



**Evaluación del riesgo a la salud humana de efectos cancerígenos y no cancerígenos debido a la exposición a contaminantes presentes en muestras de suelo de la Provincia de Copiapó**

## Resumen

En la provincia de Copiapó existe una gran cantidad de Pasivos Ambientales Mineros. La necesidad de gestión y remediación de suelos contaminados no es cuestionable, pero las acciones de remediación se ven obstaculizadas por sus elevados costos financieros, por lo que, es esencial conocer el nivel de riesgo que representan a la salud de la población, para priorizar las intervenciones. ¿Fueron riesgosas las concentraciones de contaminantes contenidas en suelos superficiales para la salud de los habitantes pertenecientes a los sectores muestreados en la provincia de Copiapó? El presente estudio busca caracterizar el riesgo, de manera retrospectiva, por efectos cancerígenos y no cancerígenos que pudieron resultar de la exposición de la población a suelos contaminados por distintos contaminantes, a través del diseño de un escenario conceptual, basado en guías de evaluación de riesgo de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), utilizando como valores de concentración el percentil P95 específico por contaminante de manera independiente para cada uno de los 5 sectores residenciales muestreados pertenecientes a la provincia de Copiapó, de la Región de Atacama, durante el año 2013. Conocer los niveles de riesgo a la salud que representan estos sectores en específico podría ser de utilidad para determinar la necesidad de realizar vigilancias médicas, proyectos de remediación, ordenamiento territorial u otros.

Para la evaluación de riesgos tanto cancerígenos para el caso del As, Cd y Cr(VI) como no cancerígenos para el resto de los contaminantes, se utilizaron los valores del percentil 95 de cada promedio obtenidos por sector para cada uno de los contaminantes analizados (Cd, Cr, Cu, Mn, Mo, Pb, Zn y As).

La evaluación de riesgos se basó metodológicamente en las guías de la EPA (Risk assessment guidance for Superfund. Human Health Evaluation Manual), donde se calcularon las dosis de exposición (Dosis Diaria Promedio Anual (DDPA), Dosis Diaria Promedio de Por Vida (DDPV), Concentración Diaria Promedio Anual (CDPA) y Concentración Promedio de Por Vida (CDPV)). Luego, utilizando las dosis determinadas para cada uno de los contaminantes, las distintas vías de exposición, y las dosis/concentración de referencia (RfD/RfC), desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, se calcularon el riesgo no cancerígeno individual para cada contaminante, mediante el Índice de peligrosidad (IP) además del riesgo no cancerígeno que representa la exposición a múltiples sustancias y vías de exposición de manera conjunta, obteniendo el Índice de Peligro Total (IPT) integrado por grupo receptor de cada sector muestreado. Para el caso de los efectos cancerígenos se utilizaron los estimadores de riesgo cancerígeno (CSF/IUR) desarrollados por la US EPA, calculando el Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV). Finalmente, para poder caracterizar el riesgo, tanto los Índices de Peligro Total, como el Riesgo Extra de Cáncer de por Vida, fueron comparados con los parámetros de riesgo aceptable establecidos por la US EPA (US EPA, 2014).

## Índice de Contenido

Resumen .....	2
Glosario y abreviaturas .....	10
1. Introducción.....	14
1.1. Evaluación de Riesgos por exposición a contaminantes .....	20
1.1.1. Modelo Conceptual de Exposición .....	20
1.1.2. Factores de Exposición .....	20
1.1.3. Dosis de Exposición .....	21
1.1.4. Índice de peligrosidad Total (IPT) utilizado en la evaluación de riesgos crónicos 21	
1.1.5. Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) .....	21
2. Pregunta de investigación o hipótesis .....	23
3. Objetivos .....	23
3.1. Objetivo General .....	23
3.2. Objetivos Específicos.....	23
3.2.1. Elaborar un modelo conceptual de escenarios de exposición, basados en supuestos representativos del Caso Estudio. ....	23
3.2.2. Identificar el peligro de los contaminantes Cd, Cr, Cu, Mn, Mo, Pb, Zn y As, presentes en la matriz suelo muestreada durante estudios previos, y las relaciones dosis-respuesta respectivas. ....	23
3.2.3. Caracterizar el riesgo por efectos cancerígenos y no cancerígenos según el escenario de exposición propuesto.....	23
4. Metodología. ....	24
4.1. Elaborar un modelo conceptual de escenarios de exposición .....	24
4.1.1. Estudio del área muestreada.....	24
4.1.2. Estudio de los receptores .....	24
4.1.3. Análisis de la información.....	24
4.1.4. Priorización de los sectores muestreados .....	24
4.1.5. Jerarquización de los sectores muestreados.....	26
4.1.6. Formulación del Modelo Conceptual .....	26
4.2. Identificación de los contaminantes.....	26
4.2.1. Muestreo, tratamiento y análisis químico durante estudio previo.....	26
4.2.2. Resultados de los análisis en el laboratorio.....	27
4.2.3. Estadística descriptiva.....	28
4.2.4. Perfil de toxicidad de los metales muestreados.....	28
4.2.5. Criterios de toxicidad de los contaminantes de riesgo potencial .....	28
4.3. Caracterizar el riesgo por efectos cancerígenos y no cancerígenos según escenario de exposición propuesto .....	28

