brillante, inodoro que ocurre de forma natural en el ambiente. El principal problema a la salud con el mercurio es que altera el sistema nervioso. El metilmercurio y vapores de mercurio metálico llegan más fácilmente al cerebro y pulmones. El mercurio metálico, inorgánico y orgánico pueden dañar de forma permanente riñones, cerebro y fetos. En cuanto a su comportamiento como agente cancerígeno la USEPA ha determinado que el cloruro mercuríco y el metilmercurio son posibles elementos cancerígenos. (ATSDR, 2013).

2.2.2.7 Vanadio

El Vanadio (V) es un elemento metálico de color blanco grisáceo que se da en la naturaleza generalmente en forma de cristales. La exposición a vanadio por la vía de inhalación a través del aire puede dañar los pulmones. En la ingesta de vanadio se han reportado diarreas y calambres estomacales. El USEPA no ha clasificado al vanadio como un elemento cancerígeno. (ATSDR, 2013).

2.2.2.8 Zinc

El Zinc (Zn) es un elemento metálico, de color gris y muy dúctil. El zinc es un elemento muy beneficioso para la salud humana pero si se sobrepasan ciertas concentraciones puede tener efectos tóxicos en la salud, como por ejemplo, úlceras al estómago, irritaciones a la piel, vómitos, etc. La USEPA no lo tiene considerado como un agente cancerígeno. (Lenntech, 2016).

2.3 Caracterización de la exposición humana

2.3.1 Grupos considerados para la evaluación

Los grupos de interés en el presente trabajo son los niños(as), hombres adultos y mujeres adultas. La selección se configuró de esta forma dado que se consideran grupos de vulnerabilidad con mayor representatividad en una población donde se estudia el riesgo a la salud por contaminantes. Para el grupo de los niños se contempló una edad de 6 años y en el caso de los adultos la edad considerada como referencia fue de 24 años.

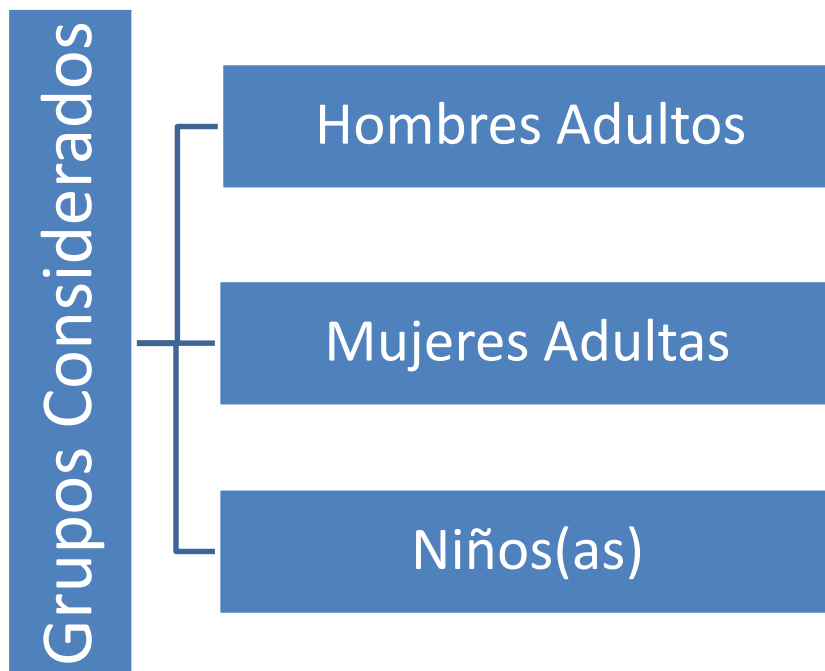


Figura 4. Grupos considerados en la evaluación.

Establecer y respetar las edades ayuda a mantener una coherencia en la obtención de factores y sus posteriores análisis. Los factores buscados en las tablas de la United States Environmental Protection Agency (USEPA) dependen del perfil del grupo de interés para determinar el potencial riesgo a una exposición de contaminantes.

2.3.2 Vías de exposición consideradas

Las vías de exposición consideradas se definen mediante la relación por el cual las personas se ven afectadas a peligros para la salud, causadas por la exposición de fuentes de contaminación. Las tres vías que se eligieron son las más relevantes con el tipo de agentes contaminantes que se analizan en este estudio.

Las vías consideradas en este estudio son:

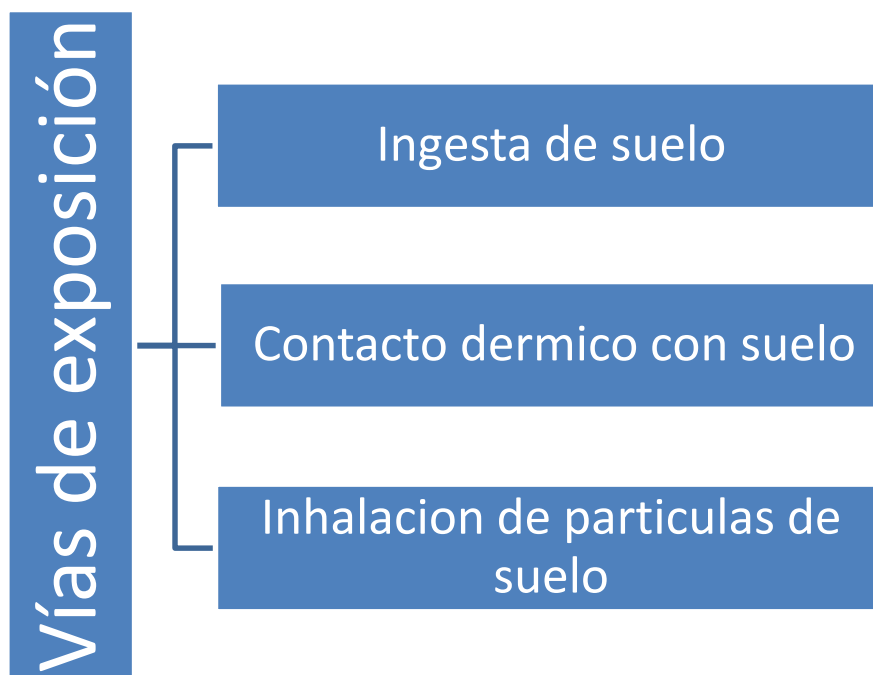


Figura 5. Vías de exposición seleccionadas para el estudio.

Las vías de exposición se refieren a las maneras en que los contaminantes se introducen o entran en contacto con el cuerpo, para contaminantes químicos en general la Guía de evaluación de impacto ambiental de Chile que evalúa el riesgo para la salud en la población (MMA, 2012) describe las vías de inhalación (por ejemplo: gases y partículas de suspensión), ingesta (por ejemplo: suelo, polvo, agua, alimentos) y contacto dérmico (por ejemplo: suelo, baño en agua).

2.4 Evaluación de la exposición humana

2.4.1 Ingestión de suelo

Una de las rutas analizadas en esta investigación es la ingesta de suelo por vía oral, más precisamente se refiere a las partículas de suelo que pasan al sistema digestivo de los individuos.

Dado que el estudio se enfoca en una población que contempla tres grupos con diferencias fisiológicas y el comportamiento, como lo son los hombres adultos, mujeres adultas y niños(as). Se evidencian disimilitudes importantes en la manera de los comportamientos entre adultos y niños, para esta vía de exposición.

Los rangos de ingesta diaria en lo que se refiere al suelo tiene una gran variabilidad entre adultos y niños, dado que los niños tienen una tendencia mayor a la ingesta de suelo. Esto se explica porque estos últimos en su comportamiento de exploración del medio y análisis sensorial, tienden a llevarse las manos y objetos (juguetes, textiles y mobiliarios) a la boca, como también prácticas de consumo directo de suelo, llamado también geofagia.

Para cuantificar la dosis media diaria por ingesta ADI_{ing} se utiliza la expresión que se muestra a continuación.

$$ADI_{ing} = C_{soil} \times \frac{IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times CF \quad (1)$$

Donde los factores que componen la ecuación anterior son:

ADI_{ing}	Dosis media diaria de ingestión	[mg/kg-día]
C_{soil}	Concentración del contaminante en el suelo	[mg/kg]
IngR	Tasa de ingesta de suelo	[mg/día]
EF	Frecuencia de exposición	[día/año]
ED	Duración de la exposición	[año]
BW	Peso corporal	[kg]
AT	Tempo de exposition	[día]
CF	Factor de conversión	[kg/mg]

- Factor de conversión (CF)

De la formula anterior se tiene que el Factor de conversión CF es 10^{-6} [kg/mg]. Factor necesario para que se respeten las unidades en trabajo. De esta manera la formula anterior queda de la siguiente manera.

$$ADI_{ing} = C_{soil} \times \frac{IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (2)$$

- Tasa de ingesta de suelo (IngR)

Por razones de comportamiento entre adultos y niños, existe una diferencia considerable entre estos dos grupos etarios. Los niños tienen una mayor tendencia al consumo, dado su comportamiento y conducta de geofagia e interacción con el medio. (USEPA, 2011)

Tabla 1. Valores recomendados USEPA para calcular la exposición de ingesta de suelo de los grupos considerados.

	Ingesta suelo (IngR) [mg/día]
Niños(as)	150
Adultos (Hombres y mujeres)	50

Como se puede ver en la tabla anterior, la USEPA no hace diferencia entre hombres o mujeres adultos, pero si hace diferencias notables en los grupos etarios, por razones comentadas anteriormente. En el caso de los niños(as), el intervalo de edad que contempla es de 1 año hasta los 6 años.

- Frecuencia de exposición (EF)

En la ingestión de suelo se considerara un modo de contacto residencial que establecerá 350 días al año suponiendo que las personas estén fuera del dominio territorial en estudio solamente 15 días en el año.

- Duración de la exposición (ED)

La duración a la exposición se refiere al tiempo de por vida en años de edad. Para ello se asume un escenario donde las personas han vivido siempre en el lugar de interés para el estudio.

- Peso corporal (BW)

El peso corporal de los grupos considerados en la evaluación del riesgo, fueron tomados de las recomendaciones que hace la USEPA, esto para el caso de niños(as) y en el caso de hombres adultos y mujeres adultas la información se obtuvo de Encuesta Nacional de Salud (ENS) Chile 2009 – 2010 (MINSAL, 2010). Esto se traduce en los valores de la siguiente tabla:

Tabla 2. Peso corporal BW de los grupos considerados.

	BW [kg]	Fuente
Niños(as)	18,8	(USEPA, 2011)
Mujeres Adultos	67,5	(MINSAL, 2010)
Hombres Adultos	77,3	(MINSAL, 2010)

Redondeados BW en los cálculos en 20 kg, 65 kg ,75 kg respectivamente.

- Tiempo de exposición (AT)

El tiempo de exposición se expresa en unidad de [día] y tiene dos casos dependiendo si se busca calcular efectos cancerígenos o no cancerígenos (USEPA, 1997).

Tabla 3. Tiempo de exposición dependiendo del caso cancerígeno o no cancerígeno.