4.3.1.	Selección de Factores de Exposición .....	28
4.3.2.	Cálculo de las Dosis de Exposición.....	29
4.3.3.	Riesgos por exposición a plomo.....	32
4.3.4.	Determinación de los Índices de Peligro por efectos no cancerígenos .....	33
4.3.5.	Determinación del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV).....	33
5.	Resultados .....	35
5.1.	Elaborar un modelo conceptual de escenarios de exposición .....	35
5.1.1.	Estudio del área muestreada.....	35
5.1.2.	Estudio de los receptores .....	36
5.1.3.	Análisis de la información.....	40
5.1.4.	Priorización de los sectores muestreados .....	40
5.1.5.	Jerarquización de los sectores muestreados.....	44
5.1.6.	Formulación del Modelo Conceptual .....	45
5.2.	Identificación de los contaminantes.....	47
5.2.1.	Muestreo, tratamiento y análisis químico previo .....	47
5.2.2.	Estadística descriptiva.....	53
5.2.3.	Perfil de toxicidad de los metales muestreados.....	55
5.2.4.	Criterios de toxicidad de los contaminantes de riesgo potencial.....	84
5.3.	Caracterizar el riesgo por efectos cancerígenos y no cancerígenos según escenario de exposición propuesto .....	85
5.3.1.	Selección de Factores de Exposición .....	85
5.3.2.	Cálculo de las Dosis de Exposición.....	86
5.3.3.	Riesgos por exposición a plomo.....	88
5.3.4.	Determinación de los Índices de Peligro por efectos no cancerígenos .....	93
5.3.5.	Determinación del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV).....	102
6.	Discusión .....	104
6.1.	Elaboración del modelo conceptual.....	104
6.2.	Identificación de los contaminantes.....	104
6.2.1.	Directivas de Kelley.....	105
6.2.2.	Canadá. Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health .....	106
6.2.3.	Sao Paulo (Brasil). Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). Decisão de diretoria Nº195-2005- E, de 23 de novembro de 2005.....	107
6.2.4.	País Vasco (España) LEY 1/2005, de 4 de febrero, para la prevención y corrección de la contaminación del suelo. ....	107
6.2.5.	México. Norma Oficial Mexicana para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) .....	108
6.3.	Caracterización del riesgo por efectos no cancerígenos y cancerígenos.....	110

---

Modelo toxicocinético basado en fisiología (PBTK) para el plomo .....	110
6.4. Incertidumbres y posibles mejoras .....	113
6.5. Proyecciones del estudio.....	114
7. Conclusiones.....	116
8. Referencias .....	117
9. ANEXOS: .....	122
9.1. Resultados de los análisis en el laboratorio (obtenidas de otros colaboradores) .	122
9.2. Estándares y normativa extranjera para contaminantes en suelo.....	124
9.2.1. Criterio Canadiense establecido para calidad de suelos por la Guía “Normas Canadienses de la Calidad del Suelo para la Protección de la Salud del Medio Ambiente y los Humanos” (Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health) .....	124
9.2.2. Criterio Australiano para la calidad de suelos establecidos por el Departamento Medioambiental y Conservación: “Niveles para Evaluación de Suelos, Sedimentos y Agua, 2010” (Assessment Levels for Soil, Sediment and Water, 2010). .....	125
9.2.3. Norma Oficial Mexicana para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004). .....	126
9.2.4. Valores orientadores para suelos en el estado de Sao Pablo, Brasil. “Artigo 1º Decisão de Diretoria Nº 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005”. .....	127
9.2.5. Criterios establecidos para calidad de suelos en la Comunidad Autónoma del País Vasco, España. ....	128

## Índice de Tablas

Tabla nº 1: Fracción de contaminante absorbida por vía oral e inhalatoria. ....	29
Tabla nº 2: Parametros considerados en el cálculo de la DDPx por vía oral.....	30
Tabla nº 3: Parametros considerados en el cálculo de la CDPx por vía inhalatoria. ....	32
Tabla nº 4: Resumen aluviones históricos (recientes) en Atacama y sus mecanismos de precipitación (1980- 2017). ....	36
Tabla nº 5: Indicadores Socioeconómicos de la región de Atacama y a nivel País. ....	39
Tabla nº 6: Indicadores de Estilos de Vida de la región de Atacama y a nivel País. ....	40
Tabla nº 7: Nivel de Priorización de intervención en sectores según criterios de la Guía Metodológica de Gestión de Suelo con Potencial Presencia de Contaminantes.....	40
Tabla nº 8: Categorización de Jerarquía de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes. ....	45
Tabla nº 9: Estadística descriptiva de las determinaciones de contaminantes en suelo superficial del Sector Población Rosario, periodo 2013. ....	53
Tabla nº 10: Estadística descriptiva de las determinaciones de contaminantes en suelo superficial del Sector El Palomar, periodo 2013. ....	54
Tabla nº 11: Estadística descriptiva de las determinaciones de contaminantes en suelo superficial del Sector La Viñita, periodo 2013. ....	54
Tabla nº 12: Estadística descriptiva de las determinaciones de contaminantes en suelo superficial del Sector Paipote, periodo 2013. ....	54