	No cancerígeno	Cancerígeno
AT [día]	$AT = ED \cdot 365$	$AT=25550^1$

Para el caso no-cancerígeno el tiempo de exposición (AT) corresponde duración de la exposición (ED) pero en días, es por eso que se multiplica por 365.

Para el cancerígeno se llegó por convención una edad de 70 años, pero transformados en unidad de días.

¹ Se considera para el caso cancerígeno como convención 70 años el periodo de vida , de esta forma $AT= 70$ [años] que en días $AT=70*365[día]=25550[día]$

2.4.2 Absorción dérmica por contacto con el suelo

La vía de exposición mediante la piel es uno de los tipos de absorción que se produce por el contacto de la epidermis con el suelo. La epidermis como es la capa exterior de la piel, tiene contacto directo con el medio.

La absorción a través de la piel se produce debido a la captación de sustancias.

Existen factores que afectan la cantidad de sustancias que la piel absorbe. La principal y con la que se enfoca el estudio, son las propiedades físico-químicas de la sustancia en contacto. Algunos de los elementos traspasan con mayor facilidad que otros debido a sus características químicas y físicas del mismo.

$$ADI_{dermal} = C_{soil} \times \frac{SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times CF \quad (3)$$

ADI_{dermal}	Dosis media diaria de absorción dérmica	[mg/kg-día]
C_{soil}	Concentración del contaminante en el suelo	[mg/kg]
EF	Frecuencia de exposición	[día/año]
ED	Duración de la exposición	[año]
BW	Peso corporal	[kg]
AT	Tempo de exposition	[día]
SA	Área superficie corporal expuesta	[cm ²]
AF	Factor de adherencia a la piel	[mg/cm ² -día]
ABS	Fracción de absorción dermal	[-]
CF	Factor de conversión	[kg/mg]

- Factor de conversión (CF)

De la formula anterior se tiene que el Factor de conversión CF es 10^{-6} [kg/mg]. Factor necesario para que se respeten las unidades en trabajo. De esta manera la formula anterior queda de la siguiente manera.

$$ADI_{dermal} = C_{soil} \times \frac{SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (4)$$

- Frecuencia de exposición (EF)

En el caso la presente evaluación de absorción dérmica por contacto con el suelo, se considerara un modo de contacto residencial que establecerá 350 días al año suponiendo que las personas estén fuera del dominio territorial en estudio solamente 15 días en el año.

- Duración de la exposición (ED)

La duración a la exposición se refiere al tiempo de por vida en años de edad. Para ello se asume un escenario donde las personas han vivido siempre en el lugar de interés para el estudio.

- Área superficial corporal expuesta (SA)

Para el área superficial corporal expuesta se consideraran dos escenarios posibles, el primero es uno para adultos (hombres y mujeres) y el otro para niños(as). Estos dos casos considerando una exposición de forma residencial. Los factores están basados en estudios hechos por United States Environmental Protection Agency, en el informe Risk Assessment Guidance for Superfund, Volumen I, Human Health Evaluation Manual, Parte E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment (USEPA, 2004).

Área superficial corporal expuesta para adultos

Para el caso del área superficial en los adultos se consideraran cuatro áreas de exposición dermal, las que son manos, brazos, piernas y cabeza.

$$SA_{Adulto} = SA_{cabeza} + SA_{brazos} + SA_{manos} + SA_{piernas} \quad (5)$$

Donde sus términos se definen como:

SA_{Adulto}	Área superficial corporal expuesta para adultos	$[cm^2]$
SA_{cabeza}	Área superficial corporal expuesta en cabeza	$[cm^2]$
SA_{brazos}	Área superficial corporal expuesta en brazos	$[cm^2]$
SA_{manos}	Área superficial corporal expuesta en manos	$[cm^2]$
$SA_{piernas}$	Área superficial corporal expuesta en piernas	$[cm^2]$

Las áreas de la superficie corporal expuesta por el hombre adulto son basadas en estudios de la USEPA (USEPA, 2011) y son las siguientes:

Tabla 4. Área superficial corporal expuesta para Hombres adultos por áreas.

SA Hombre Adulto	$[m^2]$	$[cm^2]$
SA_{cabeza}	0,136	1360
SA_{brazos}	0,314	3140
SA_{manos}	0,107	1070
$SA_{piernas}$	0,683	6830

Las áreas de la superficie corporal expuesta por la mujer adulta son basadas en estudios de la USEPA (USEPA, 2011) y son las siguientes:

Tabla 5. Área superficial corporal expuesta para Mujeres adultas por áreas.

SA Mujer Adulto	$[m^2]$	$[cm^2]$
SA_{cabeza}	0,114	1140
SA_{brazos}	0,237	2370
SA_{manos}	0,089	890
$SA_{piernas}$	0,598	5980

Área superficial corporal expuesta para niños(as)

Para el caso de niños(as), a diferencia del área superficial corporal expuesta para adultos, se agregara una quinta área expuesta del cuerpo, esta es los pies. Dado que para los niños(as) en sus primeros años de vida, se acostumbra a que anden a pies descalzos.

$$SA_{Niño(as)} = SA_{cabeza} + SA_{brazos} + SA_{manos} + SA_{piernas} + SA_{pies} \quad (6)$$

Donde sus términos se definen como:

$SA_{Niño(as)}$	Área superficial corporal expuesta para niños(as)	$[cm^2]$
SA_{cabeza}	Área superficial corporal expuesta en cabeza	$[cm^2]$
SA_{brazos}	Área superficial corporal expuesta en brazos	$[cm^2]$
SA_{manos}	Área superficial corporal expuesta en manos	$[cm^2]$
$SA_{piernas}$	Área superficial corporal expuesta en piernas	$[cm^2]$
SA_{pies}	Área superficial corporal expuesta en pies	$[cm^2]$

Las áreas de la superficie corporal expuesta por niños(as) son basadas en estudios de la UESPA (USEPA, 2011) y son las siguientes:

Tabla 6. Área superficial corporal expuesta para Niños(as) por áreas.

SA Niños(as)	$[m^2]$	$[cm^2]$
SA_{cabeza}	0,061	610
SA_{brazos}	0,106	1060
SA_{manos}	0,037	370
$SA_{piernas}$	0,195	1950
SA_{pies}	0,049	490

- Factor de adherencia a la piel (AF)

Para obtener el Factor de adherencia a la piel, existen tablas propuestas por la USEPA con variados escenarios donde se produce el contacto. Mostrando tipos de actividades y grupos etarios (USEPA, 2004). El factor de adherencia a la piel se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 7. Factores de adherencia a la piel según actividad para niños(as).

Actividad	AF para Niños(as) $[mg/cm^2]$
Niños(as) dentro de casa	0,01
Niños(as) en guarderías jugando dentro y fuera de casa.	0,04
Niños(as) jugando en suelo seco	0,04
Niños(as) jugando en suelo húmedo	0,2
Niños(as) en barro	21

La tabla AF para niños está basada en estudios a la exposición de cabeza, brazos, manos, piernas y pies.

Tabla 8. Factores de adherencia a la piel según actividad para adultos (hombres y mujeres).

Actividad	AF para Adultos [mg/cm^2]
Labores de jardinería residencial o urbano	0,07
Guardabosques	0,02
Paisajistas	0,04
Agricultores o actividades agrícolas	0,4
Trabajadores de servicios industrial y comercial	0,6

La tabla AF para adultos está basada en estudios a la exposición de cabeza, brazos, manos y piernas. Los factores de adherencia a la piel que se muestran en la tabla, son similares en escenarios residenciales, comerciales e industriales (USEPA, 2004).

Los AF generales que se acomodan al estudio son:

Tabla 9. Factores de adherencia a la piel general.

	[mg/cm^2]
$AF_{Adulto\ Hombre}$	0,07
$AF_{Adulto\ Mujer}$	0,07
$AF_{Niño(as)}$	0,2

Por otra parte en el informe “Exposure Factors Handbook 2011 edition” de la USEPA los entrega Factores de adherencia a la piel (AF) que están divididos por áreas del cuerpo y actividad que desempeña. El tejido se comporta de diferente manera dependiendo de la zona del cuerpo, al igual que la actividad que se desempeña. La USEPA recomienda los siguientes valores de Factores de adherencia a la piel (AF) para diferentes actividades que se desarrollan.

Tabla 10. Factores de adherencia recomendados para partes del cuerpo para actividades con suelo.

	AF_{cabeza} [mg/cm ²]	AF_{brazos} [mg/cm ²]	AF_{manos} [mg/cm ²]	$AF_{piernas}$ [mg/cm ²]	AF_{pies} [mg/cm ²]
Hombre Adulto	0,0240	0,0379	0,1595	0,0189	0,1393 ²
Mujer Adulta	0,0240	0,0379	0,1595	0,0189	0,1393 ³
Niño(a)	0,054	0,046	0,17	0,051	0,20

La tabla anterior de “Factores de adherencia recomendados para partes del cuerpo” se basa en estudios de “actividades con el suelo”.

La forma en que se ingresaron los valores de SA y AF en la ecuación para el cálculo Dosis media diaria de absorción dérmica (ADI_{dermal}) se recomienda calcular el producto de ambos factores.

$$SA \cdot AF_{Grupo} = \sum_{i=0}^N SA_i \cdot AF_i \quad (7)$$

² El valor AF Pies hombre adulto no es considerado en los cálculos, dado que el área expuesta de los pies no es considerado para los adultos.

³ El valor AF Pies mujer adulto no es considerado en los cálculos, dado que el área expuesta de los pies no es considerado para los adultos.

- Fracción de absorción dermal (ABS)

Los datos de Fracción de absorción dermal fueron obtenidos por Environmental Protection Agency en su informe de Risk assessment Guidance for supergund. Volumen I: Human health evaluation manual (Parte E, Supplemental guidance for Dermal Risk Assessment). Que recomienda lo siguiente:

Tabla 11. Fracción de absorción dermal (ABS) de los elementos.

Compuesto	Símbolo	ABS	Fuente
Arsénico	As	0,03	(USEPA, 2016)
Bario	Ba	0,001	(USEPA, 2016)
Cobalto	Co	0,001	(USEPA, 2016)
Cobre	Cu	0,001	(USEPA, 2016)
Cromo	Cr	0,001	(USEPA, 2016)
Litio	Li	0,001	(USEPA, 2016)
Manganeso	Mn	0,001	(USEPA, 2016)
Mercurio	Hg	0,001	(USEPA, 2016)
Níquel	Ni	0,001	(USEPA, 2016)
Plomo	Pb	0,001	(USEPA, 2016)
Vanadio	V	0,001	(USEPA, 2016)
Zinc	Zn	0,001	(USEPA, 2016)

- Peso corporal (BW)

Ver *Tabla 2*. Para encontrar los valores.

- Tiempo de exposición (AT)

Ver *Tabla 3*. Para encontrar los valores.

2.4.3 Inhalación de partículas procedentes del suelo

La vía de toxicidad por inhalación de partículas en suspensión, está descrito por elementos o partículas que se encuentran en suspensión. El polvo que se encuentra en la atmosfera es generado tanto de forma natural como por acción de labores humanas. Esto afecta la calidad del aire y la salud de las personas que se encuentran en los focos de suspensión. Teniendo efectos a corto y largo plazo.

La dosis de inhalación de partículas de suelo se puede determinan mediante la siguiente formula.

$$ADI_{inh} = C_{soil} \times \frac{InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (8)$$

ADI_{inh}	Dosis media diaria de inhalación	[mg/kg-día]
C_{soil}	Concentración del contaminante en el suelo	[mg/kg]
InhR	Tasa de inhalación de suelo	[m3/día]
EF	Frecuencia de exposición	[día/año]
ED	Duración de la exposición	[año]
BW	Peso corporal	[kg]
AT	Tempo de exposition	[día]
PEF	Factor de emisión	[m3/kg]

- Tasa de inhalación de suelo (InhR)

La tasa de inhalación de suelo se obtuvo mediante el uso de tablas descritas por el USEPA (USEPA, 2011) y que contienen variados rangos de edad para hombres y mujeres combinados, y no se hace distinción de sexos. En el caso de este estudio se consideraron los siguientes valores:

Tabla 12. Tasas de inhalación de suelo.

	Tasa de inhalación de suelo (InhR) [$m^3/día$]
Niños(as)	10
Adultos (Hombres y mujeres)	15

La diferencia en la tasa de inhalación entre niños(as) y adultos se puede explicar por la capacidad volumétrica pulmonar que es mayor obviamente en los adultos que en los niños(as)

- Frecuencia de exposición (EF)

Al igual que en la ingesta de suelo la frecuencia de exposición por inhalación de suelo, se considerara un modo de contacto residencial que establecerá 350 días al año suponiendo que las personas estén fuera del dominio territorial en estudio solamente 15 días en el año.

- Factor de emisión (PEF)

El factor de emisión PEF, por sus siglas en inglés Particle Emission Factor, es una estimación basada en estudios que indica la cantidad de material suspendido en kilogramos en un metro cubico.

Tabla 13. Factores de emisión (PEF).

Compuesto	Símbolo	PEF [m^3/kg]	Fuente
Arsénico ⁴	As	$1,4 \times 10^9$	(USEPA, 2016)
Bario	Ba	$1,4 \times 10^9$	(USEPA, 2016)
Cobalto	Co	$1,4 \times 10^9$	(USEPA, 2016)
Cobre	Cu	$1,4 \times 10^9$	(USEPA, 2016)
Cromo ⁵	Cr	$1,4 \times 10^9$	(USEPA, 2016)
Litio	Li	$1,4 \times 10^9$	(USEPA, 2016)
Manganeso ⁶	Mn	$1,4 \times 10^9$	(USEPA, 2016)
Mercurio ⁷	Hg	$1,4 \times 10^9$	(USEPA, 2016)
Níquel ⁸	Ni	$1,4 \times 10^9$	(USEPA, 2016)
Plomo	Pb	$1,4 \times 10^9$	(USEPA, 2016)
Vanadio ⁹	V	$1,4 \times 10^9$	(USEPA, 2016)
Zinc ¹⁰	Zn	$1,4 \times 10^9$	(USEPA, 2016)

- Peso corporal (BW)

Ver *Tabla 2*. Para encontrar los valores.

- Tiempo de exposición (AT)

Ver *Tabla 3*. Para encontrar los valores.

⁴ Arsénico, Inorgánico

⁵ Cromo (vi)

⁶ Manganeso (non-diet)

⁷ Mercuric Chloride (and other mercury salts)

⁸ Níquel sales solubles

⁹ Vanadio y compuestos

¹⁰ Zinc y compuestos

2.5 Teoría y método en la evaluación de riesgo para la salud

2.5.1 Caracterización del riesgo no cancerígeno

El riesgo no cancerígeno para la salud humana se determina con la ayuda de el cociente de peligrosidad HQ (Hazard Quotient por sus siglas en inglés). Este cociente relaciona la Dosis media diaria (ADI) de las vías de exposición elegidas y la dosis de referencia (RfD) respectiva. Por otra parte la sumatoria de HQ se denomina HI (Hazard Index por sus siglas en inglés) se denomina índice de peligrosidad

$$HI = \sum HQ_i = \sum \frac{ADI_i}{RfD_i} \quad (9)$$

HI	Índice de peligrosidad	
HQ	Cociente de peligrosidad	
ADI	Dosis media diaria	[mg/kg-día]
RfD	Dosis de referencia	[mg/kg-día]

El coeficiente de peligrosidad HQ no es un riesgo absoluto sino un potencial de riesgo. Esto hace que la estimación cuantitativa señale los niveles de exposición por encima de los cuales se pueden encontrar efectos adversos probables, esto quiere decir que a mayor valor del cociente HQ mayor es el riesgo no cancerígeno.

La teoría se basa en que en el supuesto de que existe un nivel seguro de exposición para la salud humana y por lo tanto, por debajo de este nivel seguro de exposición no es probable que se produzcan efectos negativos a las personas.

Si los valores del cociente de peligrosidad $HQ > 1$ se consideran no aceptables ya que probablemente causen efectos adversos a la salud humana. Por lo tanto el cociente de peligrosidad HQ para cada una de las vías de exposición consideradas tienen que ser < 1 para que no pongan consecuencias negativas en la salud de las personas.

Luego de calcular el riesgo para cada una de las sustancias (elementos y/o metales pesados) en cada vía de exposición (en el caso de este estudio ingestión, dermal e inhalación), se calcula el riesgo acumulado, que se obtiene sumando los riesgos. Por último se calcula el riesgo total, que implica sumar el riesgo acumulado por las vías de exposición.

Total exposición del índice de peligrosidad

$$TEHI = \sum HI = \sum_{j=1}^N \frac{ADI_{ing}^j}{RfD_{ing}^j} + \sum_{j=1}^N \frac{ADI_{dermal}^j}{RfD_{dermal}^j} + \sum_{j=1}^N \frac{ADI_{inh}^j}{RfD_{inh}^j} \quad (10)$$

TEHI	Total exposición del índice de peligrosidad	
HI	Índice de peligrosidad	
ADI	Dosis media diaria	[mg/kg-día]
RfD	Dosis de referencia	[mg/kg-día]
i	Numero de vías de exposición	
N	Numero de contaminantes	

Dosis de referencia (RfD)

La dosis de referencia se define como niveles de seguridad a lo largo de la vida, es decir, se trata de un nivel de exposición diario de una población para el que no existe un riesgo apreciable de efectos negativos a la persona durante toda la vida.

Este valor se obtiene al dividir NOAEL o LOAEL por un factor de seguridad. LOAEL (Lowest observed adverse effect leve) es el nivel posológico más bajo en que se observan efectos adversos asociados a la exposición al agente químico. NOAEL (no observed adverse effect

level) es el nivel posológico más bajo en el que no se observan efectos adversos asociados a la exposición al agente químico.

- Dosis de referencia para ingestión (RfD_{ing})

En la USEPA se puede encontrar la mayoría de los valores de Dosis de referencia para ingestión (RfD_{ing}) y los que no se encontraron en ese documento, se obtuvieron de estudios por (Ferreira-Baptista & De Miguel, 2005), que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 14. Dosis de referencia para ingestión (RfD_{ing}).

Compuesto	Símbolo	RfD_{ing}	Fuente
Arsénico ¹¹	As	$3,0 \times 10^{-4}$	(USEPA, 2016)
Bario	Ba	$2,0 \times 10^{-1}$	(USEPA, 2016)
Cobalto	Co	$2,0 \times 10^{-2}$	(Ferreira-Baptista & De Miguel, 2005)
Cobre	Cu	$4,0 \times 10^{-2}$	(USEPA, 2016)
Cromo ¹²	Cr	$3,0 \times 10^{-3}$	(USEPA, 2016)
Litio	Li	$2,0 \times 10^{-3}$	(USEPA, 2016)
Manganeso ¹³	Mn	$2,4 \times 10^{-2}$	(USEPA, 2016)
Mercurio ¹⁴	Hg	$3,0 \times 10^{-4}$	(USEPA, 2016)
Níquel ¹⁵	Ni	$2,0 \times 10^{-2}$	(USEPA, 2016)
Plomo	Pb	$3,5 \times 10^{-3}$	(Ferreira-Baptista & De Miguel, 2005)
Vanadio ¹⁶	V	$5,0 \times 10^{-3}$	(USEPA, 2016)
Zinc ¹⁷	Zn	$3,0 \times 10^{-1}$	(USEPA, 2016)

¹¹ Arsénico, Inorgánico

¹² Cromo (vi)

¹³ Manganeso (non-diet)

¹⁴ Mercuric Chloride (and other mercury salts)

¹⁵ Níquel sales solubles

¹⁶ Vanadio y compuestos

¹⁷ Zinc y compuestos

- Dosis de referencia para Absorción dérmica (RfD_{derm})

A partir de la Dosis de referencia para ingestión (RfD_{ing}) y Fracción del contaminante absorbido en el tracto gastrointestinal (ABS_{GL}) se puede obtener la Dosis de referencia para Absorción dérmica ajustado (RfD_{derm}) mediante la siguiente ecuación:

$$RfD_{derm} = RfD_{ing} \times ABS_{GL} \quad (11)$$

RfD_{derm}	Dosis de referencia por absorción dermal	$[mg/kg - día]^{-1}$
RfD_{ing}	Dosis de referencia por ingestión	$[mg/kg - día]^{-1}$
ABS_{GL}	Fracción del contaminante absorbido en el tracto gastrointestinal	[-]

En Risk Assessment Guidance for Superfund (volumen I, 2004, pag 4-4) se ocupa la nomenclatura de RfD_{ABS} por RfD_{derm} que se ocupa en este trabajo para evitar confusiones en los términos de los factores. Los valores de Fracción del contaminante absorbido en el tracto gastrointestinal (ABS_{GL}) fueron obtenidos de la misma guía donde se cita la ecuación anterior.

La siguiente tabla resume los valores de los factores que involucran la ecuación de la Dosis de referencia para Absorción dérmica ajustado (RfD_{derm}), tabulados de acuerdo a los elementos considerados.

Tabla 15. Dosis de referencia para absorción dérmica (RfD_{derm}).

Compuesto	Símbolo	RfD_{ing}	ABS_{GI}	RfD_{derm}
Arsénico ¹⁸	As	$3,0 \times 10^{-4}$	0,95	$2,8 \times 10^{-4}$
Bario	Ba	$2,0 \times 10^{-1}$	0,07	$1,4 \times 10^{-2}$
Cobalto	Co	$3,0 \times 10^{-4}$	-	-
Cobre	Cu	$4,0 \times 10^{-2}$	-	-
Cromo ¹⁹	Cr	$3,0 \times 10^{-3}$	0,025	$7,5 \times 10^{-5}$
Litio	Li	$2,0 \times 10^{-3}$	-	-
Manganeso ²⁰	Mn	$2,4 \times 10^{-2}$	0,04	$9,6 \times 10^{-4}$
Mercurio ²¹	Hg	$3,0 \times 10^{-4}$	0,07	$2,1 \times 10^{-5}$
Níquel ²²	Ni	$2,0 \times 10^{-2}$	0,04	$8,0 \times 10^{-4}$
Plomo	Pb	$3,5 \times 10^{-3}$	-	-
Vanadio ²³	V	$5,0 \times 10^{-3}$	0,026	$1,3 \times 10^{-4}$
Zinc ²⁴	Zn	$3,0 \times 10^{-1}$	-	-

Los valores de Fracción del contaminante absorbido en el tracto gastrointestinal (ABS_{GL}) que no se encuentran, no permitieron calcular los valores de Dosis de referencia para Absorción dérmica ajustado (RfD_{derm}), por lo que no se trabajan con ellos.