Tabla nº 13: Estadística descriptiva de las determinaciones de contaminantes en suelo superficial del Sector Tierra Amarilla, periodo 2013.....	54
Tabla nº 14: Dosis de Referencia (RfD) en (mg/kg-day) y Cancer Slope Factors (CSF) de los distintos contaminantes. ....	84
Tabla nº 15: Factores de exposición asociados con los escenarios de exposición. ....	85
Tabla nº 16: Dosis y concentraciones según escenarios, en sector Población Rosario. ....	86
Tabla nº 17: Dosis y concentraciones según escenarios, en sector El Palomar. ....	86
Tabla nº 18: Dosis y concentraciones según escenarios, en sector La Viñita. ....	87
Tabla nº 19: Dosis y concentraciones según escenarios, en sector Paipote.....	87
Tabla nº 20: Dosis y concentraciones según escenarios, en sector Tierra Amarilla.....	88
Tabla nº 21: Concentración de Pb y porcentaje de niños sobre el nivel de referencia por sector. ....	93
Tabla nº 22: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en infantes del sector Población Rosario. ....	94
Tabla nº 23: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adolescentes del sector Población Rosario.....	94
Tabla nº 24: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adultos del sector Población Rosario. ....	95
Tabla nº 25: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en infantes del sector El Palomar.....	95
Tabla nº 26: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adolescentes del sector El Palomar. ....	96
Tabla nº 27: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adultos del sector El Palomar.....	96
Tabla nº 28: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en infantes del sector La Viñita .....	97
Tabla nº 29: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adolescentes del sector La Viñita.....	97
Tabla nº 30: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adultos del sector La Viñita. ....	98
Tabla nº 31: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en infantes del sector Paipote. ....	98
Tabla nº 32: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adolescentes del sector Paipote. ....	99
Tabla nº 33: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adultos del sector Paipote.....	100
Tabla nº 34: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en infantes del sector Tierra Amarilla. ....	100
Tabla nº 35: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adolescentes del sector Tierra Amarilla. ....	101
Tabla nº 36: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adultos del sector Tierra Amarilla. ....	101
Tabla nº 37: Cálculo del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) para receptores del sector Población Rosario.....	102

Tabla nº 38: Cálculo del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) para receptores del sector El Palomar.....	102
Tabla nº 39: Cálculo del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) para receptores del sector La Viñita.....	102
Tabla nº 40: Cálculo del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) para receptores del sector Paipote. ....	103
Tabla nº 41: Cálculo del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) para receptores del sector Tierra Amarilla. ....	103
Tabla nº 42: Directivas de Kelley para la clasificación de suelos secos contaminados (mg/kg). .....	105
Tabla nº 43: Límites máximos permitidos en los criterios canadienses para la calidad del suelo Uso del Suelo.....	106
Tabla nº 44; Valores orientadores para elementos en suelos en el Estado de Sao Paulo, Brasil. .....	107
Tabla nº 45: Valores indicativos para la evaluación de la calidad del suelo en la Comunidad Autónoma del País Vasco, España .....	108
Tabla nº 46: Concentraciones de referencia totales (CRT) (mg/kg) por tipo de uso de suelo en México.....	108
Tabla nº 47: Comparación de los valores P95 de contaminantes en suelo, obtenidos en 2013, con los criterios establecidos en normativas extranjeras. ....	108
Tabla nº 48: Concentración de contaminantes en muestras del Sector Población Rosario, obtenidas durante el año 2013. ....	122
Tabla nº 49: Concentración de contaminantes en muestras del Sector El Palomar, obtenidas durante el año 2013.....	122
Tabla nº 50: Concentración de contaminantes en muestras del Sector La Viñita, obtenidas durante el año 2013.....	122
Tabla nº 51: Concentración de contaminantes en muestras del Sector Paipote, obtenidas durante el año 2013.....	124
Tabla nº 52: Concentración de contaminantes en muestras del Sector Tierra Amarilla, obtenidas durante el año 2013. ....	124
Tabla nº 53: Estándares de calidad de suelo para la protección de la salud y el medio ambiente, según uso de suelo, en Canadá.....	125
Tabla nº 54: Niveles de metales y contaminantes en suelo (en mg/kg) para realizar investigación de riesgo ecológico y a la salud humana, según la normativa de Australia. .	125
Tabla nº 55: Valores de concentración de referencia total para diferentes usos, según NOM- 147-SEMARNAT/SSA1-2004. ....	127
Tabla nº 56: Valores de referencia, prevención y de intervención para diferentes usos, según Directriz No 195/2005 Estado de Sao Pablo, Brasil. ....	128
Tabla nº 57: Valores indicativos de evaluación para diferentes usos, según Ley 4/2015 del País Vasco, España. ....	128

## Índice de Ilustraciones

Ilustración nº 1: Árbol de decisión general para la priorización de Suelos con Potencial

Presencia de Contaminantes (SPPC).....	25
Ilustración nº 2: Modelo conceptual para la evaluación de riesgos a la salud humana debido a la presencia de contaminantes para cada sector evaluado, periodo 2013. ....	46

## Índice de Imágenes

Imagen nº 1: Distancia desde foco de contaminación a patio de Colegio, Sector Población Rosario.....	42
Imagen nº 2: Distancia desde foco de contaminación al exterior de área residencial, Sector El Palomar.....	42
Imagen nº 3: Distancia desde foco de contaminación al patio de residencia habitada, Sector la Viñita. ....	43
Imagen nº 4: Distancia desde foco de contaminación a espacio público de uso recreativo, Sector Paipote.....	43
Imagen nº 5: Distancia desde foco de contaminación a área residencial, Sector Tierra Amarilla. ....	44

## Índice de Ecuaciones

Ecuación nº 1: Técnica de Sustitución simple de valores por debajo del límite de detección. ....	28
Ecuación nº 2: Cálculo de Dosis Diaria Promedio por vía oral. ....	29
Ecuación nº 3: Cálculo de Concentración Diaria Promedio por vía inhalatoria.....	29
Ecuación nº 4: Estimación de concentración de Pb en aire. ....	33
Ecuación nº 5: Cálculo de índices de peligro. ....	33
Ecuación nº 6: Ponderación de Índices de Peligro Total (IPT). ....	33
Ecuación nº 7: Cálculo de la Dosis Diaria Promedio de por Vida.....	34

## Índice de Gráficos

Gráfico nº 1: Piramide Poblacional estimada 2017 por grupos quinquenales de edad y sexo. Región de Tarapacá.....	37
Gráfico nº 2: Causas de defunciones según grupo etario. Región de Atacama, periodo 2014. ....	38
Gráfico nº 3: Gráfico nº: Mortalidad por causas de neoplasias, Región de Atacama 2000-2011. ....	38
Gráfico nº 4: Curva de distribución de los valores de plomo en sangre de acuerdo al modelo IEUBK en el escenario de niños expuestos a la concentración representativa de Pb en sector Población Rosario. ....	89
Gráfico nº 5: Curva de distribución de los valores de plomo en sangre de acuerdo al modelo IEUBK en el escenario de niños expuestos a la concentración representativa de Pb en sector El Palomar.....	90
Gráfico nº 6: Curva de distribución de los valores de plomo en sangre de acuerdo al modelo IEUBK en el escenario de niños expuestos a la concentración representativa de Pb en sector	

---

La Viñita. ....	91
Gráfico nº 7: Curva de distribución de los valores de plomo en sangre de acuerdo al modelo IEUBK en el escenario de niños expuestos a la concentración representativa de Pb en sector Paipote. ....	92
Gráfico nº 8: Curva de distribución de los valores de plomo en sangre de acuerdo al modelo IEUBK en el escenario de niños expuestos a la concentración representativa de Pb en sector Tierra Amarilla. ....	93

## Glosario y abreviaturas

**Toxicidad:** Es la habilidad intrínseca de una sustancia, compuesto o elemento químico de producir un efecto biológico dañino o indeseable, y depende principalmente de las propiedades químicas, físicas y de los mecanismos de acción de cada sustancia particular. Existen criterios de toxicidad tales como dosis de referencia, concentración de referencia, factor de potencia cancerígena, factor de riesgo unitario de cada contaminante dependiendo de la ruta de exposición, la duración de la exposición (crónico, subcrónico), y la bioaccesibilidad del contaminante en la matriz.

**ADI (“acceptable daily intake”):** Es una medida de la cantidad de una sustancia (en general se lo aplica al caso de un aditivo alimentario, aunque también se lo menciona en el caso de fármacos veterinarios o pesticidas) en un alimento o en agua de bebida que puede ingerirse sobre una base diaria por toda la vida sin que ocurra un riesgo apreciable para la salud. Se la expresa usualmente en miligramos por kilo de peso corporal por día.

**BMDL (“benchmark dose lower confidence limit”):** Este concepto provee una alternativa más cuantitativa en el primer paso de la evaluación dosis-respuesta que el proceso actual NOAEL/LOAEL para efectos no-cáncer (U.S. EPA, 1996). En tanto la EPA está cambiando sus criterios hacia la armonización de los criterios de evaluación para efectos cancerígenos y no-cáncer, se considera mejor considerar el modo de acción y si los efectos tienen un comportamiento lineal o no a dosis bajas.

**ED10:** Dosis efectiva 10. Se dice de aquella dosis que produce el efecto en el diez por ciento de los individuos bajo estudio.

**Hormesis:** Fenómeno de respuesta a la dosis que se caracteriza por una estimulación por dosis bajas y una inhibición para dosis altas, lo que resulta en una curva de respuesta en forma de J o de U invertida. Un tóxico que produzca el efecto de hormesis tiene entonces a bajas dosis el efecto contrario al que tiene en dosis más altas. El principio de funcionamiento de la hormesis no siempre está claro. A menudo se consideran dos efectos completamente contrarios que funcionan en paralelo: un efecto positivo que ya se presenta en dosis muy pequeñas, y un efecto negativo que sólo aparece con las dosis más grandes.