¹⁸ Arsénico, Inorgánico

¹⁹ Cromo (vi)

²⁰ Manganeso (non-diet)

²¹ Mercuric Chloride (and other mercury salts)

²² Níquel sales solubles

²³ Vanadio y compuestos

²⁴ Zinc y compuestos

- Dosis de referencia para inhalación (RfD_{inh})

En USEPA se puede encontrar la mayoría de los valores de Dosis de referencia para inhalación (RfD_{inh}), que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 16. Dosis de referencia para inhalación (RfD_{inh})

Compuesto	Símbolo	RfD_{inh}	Fuente
Arsénico ²⁵	As	$1,5 \times 10^{-5}$	(USEPA, 2016)
Bario	Ba	$5,0 \times 10^{-4}$	(USEPA, 2016)
Cobalto	Co	$6,0 \times 10^{-6}$	(USEPA, 2016)
Cobre	Cu	-	
Cromo ²⁶	Cr	$1,0 \times 10^{-4}$	(USEPA, 2016)
Litio	Li	-	
Manganeso ²⁷	Mn	$5,0 \times 10^{-5}$	(USEPA, 2016)
Mercurio ²⁸	Hg	$3,0 \times 10^{-4}$	(USEPA, 2016)
Níquel ²⁹	Ni	$2,0 \times 10^{-2}$	(USEPA, 2016)
Plomo	Pb	-	
Vanadio ³⁰	V	$1,0 \times 10^{-4}$	(USEPA, 2016)
Zinc ³¹	Zn	-	

Para los elementos que no se encontraron valores de dosis de referencia, no se pueden determinar el HQ evidentemente.

²⁵ Arsénico, Inorgánico

²⁶ Cromo (vi)

²⁷ Manganeso (non-diet)

²⁸ Mercuric Chloride (and other mercury salts)

²⁹ Níquel sales solubles

³⁰ Vanadio y compuestos

³¹ Zinc y compuestos

2.5.2 Caracterización del riesgo cancerígeno

El riesgo cancerígeno se expresa como un incremento de la probabilidad de aparición de cáncer durante toda la vida como consecuencia de la exposición conjunta a distintos contaminantes o debido a una exposición adicional a elementos peligrosos.

Para obtener los riesgos cancerígenos se utilizan como valores referencia los Factores de Pendiente SF (por sus siglas en inglés Slope Factor) y la Dosis media diaria ADI.

El Factor de pendiente (SF) para la ingestión y absorción dérmica se obtienen directamente desde los manuales de la USEPA. Mientras que para la inhalación de partículas de suelo se ocupa la Unidad de Riesgo (URF) que indica lo mismo pero se aplica para aire y se expresa en unidades de concentración de la sustancia en el ambiente y no en exposición.

El índice de riesgo cancerígeno (CRI) para un análisis específico, se expresa como:

$$CRI = \sum (ADI_i \times SF_i) \quad (12)$$

CRI	Índice de riesgo cancerígeno	
ADI	Dosis media diaria	[mg/kg-día]
SF	Factor de Pendiente	[mg/kg-día]
i	Numero de vías de exposición	

El limite tolerable del incremento de riesgo cancerígeno para la salud humana es de $1,0 \times 10^{-6}$, es decir, que la probabilidad de desarrollar un cáncer es de 1 en 1.000.000 de personas. Pero muchas agencias que trabajan con el manejo de riesgo por contaminación ambiental consideran el rango $1,0 \times 10^{-6} - 1,0 \times 10^{-4}$ como aceptable y la USEPA lo recomienda para sitios contaminados con desechos peligrosos. La siguiente tabla resume los límites de rango dichos:

Tabla 17. Reglas de decisión límites tolerables riesgo cancerígeno.

Menores a	$1,0 \times 10^{-6}$	Valores aceptables (Muy seguro)
Entre	$1,0 \times 10^{-6} - 1,0 \times 10^{-4}$	Valores aceptables
Si superan	$1,0 \times 10^{-4}$	Valores inaceptables

El decir “aceptable”, se está diciendo que no se consideran efectos negativos para la salud humana. Mientras que “inaceptable” existen riesgos a la salud humana.

La forma general y que considera la exposición total para vías consideradas, se expresa como:

$$TCRI = \sum_{j=1}^N (ADI_{ing}^j \times SF_{ing}^j) + \sum_{j=1}^N (ADI_{dermal}^j \times SF_{dermal}^j) + \sum_{j=1}^N (ADI_{inh}^j \times SF_{inh}^j) \quad (13)$$

TCRI	Total exposición del índice de peligrosidad cancerígeno	
ADI	Dosis media diaria	[mg/kg-día]
SF	Factor de Pendiente	[mg/kg-día]
i	Numero de vías de exposición	
N	Numero de contaminantes	

Los elementos considerados como cancerígenos en el estudio son: Arsénico (As), Cromo (Cr), Níquel (Ni), Plomo (Pb). Para ellos, se tienen los siguientes factores de pendiente

- Factor de pendiente por ingestión (SF_{inh})

Los factores de pendiente por ingestión (SF_{inh}) que registra la USEPA para los elementos cancerígenos que trabajamos, son los siguientes:

Tabla 18. Factores de pendiente por ingestión (RfD_{inh}).

Compuesto	Símbolo	SF_{ing}	Fuente
Arsénico ³²	As	$1,0 \times 10^0$	(USEPA, 2016)
Cromo ³³	Cr	$5,0 \times 10^{-1}$	(USEPA, 2016)
Níquel ³⁴	Ni	-	
Plomo	Pb	-	

- Factor de pendiente por absorción dermal (SF_{ing}).

A partir del Factor de pendiente por ingestión (SF_{ing}) y la Fracción del contaminante absorbido en el tracto gastrointestinal (ABS_{GL}) se puede obtener el Factor de pendiente por absorción dermal ajustado (SF_{ing}), mediante la siguiente ecuación:

$$SF_{derm} = \frac{SF_{ing}}{ABS_{GL}} \quad (134)$$

SF_{derm}	Factor de pendiente por absorción dermal	$[mg/kg - día]^{-1}$
SF_{ing}	Factor de Pendiente por ingestión	$[mg/kg - día]^{-1}$
ABS_{GL}	Fracción del contaminante absorbido en el tracto gastrointestinal	[-]

En Risk Assessment Guidance for Superfund (volumen I, 2004, pag 4-3) se ocupa la nomenclatura de SF_{ABS} por SF_{derm} y SF_o por SF_{ing} que se ocupan en este trabajo para evitar confusiones en los términos. Los valores de Factor de pendiente por absorción dermal (SF_{ing}) calculados son los siguientes.

³² Arsénico, Inorgánico

³³ Cromo (vi)

³⁴ Níquel sales solubles

Tabla 19. Factor de pendiente por absorción dermal ajustado (SF_{derm}).

Compuesto	Símbolo	SF_{ing}	ABS_{GL}	SF_{derm}
Arsénico ³⁵	As	$1,0 \times 10^0$	0,95	$1,0 \times 10^0$
Cromo ³⁶	Cr	$5,0 \times 10^{-1}$	0,025	$2,0 \times 10^1$
Níquel ³⁷	Ni	-	-	-
Plomo	Pb	-	-	-

- Factor de pendiente por inhalación (SF_{inh}).

El Factor de pendiente por inhalación (SF_{inh}) se puede obtener mediante el Factor de unidad de riesgo por inhalación (IUR) que se puede encontrar

$$SF_{inh} = \left(\frac{IUR}{Inh R} \right) \times BW \times CF \quad (15)$$

SF	Factor de pendiente por inhalación	$[mg/kg - \text{día}]^{-1}$
IUR	Factor de unidad de riesgo por inhalación	$[\mu g/m^3]^{-1}$
InhR	Tasa de inhalación de suelo	$[m^3/\text{día}]$
BW	Peso corporal	[kg]
CF	Factor de conversión	[kg/mg]

La formula anterior tiene un Factor de conversión (CF) que es $10^3 [\mu g/mg]$. Factor necesario para que se respeten las unidades. De esta manera la formula anterior queda de la siguiente forma:

$$SF_{inh} = \left(\frac{IUR}{Inh R} \right) \times BW \times 10^3 \quad (16)$$

Los valores de Factor de unidad de riesgo por inhalación (IUR) que entrega la USEPA son:

³⁵ Arsénico, Inorgánico

³⁶ Cromo (vi)

³⁷ Níquel sales solubles

Tabla 20. Factor de unidad de riesgo por inhalación (IUR).

Compuesto	Símbolo	IUR [$\mu g/m^3$] ⁻¹	Fuente
Arsénico ³⁸	As	$4,3 \times 10^{-3}$	(USEPA, 2016)
Cromo ³⁹	Cr	$8,4 \times 10^{-2}$	(USEPA, 2016)
Níquel ⁴⁰	Ni	$2,6 \times 10^{-4}$	(USEPA, 2016)
Plomo	Pb	$1,2 \times 10^{-5}$	(USEPA, 2016)*

Luego el Peso corporal (BW) lo podemos obtener de la *Tabla 2*. Y la Tasa de inhalación de suelo (InhR) la podemos ver en la *Tabla 12* según corresponda.

Con todos los factores de la ecuación anterior podemos calcular el Factor de pendiente por inhalación (SF_{inh}) para los tres grupos analizados. Como por ejemplo para el arsénico (As) tenemos:

Arsénico Niño(a) (BW=20 y InhR=10)

$$SF_{inh} = \left(\frac{4,3 \times 10^{-3}}{10} \right) \times 20 \times 10^3 = 8,60 \times 10^0$$

Arsénico Hombre adulto (BW=75 y InhR=15)

$$SF_{inh} = \left(\frac{4,3 \times 10^{-3}}{15} \right) \times 75 \times 10^3 = 2,15 \times 10^1$$

Arsénico Mujer adulta (BW=65 y InhR=15)

$$SF_{inh} = \left(\frac{4,3 \times 10^{-3}}{15} \right) \times 65 \times 10^3 = 1,86 \times 10^1$$

Así mismo para los demás elementos, nos queda la siguiente tabla:

³⁸ Arsénico, Inorgánico

³⁹ Cromo (vi)

⁴⁰ Níquel sales solubles

Tabla 21. Factor de pendiente por inhalación (SF_{inh}).

Compuesto	Símbolo	SF_{inh} Niños(as)	SF_{inh} Hombre	SF_{inh} Mujer
Arsénico ⁴¹	As	$8,6 \times 10^0$	$2,2 \times 10^1$	$1,8 \times 10^1$
Cromo ⁴²	Cr	$1,6 \times 10^2$	$4,2 \times 10^2$	$3,6 \times 10^2$
Níquel ⁴³	Ni	$5,2 \times 10^{-1}$	$1,3 \times 10^0$	$1,1 \times 10^0$
Plomo	Pb	$2,4 \times 10^{-2}$	$6,0 \times 10^{-2}$	$5,2 \times 10^{-2}$

Para simplificar podemos ocupar el (SF_{inh}) más desfavorable

⁴¹ Arsénico, Inorgánico

⁴² Cromo (vi)

⁴³ Níquel sales solubles

3 Resultados

Ocupando las herramientas que nos entrega la estadística univariada, podemos ver el comportamiento general de las concentraciones de metales pesados de las 140 muestras de los suelos de Talcahuano, pudiendo diferenciar y comparar cantidades, percentiles, valores máximos y mínimos. Como lo muestra la tabla siguiente:

Tabla 22. Resumen estadístico de las concentraciones de metales pesados en los suelos de Talcahuano en [mg/kg] con un n=140

	Min	P10	P25	P50	Media	X	P75	P90	Max	SD	CV(%)
As	1,0	1,0	1,0	2,7	3,4	2,5	5,0	6,8	15,0	2,7	78,5
Ba	321,1	379,5	408,0	485,1	475,8	470,0	544,5	573,4	630,7	73,8	15,5
Co	70,3	79,2	82,3	85,8	85,9	85,7	89,7	93,4	95,6	5,3	6,2
Cu	4,6	11,4	17,1	23,4	27,6	23,5	32,2	47,7	113,3	17,2	62,2
Cr	67,5	68,7	101,3	133,8	145,4	133,4	167,1	227,5	654,5	70,1	48,2
Li	1,5	4,1	4,8	7,1	8,0	7,0	9,6	13,4	41,2	5,2	64,5
Mn	83,3	175,8	263,2	332,9	429,7	350,9	436,9	711,4	4341	427,8	99,6
Hg	1,3	1,3	1,3	1,3	1,9	1,7	2,2	3,3	8,3	1,0	53,2
Ni	26,5	34,3	45,0	52,6	58,6	55,4	71,1	89,7	136,6	20,7	35,3
Pb	0,3	2,8	6,9	12,5	19,8	10,6	21,0	43,4	200,6	26,9	135,6
V	0,2	1,9	7,0	12,3	18,6	9,0	17,5	37,0	280,6	29,2	156,9
Zn	20,8	31,8	44,5	60,1	91,7	70,1	113,1	206,0	347,4	76,9	83,8

Donde los términos abreviados en la tabla corresponden a:

<i>Min</i>	Valor mínimo
<i>P10, P25, P50</i>	Percentil 10, Percentil 25, Percentil 50
<i>Media</i>	Valor medio
<i>X</i>	Media geométrica
<i>P75, P90</i>	Percentil 75, Percentil 90
<i>Max</i>	Valor máximo
<i>SD</i>	Desviación estándar
<i>CV(%)</i>	Coefficiente de variación

3.1 Evaluación del riesgo para la salud

La Evaluación del riesgo para la salud humana por metales pesados en suelos superficiales de la ciudad de Talcahuano, Chile. Se llevará a cabo Implementando metodologías descritas por United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2011).

Se caracterizarán los efectos potencialmente adversos, derivados de la exposición de 12 elementos y se describirán los posibles efectos negativos en base a evaluaciones de resultados de proyectos de investigación.

De los resultados se busca encontrar el tipo y magnitud de los efectos en la salud bajo determinados parámetros y condiciones de exposición, además de evaluar el número y características de los potenciales afectados a diversos niveles y duraciones de exposición.

3.1.1 Estimación de factores previos para la Evaluación del riesgo de la salud

En la evaluación del riesgo cancerígeno y no cancerígeno se necesita determinar algunos factores que se ocupan en la aplicación de las ecuaciones que determinan las Dosis media diaria (ADI) para las vías de exposición y que luego dan origen a los resultados de los riesgos cancerígeno y no cancerígeno. Estos son:

- Área superficial corporal expuesta (SA)

Aplicando la ecuación (5) y la *Tabla 4*, el Área superficial corporal expuesta para Hombres adultos es:

$$SA_{Adulto\ Hombre} = SA_{cabeza} + SA_{brazos} + SA_{manos} + SA_{piernas}$$

$$SA_{Adulto\ Hombre} = 1360 + 3140 + 1070 + 6830$$

$$SA_{Adulto\ Hombre} = 12400 [cm^2]$$

Aplicando la ecuación (5) y la *Tabla 5*, el Área superficial corporal expuesta para Mujeres adultas es:

$$SA_{Adulto\ Mujer} = SA_{cabeza} + SA_{brazos} + SA_{manos} + SA_{piernas}$$

$$SA_{Adulto\ Mujer} = 1140 + 2370 + 890 + 5980$$

$$SA_{Adulto\ Mujer} = 10380 [cm^2]$$

Aplicando la ecuación 6 y *Tabla 6*, el Área superficial corporal expuesta para Niños(as) es

$$SA_{Niño(as)} = SA_{cabeza} + SA_{brazos} + SA_{manos} + SA_{piernas} + SA_{pies}$$

$$SA_{Niño(as)} = 610 + 1060 + 370 + 1950 + 490 = 4480 [cm^2]$$

Para los 3 grupos se tiene que:

Tabla 23. Área superficial corporal expuesta para los tres grupos.

Área superficial corporal expuesta (SA)	[cm ²]
$SA_{Adulto\ Hombre}$	12400
$SA_{Adulto\ Mujer}$	10380
$SA_{Niño(as)}$	4480

- Factores de adherencia (AF) y Área superficial corporal expuesta (SA)

La forma en que se recomienda ingresaron los valores de SA y AF en la ecuación para el cálculo Dosis media diaria de absorción dérmica (ADI_{dermat}) es calcular el producto de ambos factores. Basados en la ecuación (7). AF sacados de la *Tabla 10* y SA extraídos de las *tablas 4,5 y 6*.

$$SA \cdot AF_{Grupo} = \sum_{i=0}^N SA_i \cdot AF_i$$

$$SA \cdot AF_{Hombre Adulto} = SA \cdot AF_{cabeza} + SA \cdot AF_{brazos} + SA \cdot AF_{manos} + SA \cdot AF_{piernas}$$

$$SA \cdot AF_{Hombre Adulto} = 1360 \cdot 0,0240 + 3140 \cdot 0,0379 + 1070 \cdot 0,1595 + 6830 \cdot 0,0189$$

$$SA \cdot AF_{Hombre Adulto} = 451,2 [mg]$$

$$SA \cdot AF_{Mujer Adulto} = SA \cdot AF_{cabeza} + SA \cdot AF_{brazos} + SA \cdot AF_{manos} + SA \cdot AF_{piernas}$$

$$SA \cdot AF_{Mujer Adulto} = 1140 \cdot 0,0240 + 2370 \cdot 0,0379 + 890 \cdot 0,1595 + 5980 \cdot 0,0189$$

$$SA \cdot AF_{Mujer Adulto} = 372,1 [mg]$$

$$SA \cdot AF_{Niño(a)} = SA \cdot AF_{cabeza} + SA \cdot AF_{brazos} + SA \cdot AF_{manos} + SA \cdot AF_{piernas} + SA \cdot AF_{pies}$$

$$SA \cdot AF_{Niño(a)} = 610 \cdot 0,054 + 1060 \cdot 0,046 + 370 \cdot 0,17 + 1950 \cdot 0,051 + 490 \cdot 0,20$$

$$SA \cdot AF_{Niño(a)} = 342,05 [mg]$$

Resumiendo el producto de los valores de SA y AF quedaron de la siguiente forma

Tabla 24. Producto del Área de superficie corporal expuesta (SA) y Factor de adherencia a la piel (AF) para los tres grupos estudiados.

	$SA \cdot AF [mg]$
Hombre Adulto	451,2
Mujer Adulta	372,1
Niño(a)	342,05

3.1.2 Riesgo no cancerígeno

El coeficiente de peligrosidad se analizó para las 3 vías de exposición y para todos los elementos de y/o metales pesados. Para los elementos que no tienen RfD no se pudo obtener el coeficiente de peligrosidad y se muestran como cuadrillas en blanco.

La dosis media diaria (IDA) promedio para cada vía de exposición se divide por la dosis de referencia (RfD) correspondiente, para producir un coeficiente de peligrosidad (HQ) que se muestran en las siguientes tres tablas.

- **Ingestión**

Para la ingestión de suelo tenemos que los coeficientes de peligrosidad calculados son los que muestra la siguiente tabla.

Tabla 25. Coeficiente de peligrosidad (HQ) por Ingestión para los 3 grupos.

Ingestión			
	Hombres	Mujeres	Niños(as)
As	7,2,E-03	8,3,E-03	8,1,E-02
Ba	1,5,E-03	1,8,E-03	1,7,E-02
Co	2,7,E-03	3,2,E-03	3,1,E-02
Cu	4,4,E-04	5,1,E-04	5,0,E-03
Cr	3,1,E-02	3,6,E-02	3,5,E-01
Li	2,6,E-03	3,0,E-03	2,9,E-02
Mn	1,1,E-02	1,3,E-02	1,3,E-01
Hg	4,1,E-03	4,7,E-03	4,6,E-02
Ni	1,9,E-03	2,2,E-03	2,1,E-02
Pb	3,6,E-03	4,2,E-03	4,1,E-02
V	2,4,E-03	2,7,E-03	2,7,E-02
Zn	2,0,E-04	2,3,E-04	2,2,E-03

La tabla anterior muestra que para los tres grupos estudiados no existiría un riesgo potencial de sufrir problemas tóxicos, derivado de la ingestión de suelo que contiene los diferentes elementos analizados. Esto es debido a todos los HQ son menores a 1.

De todas formas, aunque los coeficientes no sobrepasen el umbral de seguridad, sería conveniente monitorear el Cr dado que es el valor más aproximado al límite, seguido por Mn.

- **Absorción dérmica**

Para la absorción dérmica por contacto de suelo solo se han determinado los coeficientes de peligrosidad (HQ) para As, Ba, Cr, Mn, Hg, Ni y V dado que los demás elementos no se disponen valores de RfD_{derm} .

Tabla 26. Coeficiente de peligrosidad (HQ) por absorción dérmica para los 3 grupos.

Dérmica			
	Hombres	Mujeres	Niños(as)
As	2,1,E-03	2,0,E-03	5,9,E-03
Ba	2,0,E-04	1,9,E-04	5,6,E-04
Co	-	-	-
Cu	-	-	-
Cr	1,1,E-02	1,1,E-02	3,2,E-02
Li	-	-	-
Mn	2,6,E-03	2,5,E-03	7,3,E-03
Hg	5,2,E-04	5,0,E-04	1,5,E-03
Ni	4,2,E-04	4,0,E-04	1,2,E-03
Pb	-	-	-
V	8,3,E-04	7,9,E-04	2,4,E-03
Zn	-	-	-

En la tabla anterior se muestra que para los grupos estudiados no existiría un riesgo potencial de sufrir problemas tóxicos, derivado de la absorción dérmica por contacto de suelo que contiene los diferentes elementos analizados. Esto es debido a todos los coeficientes de peligrosidad (HQ) son menores a 1.