**LOAEL (lowest observed adverse effect level):** Es la concentración o cantidad más pequeña de una sustancia que causa una alteración observable y distinguible de un control apropiado.

**NOAEL (no observed adverse effect level):** Es la dosis más elevada de una sustancia que no ha mostrado en las pruebas tener efectos perjudiciales para la salud en personas o animales.

**PBPK (physiologically based pharmacokinetic modeling):** El modelado farmacocinético basado fisiológicamente es una metodología de modelamiento matemático de la farmacocinética para predecir la absorción, distribución, metabolismo y excreción de un

compuesto en humanos y otras especies animales. El modelado PBPK se usa en investigación y desarrollo farmacéutico, así como para la evaluación de riesgo en la salud.

**RfD (reference dose):** Es la dosis oral máxima aceptable de una sustancia tóxica, según la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (U.S. EPA). Se la determina frecuentemente para los pesticidas y se la define como una estimación, con una incertidumbre que puede abarcar un orden de magnitud, de una exposición diaria oral de la población humana (incluyendo subgrupos sensibles) que es probable que no tenga un riesgo apreciable de efectos dañinos durante toda la vida.

**Dosis de referencia oral (DRfo):** Una estimación (con una incertidumbre que puede llegar a un orden de magnitud) de la exposición diaria oral en la población humana (*incluyendo subgrupos susceptibles*) que es probable estén libres de riesgos apreciables de efectos dañinos durante toda la vida. Las unidades son [mg/kg·día].

**Dosis de referencia dérmica (DRfd):** Se usa la dosis de referencia oral corregida por absorción dérmica.

**Concentración de referencia (CRfi):** Una estimación (con una incertidumbre que puede llegar a un orden de magnitud) de la exposición por inhalación continua en la población humana (*incluyendo subgrupos susceptibles*) que es probable estén libres de riesgos apreciables de efectos dañinos crónicos de salud durante toda la vida. Las unidades son mg/m<sup>3</sup>.

**Niveles Mínimos de Riesgo (LMR):** Un LMR se define como una estimación de la exposición humana diaria a una sustancia que es probable que no presente un riesgo apreciable de efectos adversos (no cancerígenos) durante una duración específica de exposición. Los LMR se derivan cuando existen datos fiables y suficientes para identificar los órganos diana del efecto o los efectos sobre la salud más sensibles durante un período específico dentro de una vía de exposición determinada. Los LMR se basan únicamente en los efectos no cancerosos para la salud y no consideran los efectos cancerígenos. Los LMR se pueden derivar para exposiciones de duración aguda, intermedia y crónica por inhalación y vías orales. No existe una metodología apropiada para desarrollar LMR para la exposición dérmica. Se han realizado estimaciones de los niveles de exposición que representan un riesgo mínimo para los seres humanos (MRL) para el arsénico.

Aunque se han establecido métodos para derivar estos niveles (Barnes y Dourson 1988; EPA 1990i), existen incertidumbres asociadas con estas técnicas. Además, la ATSDR reconoce incertidumbres adicionales inherentes a la aplicación de los procedimientos para derivar LMR inferiores a la vida útil. Por ejemplo, los LMR de inhalación aguda pueden no ser protectores para los efectos sobre la salud que se retrasan en el desarrollo o se adquieren después de ataques agudos repetidos, como reacciones de hipersensibilidad, asma o bronquitis crónica. A medida que este tipo de datos sobre efectos en la salud estén disponibles y mejoren los métodos para evaluar los niveles de exposición humana significativa, se revisarán estos LMR. La ATSDR reconoce que se puede requerir una cantidad considerable de juicio para establecer si un criterio de valoración debe clasificarse como NOAEL, LOAEL "menos grave" o LOAEL "grave" y que, en algunos casos, no habrá

datos suficientes para decidir si el efecto es indicativo de una disfunción significativa. Sin embargo, la Agencia ha establecido pautas y políticas que se utilizan para clasificar estos puntos finales. La ATSDR cree que hay suficiente mérito en este enfoque para justificar un intento de distinguir g entre efectos "menos graves" y "graves". La distinción entre efectos "menos graves" y efectos "graves" se considera importante porque ayuda a los usuarios de los perfiles a identificar los niveles de exposición en los que comienzan a aparecer efectos importantes para la salud. Los LOAEL o NOAEL también deberían ayudar a determinar si los efectos varían o no con la dosis y/o la duración, y poner en perspectiva la posible importancia de estos efectos para la salud humana. Para el caso de efectos cancerígenos, La US.EPA recomienda la inclusión en el análisis de riesgo a toda sustancia con clasificación de cáncer A y B. Si bien plomo también ha sido clasificado como B2, en la actualidad, US.EPA recomienda considerar el plomo sólo como un cancerígeno en animales.

**Factor de Potencia (o Pendiente) Cancerígena Oral (FPCO):** Pendiente del 95% límite de confianza superior de la regresión lineal de la respuesta cancerígena ( $\Delta R$ ) a dosis bajas ( $\Delta D$ ). Las unidades son  $\text{mg/kg}\cdot\text{día}^{-1}$ .

**Factor de Potencia Cancerígena Dérmica (FPCD):** Se usa el factor de potencia cancerígena oral corregido por absorción dérmica.

**Factor de Unidad de Riesgo (FURI):** Riesgo asociado con exposición por la vía respiratoria a una unidad de masa de contaminante cancerígeno por unidad de volumen. Unidades en  $(\text{mg}/\text{m}^3)^{-1}$ .

**Transporte Pasivo Simple:** Los procesos de transporte pasivo deben ser generalmente funciones lineales de la tasa de la dosis, a dosis razonablemente bajas. Este caso es bastante similar a la reacción del ADN descrita más arriba. Representando a una membrana como una barrera con un número fijo de poros, puede esperarse entonces que la tasa a la cual las moléculas pasan desde un lado al otro de la barrera sea directamente proporcional al número de "colisiones" entre una molécula de la sustancia difundida y una de las "puertas" en la barrera. Mientras que la concentración de la sustancia sea lo suficientemente baja para que las propiedades principales de la membrana permanezcan sin cambio, y el número de poros libres disponible en cualquier momento no esté disminuido apreciablemente, entonces no debería haber efecto debido a la tasa de la dosis.

**Transporte Facilitado:** Cuando los procesos de transporte son facilitados por un número finito de macromoléculas transportadoras, es esperable que ocurra (a) un aumento del transporte a niveles bajos de la concentración externa, relativo a lo que podría ocurrir en ausencia de un sistema de facilitación, y (b), una saturación de la porción de ese transporte facilitado a rangos de dosis relativamente altos.

**Homeostasis alterada:** Todos los organismos vivos, desde las bacterias hasta los mamíferos, mantienen un ambiente interno bien controlado para sostener su bioquímica básica y su biología molecular. Estos ambientes celulares consisten en concentraciones de varios componentes requeridos para convertir las señales entrantes en niveles apropiados de macromoléculas y concentraciones necesarias de varias moléculas pequeñas, asociados

---

con las operaciones normales del funcionamiento celular requeridas para la supervivencia y la reproducción. La homeostasis se refiere a la capacidad de los organismos vivos para mantener el ambiente interno adecuado de cara a los cambios en las condiciones externas. La homeostasis no es una propiedad estática de los organismos. En lugar de esto, representa interacciones específicas de los componentes regulatorios que sirven para controlar los cambios en el ambiente interno a través de un mecanismo de retroalimentación negativa o para reconocer y responder a nuevas situaciones, por activación del circuito genético normalmente silencioso en el genoma.

## 1. Introducción

Chile se caracteriza por ser un país con una industria minera activa de diversos minerales, principalmente cobre y ésta continúa siendo la mayor fuente de ingresos económicos por concepto de exportaciones para Chile. Sin embargo, existen externalidades negativas, como los Pasivos Ambientales Mineros que se acumulan principalmente en la zona centro-norte del país. Dentro de los agentes contaminantes, se encuentran los metales pesados, el polvo fugitivo y la percolación de soluciones ácidas que afectan la salud de las personas y los recursos naturales como agua, vegetación y suelos agrícolas (SERNAGEOMIN, 2020).

Los metales son los elementos químicos situados a la izquierda y centro de la tabla del sistema periódico. Se clasifican en metales alcalinos y alcalinotérreos de los grupos I y II A, los metales de transición y los grupos III y IV A. Algunos elementos intermedios como el As del grupo VA se estudian habitualmente junto a los metales. En todos estos grupos se encuentran metales muy relevantes desde el punto de vista toxicológico.

Sus características químicas se basan en su estructura electrónica que condiciona las preferencias de enlace en que predominan el enlace metálico, que se establece entre átomos del mismo elemento, caracterizado por la formación de estructuras cristalinas en que cada átomo comparte los electrones de muchos de sus vecinos, y el enlace iónico, sobre todo entre los metales alcalinos y alcalinotérreos y los no metales (Cotton, 1988).

Así, los elementos metálicos dan lugar a diferentes tipos de compuestos:

- Metales en estado elemental.
- Compuestos inorgánicos: halogenuros, hidroxilos, oxoácidos.
- Compuestos orgánicos: alquilos, acetatos, fenilos.

En muchas ocasiones, estos elementos metálicos pueden estar presentes en las partículas suspendidas en aire, como también en el agua y alimentos. Esta presencia es imprescindible en el caso de muchos de ellos, mencionados como metales esenciales. Hay que tener en cuenta que la mayoría de los oligoelementos necesarios para el correcto funcionamiento del organismo en concentraciones traza son metálicos: Fe, Cu, Mn, Zn, Co, Mo, Se, Cr, Sn, V, Si y Ni. Algunos de los alcalinos (Na, K) y alcalinotérreos (Ca) y el Mg son cationes de extraordinaria importancia para el correcto funcionamiento celular y se encuentran en alta concentración. Una de las principales funciones de los oligoelementos metálicos es formar parte de las denominadas metaloenzimas en las que intervienen como coenzimas. En algunos casos, como el Zn, estabilizan estados intermedios. En otros como el Fe o el Cu en la citocromooxidasa actúan en reacciones redox como intercambiadores de electrones. No obstante, la exposición resulta tóxica cuando la concentración excede determinados límites o cuando se trata de elementos más peligrosos (Mathews, 1998).