El elemento que muestra más próximo al límite permitido es el Cr.

- **Inhalación**

Para la inhalación de suelo solo se han determinado los coeficientes de peligrosidad (HQ) para As, Ba, Co, Cr, Mn, Hg, Ni y V dado que los demás elementos no se disponen valores de RfD_{inh} .

Tabla 27. Coeficiente de peligrosidad (HQ) por inhalación para los 3 grupos.

Inhalación			
	Hombres	Mujeres	Niños(as)
As	3,1,E-05	3,6,E-05	7,7,E-05
Ba	1,3,E-04	1,5,E-04	3,3,E-04
Co	2,0,E-03	2,3,E-03	4,9,E-03
Cu	-	-	-
Cr	2,0,E-04	2,3,E-04	5,0,E-04
Li	-	-	-
Mn	1,2,E-03	1,4,E-03	2,9,E-03
Hg	8,7,E-07	1,0,E-06	2,2,E-06
Ni	4,0,E-07	4,6,E-07	1,0,E-06
Pb	-	-	-
V	2,6,E-05	2,9,E-05	6,4,E-05
Zn	-	-	-

La tabla anterior muestra que para los tres grupos estudiados no existiría un riesgo potencial de sufrir problemas tóxicos, derivado de la inhalación de partículas de suelo que contiene los diferentes elementos analizados. Esto es debido a todos los HQ son menores a 1.

Los elementos que muestran más proximidad al límite es el Co, seguido del Mn.

Ahora bien, analizando todos los riesgos, tenemos que la exposición total del índice de peligrosidad es la que se muestra en la siguiente tabla

Tabla 28. Resumen de la Total exposición del índice de peligrosidad (TEHI)

	Hombres	Mujeres	Niños(as)
Ing	6,9,E-02	8,0,E-02	7,8,E-01
Derm	1,8,E-02	1,7,E-02	5,1,E-02
Inh	3,5,E-03	4,1,E-03	8,8,E-03
Total	9,0,E-02	1,0,E-01	8,4,E-01

En resumen, de las tablas anteriores se puede ver que todos los valores son menores a 1, por lo tanto es poco probable que los hombres adultos, mujeres adultas y niños(as) experimenten efectos adversos a la salud por las tres vías descritas.

De los tres grupos analizados, los niños(as) son los que están más expuestos, seguidos de Mujeres adultas y Hombres adultos.

La vía donde se está más expuesto es la ingestión, seguida de dermal y por último la inhalación.

3.1.3 Riesgo no cancerígeno para la concentración máxima encontrada de Arsénico, evaluando a niños(as)

Para el cálculo paso a paso que determina el riesgo cancerígeno y no cancerígeno, se tomó el elemento arsénico (As), y específicamente la muestra donde se encontró la concentración máxima de los datos. Correspondiendo a la Muestra 55 (código 355 A) con una concentración de $C_{soil} = 15,0$ [mg/kg].

La evaluación se centra en el grupo de Niños(as) y las vías de exposición ingesta, contacto dérmico e inhalación de suelo. Teniendo una Duración de la exposición $ED = 6$ [año] y una Frecuencia de exposición $EF = 350$ [día/año].

De los datos iniciales entregados, se obtuvo:

$C_{soil} = 15,0$ [mg/kg] ; Concentración del contaminante en la muestra de suelo. Ver *Tabla 22*

$ED = 6$ [año] ; Duración de la exposición.

$EF = 350$ [día/año] ; Frecuencia de exposición.

Y con la edad del grupo de interés “Niños(as)” podemos obtener el Peso corporal (BW), como se ve en la *Tabla 2*.

$BW = 20$ [kg] ; Peso corporal para el grupo considerado de Niños(as)

Se establece el Tiempo de exposición (AT), véase *Tabla 3*, que para el caso “no-cancerígeno” es:

$$AT \text{ [día]} = ED \cdot 365$$

Y con los datos iniciales entregados se tiene que $ED = 6$ [año] y AT queda:

$$AT = 6 \cdot 365 = 2190 \text{ [día]}$$

$$AT = 2190 \text{ [día]}$$

Se determina la dosis media diaria (ADI) para las 3 vías de exposición, esto es:

-Dosis media diaria de Ingestión de suelo (ver ecuación (1))

$$ADI_{ing} = C_{soil} \times \frac{IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times CF$$

$IngR = 150$ [mg/día] ; Tasa de ingesta de suelo para Niños(as). Ver *Tabla 1*.

$CF = 10^{-6}$ [kg/mg] ; Factor de conversión para que la ecuación sea coherente con las unidades.

Remplazando los valores en la ecuación de ADI_{ing} , se tiene:

$$ADI_{ing} = 15,0 \times \frac{150 \times 350 \times 6}{20 \times 2190} \times 10^{-6}$$

$$ADI_{ing} = 1,078 \times 10^{-4}$$

-Dosis media diaria de absorción dérmica por contacto con el suelo (ver ecuación (3))

$$ADI_{dermal} = C_{soil} \times \frac{SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times CF$$

Donde los factores que la componen, son:

$ABS_{As} = 0,03$; Fracción de absorción dermal del arsénico, obtenida de *Tabla 11*

$CF = 10^{-6}$ [kg/mg] ; Factor de conversión para que la ecuación sea coherente con las unidades.

El Área superficial corporal expuesta (SA) para Niños(as) está dada por la expresión de la ecuación (6):

$$SA_{Niño(as)} = SA_{cabeza} + SA_{brazos} + SA_{manos} + SA_{piernas} + SA_{pies}$$

Los valores y detalles se pueden encontrar en la *Tabla 6* y corresponden a:

$$SA_{cabeza} = 610 [cm^2]$$

$$SA_{brazos} = 1060 [cm^2]$$

$$SA_{manos} = 370 [cm^2]$$

$$SA_{piernas} = 1950 [cm^2]$$

$$SA_{pies} = 490 [cm^2]$$

Y sus respectivos Factores de adherencia a la piel (AF) por sector del cuerpo se encuentran detallados en la *Tabla 10* y son:

$$AF_{cabeza} = 0,054 [mg/cm^2]$$

$$AF_{brazos} = 0,046 [mg/cm^2]$$

$$AF_{manos} = 0,17 [mg/cm^2]$$

$$AF_{piernas} = 0,051 [mg/cm^2]$$

$$AF_{pies} = 0,20 [mg/cm^2]$$

La forma en que se ingresaron los valores de SA y AF en la ecuación para el cálculo Dosis media diaria de absorción dérmica (ADI_{dermal}) fue el producto de ambos factores (basados en la ecuación (7)), esto es:

$$SA \cdot AF_{Niño(a)} = SA \cdot AF_{cabeza} + SA \cdot AF_{brazos} + SA \cdot AF_{manos} + SA \cdot AF_{piernas} + SA \cdot AF_{pies}$$

$$SA \cdot AF_{Niño(a)} = 610 \cdot 0,054 + 1060 \cdot 0,046 + 370 \cdot 0,17 + 1950 \cdot 0,051 + 490 \cdot 0,20$$

$$SA \cdot AF_{Niño(a)} = 342,05 [mg]$$

Remplazando en la ecuación tenemos:

$$ADI_{dermal} = 15,0 \times \frac{(SA \times AF) \times 0,03 \times 350 \times 6}{20 \times 2190} \times 10^{-6}$$

$$ADI_{dermal} = 15,0 \times \frac{(342,05) \times 0,03 \times 350 \times 6}{20 \times 2190} \times 10^{-6}$$

$$ADI_{dermal} = 7,38 \times 10^{-6}$$

-Dosis media diaria de inhalación de partículas de suelo, (ecuación (8))

$$ADI_{inh} = C_{soil} \times \frac{InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT}$$

$InhR = 10 [m^3/día]$; Tasa de inflación de partículas de suelo para Niños(as). Ver *Tabla 12* para más información.

$PEF = 1,4 \times 10^9 [m^3/kg]$; Factor de emisión para el elemento arsénico. Ver *Tabla 13* para todos los elementos del estudio.

$$ADI_{inh} = 15,0 \times \frac{10 \times 350 \times 6}{1,4 \times 10^9 \times 20 \times 2190}$$

$$ADI_{inh} = 5,13 \times 10^{-9}$$

Ahora bien, para calcular el Índice de peligrosidad (HI), copiado de la ecuación (9), se tiene que:

$$HI = \sum HQ_i = \sum \frac{ADI_i}{RfD_i}$$

Donde el Cociente de peligrosidad (HQ), se obtiene con los RfD de cada una de las vías de exposición. Los valores de RfD para el Arsénico se pueden ver en las *Tablas 14,15 y 16* respectivamente. Estas son:

$$RfD_{ing} = 3,0 \times 10^{-4}$$

$$RfD_{derm} = 2,8 \times 10^{-4}$$

$$RfD_{inh} = 1,5 \times 10^{-5}$$

Remplazando en la ecuación obtenemos los Cociente de peligrosidad (HQ) para cada vía de exposición

$$HQ_{ing} = \frac{ADI_{ing}}{RfD_{ing}} = \frac{1,07 \times 10^{-4}}{3,0 \times 10^{-4}} = 3,59 \times 10^{-1} = 0,359$$

$$HQ_{derm} = \frac{ADI_{derm}}{RfD_{derm}} = \frac{7,38 \times 10^{-6}}{2,8 \times 10^{-4}} = 2,63 \times 10^{-2} = 0,0263$$

$$HQ_{inh} = \frac{ADI_{inh}}{RfD_{inh}} = \frac{5,13 \times 10^{-9}}{1,5 \times 10^{-5}} = 3,42 \times 10^{-4} = 0,00034$$

El Índice de peligrosidad (HI) para el Arsénico queda de la siguiente forma

$$HI = \sum HQ_i = \sum \frac{ADI_i}{RfD_i} = \frac{ADI_{ing}}{RfD_{ing}} + \frac{ADI_{derm}}{RfD_{derm}} + \frac{ADI_{inh}}{RfD_{inh}}$$

$$HI = \sum HQ_i = 3,59 \times 10^{-1} + 2,63 \times 10^{-2} + 3,42 \times 10^{-4}$$

$$HI = 3,86 \times 10^{-1} = 0,386$$

Dado que el HI es menor a 1 ($HI < 1$), se dice que no representa peligro o efectos adversos a la salud humana de los niños(as).

3.1.4 Riesgo cancerígeno

El riesgo cancerígeno se expresa como un incremento de la probabilidad de aparición de cáncer durante toda la vida como consecuencia de la exposición conjunta a distintos contaminantes o debido a una exposición adicional a elementos peligrosos.

Para obtener los riesgos cancerígenos de las tres tablas que se muestran a continuación, se utilizan los Factores de Pendiente SF (por sus siglas en inglés Slope Factor) y la dosis media diaria (IDA) promedio. Los elementos considerados cancerígenos son As, Cr, Ni, Pb.

El resultado por vía de exposición versus elemento.

Tabla 29. Índice de peligrosidad cancerígeno por ingestión para los 3 grupos.

Ingestión			
	Hombres	Mujeres	Niños(as)
As	7,4,E-07	8,6,E-07	2,1,E-06
Cr	1,6,E-05	1,8,E-05	4,5,E-05
Ni	-	-	-
Pb	-	-	-

Tabla 30 Índice de peligrosidad cancerígeno por contacto dermal para los 3 grupos.

Dérmica			
	Hombres	Mujeres	Niños(as)
As	2,0,E-07	1,9,E-07	1,4,E-07
Cr	5,7,E-06	5,5,E-06	4,1,E-06
Ni	-	-	-
Pb	-	-	-

Tabla 31. Índice de peligrosidad cancerígeno inhalación para los 3 grupos.

Inhalación			
	Hombres	Mujeres	Niños(as)
As	3,4,E-09	3,9,E-09	2,1,E-09
Cr	2,9,E-06	3,3,E-06	1,8,E-06
Ni	3,6,E-09	4,1,E-09	2,2,E-09
Pb	5,6,E-11	6,5,E-11	3,5,E-11

El grupo más desfavorable y más expuesto es el de los niños(as) en la vía de ingestión, pero se consideran valores tolerables. El cromo Cr es el elemento que corre con más riesgo para las 3 vías de exposición sin afectar la salud de las personas ya que se encuentra en límites tolerables.

Ahora bien, analizando todos los riesgos cancerígenos, tenemos que la exposición total del índice de peligrosidad cancerígeno es la que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 32. Total exposición del índice de peligrosidad cancerígeno (TCRI)

	Hombres	Mujeres	Niños(as)
Ing	1,7,E-05	1,9,E-05	4,7,E-05
Derm	6,0,E-06	5,7,E-06	4,2,E-06
Inh	2,9,E-06	3,3,E-06	1,8,E-06
Total	2,5,E-05	2,8,E-05	5,3,E-05

De los tres grupos analizados ninguno está en riesgo cancerígeno, ya que todos los valores entran dentro de los límites tolerables.

3.1.5 Riesgo cancerígeno para la concentración máxima encontrada de Arsénico, evaluando a niños(as)

Al igual que el caso de Riesgo cancerígeno para la concentración máxima encontrada de Arsénico, evaluando a niños(as), se tomó la Muestra 55 (código 355 A) con una concentración de $C_{soil} = 15,0$ [mg/kg] que representa el valor con la concentración máxima encontrada de Arsénico de las 140 muestras en estudio. Pero ahora para el caso del riesgo cancerígeno.

La evaluación considera el grupo de Niños(as) y las vías de exposición: ingesta, contacto dérmico e inhalación de suelo. Teniendo una Duración de la exposición $ED = 6$ [año] y una Frecuencia de exposición $EF = 350$ [día/año].

De los datos iniciales entregados, se tiene:

$C_{soil} = 15,0$ [mg/kg] ; Concentración del contaminante en la muestra de suelo. Basados de los resultados de la *Tabla 22*.

$ED = 6$ [año] ; Duración de la exposición.

$EF = 350$ [día/año] ; Frecuencia de exposición.

Y con la edad del grupo de interés “Niños(as)” podemos obtener el Peso corporal (BW), como se ve en la *Tabla 2*.

$BW = 20$ [kg] ; Peso corporal para el grupo considerado de Niños(as)

Se establece el Tiempo de exposición (AT), véase *Tabla 3*, que para el caso “cancerígeno” es 70 años por convención y transformado en días queda de la siguiente forma:

$$AT = 70 \cdot 365 = 25550 \text{ [día]}$$

$$AT = 25550 \text{ [día]}$$

Se determina la dosis media diaria (ADI) para las 3 vías de exposición, esto es:

-Dosis media diaria de Ingestión de suelo

$$ADI_{ing} = C_{soil} \times \frac{IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times CF$$

$IngR = 150$ [mg/día] ; Tasa de ingesta de suelo para Niños(as). Extraídos de la *Tabla 1*.

$CF = 10^{-6}$ [kg/mg] ; Factor de conversión para que la ecuación sea coherente con las unidades.

Remplazando los valores en la ecuación de ADI_{ing} , se tiene:

$$ADI_{ing} = 15,0 \times \frac{150 \times 350 \times 6}{20 \times 25550} \times 10^{-6}$$
$$ADI_{ing} = 9,25 \times 10^{-6}$$

-Dosis media diaria de absorción dérmica por contacto con el suelo

$$ADI_{dermal} = C_{soil} \times \frac{SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times CF$$

$ABS_{As} = 0,03$; Fracción de absorción dermal del arsénico, extraída de *Tabla 11*.

$CF = 10^{-6}$ [kg/mg] ; Factor de conversión para que la ecuación sea coherente con las unidades.

El Área superficial corporal expuesta (SA) para Niños(as) está dada por la expresión:

$$SA_{Niño(as)} = SA_{cabeza} + SA_{brazos} + SA_{manos} + SA_{piernas} + SA_{pies}$$

Los valores y detalles se pueden encontrar en la *Tabla 6* y corresponden a:

$$SA_{cabeza} = 610 [cm^2]$$

$$SA_{brazos} = 1060 [cm^2]$$

$$SA_{manos} = 370 [cm^2]$$

$$SA_{piernas} = 1950 [cm^2]$$

$$SA_{pies} = 490 [cm^2]$$

Y sus respectivos Factores de adherencia a la piel (AF) por sector del cuerpo se encuentran detallados en la *Tabla 10* y son:

$$AF_{cabeza} = 0,054 [mg/cm^2]$$

$$AF_{brazos} = 0,046 [mg/cm^2]$$

$$AF_{manos} = 0,17 [mg/cm^2]$$

$$AF_{piernas} = 0,051 [mg/cm^2]$$

$$AF_{pies} = 0,20 [mg/cm^2]$$

La forma en que se ingresaron los valores de SA y AF en la ecuación para el cálculo Dosis media diaria de absorción dérmica (ADI_{dermal}) fue el producto de ambos factores, esto es:

$$SA \cdot AF_{Niño(a)} = SA \cdot AF_{cabeza} + SA \cdot AF_{brazos} + SA \cdot AF_{manos} + SA \cdot AF_{piernas} + SA \cdot AF_{pies}$$

$$SA \cdot AF_{Niño(a)} = 610 \cdot 0,054 + 1060 \cdot 0,046 + 370 \cdot 0,17 + 1950 \cdot 0,051 + 490 \cdot 0,20$$

$$SA \cdot AF_{Niño(a)} = 342,05 [mg]$$

Remplazando en la ecuación tenemos:

$$ADI_{dermal} = 15,0 \times \frac{(SA \times AF) \times 0,03 \times 350 \times 6}{20 \times 25550} \times 10^{-6}$$

$$ADI_{dermal} = 15,0 \times \frac{(342,05) \times 0,03 \times 350 \times 6}{20 \times 25550} \times 10^{-6}$$

$$ADI_{dermal} = 6,32 \times 10^{-7}$$

-Dosis media diaria de inhalación de partículas de suelo

$$ADI_{inh} = C_{soil} \times \frac{InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT}$$

$InhR = 10 [m^3/día]$; Tasa de inflación de partículas de suelo para Niños(as). Ver *Tabla 12* para más información.

$PEF = 1,4 \times 10^9 [m^3/kg]$; Factor de emisión para el elemento arsénico. Ver *Tabla 13* para todos los elementos del estudio.

$$ADI_{inh} = 15,0 \times \frac{10 \times 350 \times 6}{1,4 \times 10^9 \times 20 \times 25550}$$

$$ADI_{inh} = 4,40 \times 10^{-10}$$

Ahora bien, para calcular el Índice de riesgo cancerígeno (CRI), basados en la ecuación (12), se tiene que:

$$CRI = \sum (ADI_i \times SF_i)$$

Donde Índice de riesgo cancerígeno (CRI), se obtiene con los Factores de pendiente (SF) de cada una de las vías de exposición. Los valores de SF para el Arsénico se pueden ver en las *Tablas 18,19 y 21* respectivamente. Estas son:

$$SF_{ing} = 1,0 \times 10^0$$

$$SF_{derm} = 1,0 \times 10^0$$

$$SF_{inh} = 2,2 \times 10^1$$

Remplazando en la ecuación obtenemos los Índices de riesgo cancerígenos para cada vía de exposición

$$CRI_{ing} = ADI_{ing} \times SF_{ing} = (9,25 \times 10^{-6}) \times (1,0 \times 10^0) = 9,25 \times 10^{-6}$$

$$CRI_{derm} = ADI_{derm} \times SF_{derm} = (6,32 \times 10^{-7}) \times (1,0 \times 10^0) = 6,32 \times 10^{-7}$$

$$CRI_{inh} = ADI_{inh} \times SF_{inh} = (4,40 \times 10^{-10}) \times (2,2 \times 10^1) = 9,68 \times 10^{-9}$$

El Índice de riesgo cancerígeno (CRI) del arsénico para el Grupo de interés de Niños(as) queda de la siguiente forma:

$$CRI = (ADI_{ing} \times SF_{ing}) + (ADI_{derm} \times SF_{derm}) + (ADI_{inh} \times SF_{inh})$$

$$CRI = (9,25 \times 10^{-6}) + (6,32 \times 10^{-7}) + (9,68 \times 10^{-9})$$

$$CRI = 0,0000099 = 9,89 \times 10^{-6}$$

Dado que el Índice de riesgo cancerígeno (CRI) está dentro de los valores tolerables descritos por la *Tabla 17*, $CRI < 1,0 \times 10^{-4}$, se dice que es un valor aceptable ya que no se consideran efectos negativos para la salud humana.

3.2 Resumen de tablas comparativas del riesgo cancerígeno y no cancerígeno de las muestras encontradas en los suelos de Talcahuano

El resumen de los resultados, tanto para el riesgo cancerígeno como no cancerígeno se pueden ver en las siguientes tablas comparativas:

Tabla 33. Tabla resumen de la Total exposición del índice de peligrosidad (TEHI) y de la Total exposición del índice de peligrosidad cancerígena (TCRI)

	TEHI			TCRI		
	Hombres	Mujeres	Niños	Hombres	Mujeres	Niños
Ing	6,9,E-02	8,0,E-02	7,8,E-01	1,7,E-05	1,9,E-05	4,7,E-05
Derm	1,8,E-02	1,7,E-02	5,1,E-02	6,0,E-06	5,7,E-06	4,2,E-06
Inh	3,5,E-03	4,1,E-03	8,8,E-03	2,9,E-06	3,3,E-06	1,8,E-06
Total	9,0,E-02	1,0,E-01	8,4,E-01	2,5,E-05	2,8,E-05	5,3,E-05

La tabla anterior muestra el riesgo cancerígeno y no cancerígeno, para cada vía de exposición estudiada (ingestión, dermal e inhalación) y para cada uno de los grupos de interés. Además de los riesgos a la exposición total cancerígeno y no cancerígeno, denominados como TCRI y TEHI respectivamente.