La principal preocupación asociada con la contaminación del suelo es el potencial impacto adverso para la salud de las personas que puede resultar directamente por exposición crónica a través de la ingestión del suelo, la absorción dérmica y la inhalación de partículas del suelo, o indirectamente a través del consumo de cultivos u hortalizas del área contaminada, la ingestión de productos animales o el consumo de agua potable contaminada. En relación con la absorción y la distribución de metales al interior del organismo, los compuestos organometálicos se benefician de una mejor difusión por lo que se absorben bien por vía digestiva e incluso pueden absorberse por vía cutánea. La vía respiratoria es importante en el mercurio, que es el único metal volátil, y en la exposición a humos y vapores metálicos en condiciones extremas de temperatura y también a partículas, como en el caso del Pb que es fagocitado por los macrófagos alveolares. Las sales metálicas inorgánicas se absorben y difunden con mayor dificultad y algún compuesto, como el mercurio metal, no se absorbe por vía digestiva salvo a dosis muy altas (Kabengi y Chrysochoou, 2015).

Las características y efectividad del transporte de membrana condicionan la expresión de la toxicidad de las sustancias químicas al determinar su tiempo de permanencia junto a sus dianas. Estas características dependen de diversos factores entre los que destaca la hidrofobicidad o liposolubilidad, volatilidad, Pm y la existencia de mecanismos específicos de transporte. Dichas características pueden diferir mucho entre distintos compuestos del mismo elemento. Las moléculas inorgánicas tienden a ser más hidrosolubles que las orgánicas, aunque algunas sales, por ejemplo, de plomo, son totalmente insolubles como sulfato, carbonato, cromato, fosfato y sulfuro de plomo. Tampoco todas las moléculas orgánicas presentan la misma liposolubilidad como se verifica en el caso de los compuestos organomercuriales.

El metabolismo de los compuestos metálicos afecta en general muy poco a su toxicidad. Los compuestos orgánicos tienden a transformarse en inorgánicos lentamente, aunque en algún caso, como el As, sucede lo contrario.

La vida media de los compuestos metálicos en el organismo es variable, pero tiende a ser prolongada debido a su afinidad y acumulación en el hueso. Se acumulan, por ejemplo, el Pb y el Cd con vidas medias superiores a los 20 años, mientras que otros como el As o el Cr no se acumulan y tienen vidas medias de días, aunque pueden detectarse durante más tiempo en lugares considerados de eliminación como pelo y uñas. La sangre, orina y pelo son las muestras biológicas más empleadas para medir una exposición o dosis. Las dos primeras para determinar una exposición reciente y la última para determinar una exposición anterior y su evolución en el tiempo.

La toxicidad de los compuestos metálicos se diferencia de la mayoría de las moléculas orgánicas por el hecho de depender de manera muy característica del elemento metálico en cuestión, aunque, como se ha indicado, la expresión de esa toxicidad depende también de las modificaciones toxicocinéticas derivadas del tipo de molécula: por ejemplo, el mercurio orgánico es principalmente neurotóxico por su capacidad de atravesar la barrera hematoencefálica, mientras que el cloruro mercúrico es nefrotóxico al eliminarse por el riñón.

Otro factor que influye en la toxicidad de los compuestos metálicos es el estado de valencia en que el elemento metálico se encuentra. Así, el As III es más tóxico que el As V y el Cr VI es más peligroso que el III.

Las dianas de toxicidad de los metales son proteínas, muchas de ellas con actividad enzimática, afectando a diversos procesos bioquímicos, membranas celulares y orgánulos. Los efectos tóxicos de los metales se ejercen, salvo pocas excepciones, por interacción entre el ión metálico libre y la diana.

Son tóxicos eminentemente lesionales que afectan gravemente a funciones celulares fundamentales para su supervivencia por mecanismos complejos, no siempre bien conocidos. Entre ellos destacan:

- Interacción con metales esenciales por similitud electrónica.
- Formación de complejos metal-proteína con inactivación de su función.
- Inhibición enzimática de proteínas con grupos SH<sup>-</sup>.
- Afectación de orgánulos celulares: mitocondrias, lisosomas, microtúbulos.

Los metales, como cualquier otro grupo de agentes químicos, pueden producir una patología aguda, desarrollada rápidamente tras el contacto con una dosis alta, o crónica por exposición a dosis baja a largo plazo.

La toxicidad aguda por metales es poco frecuente. Son muy escasas las intoxicaciones suicidas u homicidas por vía digestiva, capaces de producir cuadros clínicos muy graves o fulminantes, con afectación digestiva, cardiovascular, neurológica o hepatorenal. Una situación clínica más frecuente es el cuadro de fiebre de los metales, tras exposición respiratoria en el medio laboral a humos metálicos.