En el caso de la exposición total del índice de peligrosidad (TEHI), el grupo de los niños es el que más se aproxima al valor de 1, pero no lo supera, por lo que no representa un riesgo para la salud. Además se puede ver que la ingesta es la vía que los expone más a este grupo.

Para el caso el Índice total de peligrosidad cancerígeno (TCRI), los tres grupos observados superan el límite $1,0E-06$ pero están dentro del rango $1,0E-06$ y $1,0E-04$ el cual se recomienda en sitios contaminados con agentes peligrosos. En el caso del estudio el límite $1,0E-06$ se considera conservador.

Para ambos casos, la exposición total del índice de peligrosidad, se consideran seguros y no representan un riesgo para la salud de las personas.

Ahora bien, para ver más detalladamente los componentes de los valores totales de exposición y su comportamiento en percentiles se tiene la siguiente tabla, que también destaca los valores más altos.

Tabla 34. Tabla resumen de riesgo cancerígeno y no cancerígeno, para cada elemento.

	Hombres adultos				Mujeres adultas				Niños(as)			
	Media	S.D	P50	P90	Media	S.D	P50	P90	Media	S.D	P50	P90
No cancerígeno												
As	9,3E-03	7,3E-03	7,4E-03	1,9E-02	1,0E-02	8,1E-03	8,2E-03	2,1E-02	8,7E-02	6,8E-02	6,9E-02	1,8E-01
Ba	1,8E-03	2,9E-04	1,9E-03	2,2E-03	2,1E-03	3,2E-04	2,1E-03	2,5E-03	1,8E-02	2,8E-03	1,8E-02	2,2E-02
Co	4,7E-03	2,9E-04	4,7E-03	5,1E-03	5,4E-03	3,4E-04	5,4E-03	5,9E-03	3,6E-02	2,2E-03	3,6E-02	3,9E-02
Cu	4,4E-04	2,7E-04	3,7E-04	7,6E-04	5,1E-04	3,2E-04	4,3E-04	8,8E-04	5,0E-03	3,1E-03	4,2E-03	8,6E-03
Cr	4,2E-02	2,0E-02	3,9E-02	6,6E-02	4,7E-02	2,2E-02	4,3E-02	7,3E-02	3,8E-01	1,8E-01	3,5E-01	6,0E-01
Li	2,6E-03	1,7E-03	2,3E-03	4,3E-03	3,0E-03	1,9E-03	2,6E-03	4,9E-03	2,9E-02	1,9E-02	2,5E-02	4,8E-02
Mn	1,5E-02	1,5E-02	1,2E-02	2,5E-02	1,7E-02	1,7E-02	1,3E-02	2,8E-02	1,4E-01	1,4E-01	1,1E-01	2,3E-01
Hg	4,6E-03	2,4E-03	3,1E-03	8,0E-03	5,2E-03	2,8E-03	3,5E-03	9,0E-03	4,7E-02	2,5E-02	3,2E-02	8,2E-02
Ni	2,3E-03	8,1E-04	2,1E-03	3,5E-03	2,6E-03	9,1E-04	2,3E-03	3,9E-03	2,2E-02	7,9E-03	2,0E-02	3,4E-02
Pb	3,6E-03	4,9E-03	2,3E-03	7,9E-03	4,2E-03	5,7E-03	2,6E-03	9,1E-03	4,1E-02	5,5E-02	2,6E-02	8,9E-02
V	3,2E-03	5,1E-03	2,1E-03	6,4E-03	3,6E-03	5,6E-03	2,3E-03	7,1E-03	2,9E-02	4,6E-02	1,9E-02	5,8E-02
Zn	2,0E-04	1,6E-04	1,3E-04	4,4E-04	2,3E-04	1,9E-04	1,5E-04	5,1E-04	2,2E-03	1,8E-03	1,4E-03	4,9E-03
Cancerígeno												
As	9,5E-07	7,4E-07	7,5E-07	1,9E-06	1,1E-06	8,2E-07	8,4E-07	2,1E-06	2,2E-06	1,8E-06	1,8E-06	4,5E-06
Cr	2,5E-05	1,2E-05	2,3E-05	3,8E-05	2,7E-05	1,3E-05	2,5E-05	4,3E-05	5,1E-05	2,4E-05	4,7E-05	7,9E-05
Ni	3,6E-09	1,3E-09	3,2E-09	5,5E-09	4,1E-09	1,5E-09	3,7E-09	6,3E-09	2,2E-09	7,9E-10	2,0E-09	3,4E-09
Pb	5,6E-11	7,6E-11	3,5E-11	1,2E-10	6,5E-11	8,7E-11	4,1E-11	1,4E-10	3,5E-11	4,7E-11	2,2E-11	7,6E-11

En el caso de los elementos no cancerígenos el Cromo (Cr) y el Manganeso (Mn) tienen los valores más próximos al límite permitido, pero como se dijo anteriormente, no representan un riesgo eminente a la salud. Pero si se recomienda monitorear el aumento en las concentraciones.

Para el caso Cancerígeno el Cromo (Cr) es el elemento que se tiene que tener más se aproxima al límite permitido y es recomendable un monitoreo de sus concentraciones.

En resumen, para ambos casos el Cromo (Cr) es el elemento que se repite como el que tiene las concentraciones más inquietantes. Pero que por el momento no representa un riesgo a la salud.

4 Conclusiones

No existe riesgo potencial de sufrir problemas tóxicos, en el riesgo no cancerígeno, debido a la inhalación de partículas de suelo contaminado para hombres adultos, mujeres adultas y niños(as).

No existe riesgo potencial de sufrir problemas tóxicos, en el riesgo no cancerígeno, debido a la ingestión de partículas de suelo contaminado para hombres adultos, mujeres adultas y niños(as).

No existe riesgo potencial de sufrir problemas tóxicos, en el riesgo no cancerígeno, debido al contacto dérmico de partículas de suelo para hombres adultos, mujeres adultas y niños(as).

No existe riesgo cancerígeno, debido a la inhalación de partículas de suelo contaminado para hombres adultos y mujeres adultas.

No existe riesgo cancerígeno debido al contacto dermal de partículas de suelo contaminado para hombres adultos, mujeres adultas y niños(as).

No existe riesgo cancerígeno debido a la ingestión de partículas de suelo contaminado para hombres adultos y mujeres adultas.

Se recomienda monitorear las concentraciones de cromo (Cr), ya que tiene los valores más próximos a los límites peligrosos, tanto para el caso de riesgo cancerígeno y no cancerígeno. Una forma de control puede ser buscar las fuentes que emiten el elemento para controlar su emisión y seguir un análisis permanente, para evitar riesgos futuros.

5 Bibliografía

- Agency, E. P. (2004). *Risk Assessment Guidance for Superfund, Volumen I: Human health, Evaluation Manual (Part E, supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment) Final*.
- ATSDR. (2012). *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades*. Recuperado el 3 de 3 de 2017, de https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts151.html
- ATSDR. (2013). *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades*. Recuperado el 3 de 3 de 2017, de https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts58.html
- ATSDR. (2013). *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades*. Recuperado el 3 de 3 de 2017, de https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts46.html
- Chen, H., Teng, Y., Lu, S., Wang, Y., Wu, J., & Wang, J. (2016). Source apportionment and health risk assessment of trace metals in surface soils of Beijing metropolitan, China. *Chemosphere*, 144, 1002-1011.
- Ferreira-Baptista, L., & De Miguel, E. (2005). Geochemistry and Risk Assessment of Street Dust in Luanda, Angola: A Tropical Urban Environment. *Atmospheric Environment*, 39, 4501-4512.
- Google. (2016). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.cl/maps/place/Talcahuano,+Regi%C3%B3n+del+B%C3%ADo+B%C3%ADo/@-36.7305116,-73.1770665,12z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x96683569902a5369:0x6db08547b12ce264!8m2!3d-36.7247834!4d-73.1169808>
- INE. (2012). *CENSO 2012, Resultados XVIII CENSO de población*. Instituto Nacional de Estadísticas - Chile.
- Lenntech. (2016). Recuperado el 3 de 3 de 2017, de <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/zn.htm>
- Lenntech. (2016). Recuperado el 3 de 3 de 2017, de <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/li.htm>
- Lenntech. (2017). Recuperado el 3 de 3 de 2017, de <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/as.htm>
- Lenntech. (2017). Recuperado el 3 de 3 de 2017, de <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cr.htm>

- MINSAL. (2010). Encuesta Nacional de Salud (ENS) Chile 2009-2010.
- MMA. (2012). *Guía de evaluación de impacto ambiental, Riesgo para la salud para la población*. Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile. Servicio de Evaluación Ambiental.
- Nerín de la Puerta, C. (2008). *Universitat Politècnica de Catalunya, Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallès*. Recuperado el 7 de 7 de 2017, de <http://www-etsav.upc.es/personals/monclus/cursos/1301.htm>
- Salgado, E. (2014). Evaluación de riesgos para la salud de las persona y biota terrestre por la presencia de contaminates, en el área de influencia industrial y energética de las comunas de Concón, Quintero y Puchuncavi, Informe Final.
- Salinas, J., Rebolledo, D., & Cortes, I. (2012). Evaluación de Riesgos a la salud en la comuna de andacollo, Informe Final.
- SUBDERE. (2016). *Subsecretaria de desarrollo regional y administrativo*. Recuperado el 2017 de 7 de 7, de <http://www.subdere.cl/divisi%C3%B3n-administrativa-de-chile/gobierno-regional-del-biob%C3%ADo/provincia-de-concepci%C3%B3n/talcahuano>
- United States Environmental Protection Agency. (2017). *USEPA*. Recuperado el 20 de 3 de 2017, de <https://www.epa.gov/risk/conducting-human-health-risk-assessment#tab-1>
- USEPA. (1997). *United States Environmental Protection Agency, Exposure factors handbook, National Center for Envioronmental Assessment, Office of Research and Development*.
- USEPA. (2004). United States Environmental Protection Agency, Risk Assessment Guidance for Superfund, Voumen I. En *Human Health Evaluation Manual (Parte E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment)* (págs. 31 (3-10)). Washinton, DC.
- USEPA. (2004). *United States Environmental Protection Agency, Risk Assessment Guidance for Superfund, Voumen I. Human Health Evaluation Manual (Parte E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment)*.
- USEPA. (2011). United States Evironmental Agency, Protection Exposure Factors Handbook. Washington, DC.
- USEPA. (2016). *United States Environmental Protection Agency*. Recuperado el 20 de 4 de 2017, de <https://www.epa.gov/risk/human-health-risk-assessment>
- USEPA. (mayo de 2016). *United States Environmental Protection Agency*. Recuperado el 3 de 8 de 2016, de Regional Screening Levels (RSLs) - Generic Tables: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/master_sl_table_run_may2016.pdf

USEPA. (11 de 7 de 2016). *United States Evironmental Protection Agency*. Recuperado el 7 de 7 de 2017, de <https://espanol.epa.gov/espanol/terminos-m>

USEPA. (s.f.). *United States Environmental Protection Agency*.