Las intoxicaciones subagudas o crónicas, predominantemente de origen laboral, han disminuido con el control en las empresas de los valores límites ambientales para agentes químicos. Las exposiciones a dosis bajas a largo plazo, procedentes de fuentes alimentarias o ambientales, pueden producir los cuadros típicos de intoxicación crónica, como ha sucedido en el caso mencionado del As o manifestarse en forma de efectos aislados, como la disminución de CI en niños expuestos al Pb (Nogué, 2007)..

Otro posible efecto a largo plazo es la carcinogénesis (Tomatis, 1990). La “*International Agency for Research on Cancer*” (IARC) ha incluido en el Grupo I (Agentes carcinógenos en humanos) a: arsénico, berilio, cadmio, cromo (VI) y níquel. Circunstancias de exposición clasificadas en el mismo grupo son la producción de aluminio y la fundición de hierro y acero (IARC, 2023).

Como tratamiento antidótico, el conjunto de los elementos metálicos se beneficia de un tipo de tratamiento específico llamado “quelación” basado en su reactividad química que les capacita para la formación de complejos con diversas sustancias denominadas agentes quelantes (Aaseth, 1983). Se forman compuestos coordinados atóxicos e hidrosolubles que se eliminan por la orina. La teoría de quelación de los metales indica que los cationes de metales blandos como el  $Hg^{2+}$ , forman complejos estables con moléculas donantes de sulfuros (BAL-*British Anti-Lewisite*) mientras que los cationes de metales duros, alcalinos y alcalinotérreos tienen más afinidad por los grupos  $COO^-$  (EDTA) y los intermedios como el  $Pb^{2+}$  o el  $As^{3+}$  se acomplejan con ambos tipos de ligandos y los donantes de nitrógeno (Howland, 1998a).

Los metales en forma inorgánica son los componentes fundamentales de los minerales de la corteza terrestre por lo que se cuentan entre los agentes químicos tóxicos de origen natural más antiguamente conocidos por el hombre.

La exposición a elementos metálicos se relaciona principalmente a la actividad laboral, como ha sucedido a lo largo de la historia, pero, además, la población general se expone a través del agua, alimentos y el ambiente, donde su presencia se ha incrementado por la intervención de la actividad extractiva sobre los ciclos hidrogeológicos (Sullivan, 2001).

Un gran número de actividades industriales implica la manipulación de metales. Entre ellas hay que destacar la minería y las industrias de transformación, fundiciones y metalurgia en general. Actividades específicas producen riesgos mayores frente a determinados elementos, como la exposición al plomo en las empresas de baterías o exposición al mercurio en las operaciones de electrólisis. Los trabajadores dentales han recibido una notable atención en las últimas décadas por su potencial exposición al berilio, mercurio y níquel. Otra fuente de exposición es la atmósfera potencialmente contaminada por diversos metales en forma de polvos, humos o aerosoles, con frecuencia de origen industrial, procedentes de combustiones fósiles y por su presencia en la gasolina (Sullivan, 2001). Era clásica, por ejemplo, la presencia de plomo en el agua procedente de las tuberías. Algunas de las epidemias tóxicas alimentarias más graves han implicado elementos metálicos, como el Hg en la enfermedad de Minamata (Kurland, 1960) o de las producidas por compuestos organomercuriales empleados como fungicidas en el tratamiento del grano (Ferrer, 1993). La fuente de exposición alimentaria mantiene su importancia como se ha demostrado en la epidemia de arsenicosis por consumo de agua de pozo con alta concentración de As en diversos países asiáticos a lo largo de los años 90 (Rahman et al, 2001).

El procesamiento de estos minerales genera residuos que es necesario confinar. Estos se acumulan en embalses llamados “tranques de relave”. Los relaves mineros se cuentan entre los principales PAM, que son definidos como faenas mineras abandonadas o paralizadas; sus residuos incluidos, que constituyen un riesgo significativo para la vida, la salud de las personas y el medioambiente. Es importante tener en consideración que la Región de Atacama contiene distintos lugares históricamente utilizados por variadas mineras para la deposición de sus desechos, lo que también podría aumentar la cantidad de contaminantes, dependiendo de la procedencia de estos. El último Catastro de Relaves en Chile, contabiliza

606 tranques de relave, de ellos 167 abandonados, 388 inactivos y 51 activos. Del total, 168 pertenecen a la Región de Atacama (SERNAGEOMIN, 2020).

Para que un suelo con metales provenientes de la actividad minera sea considerado un PAM, debe haber una evaluación de riesgo previa que concluya que existe un riesgo significativo para la salud de las personas o el medio ambiente (SERNAGEOMIN – BGR, 2008). La contaminación del suelo puede deberse a diferentes factores, unos propios de las condiciones de operación y otros ajenos a los procesos como el comportamiento de vientos y eventos climáticos, pero principalmente proviene de operaciones industriales y comerciales, tratamiento y disposición de residuos municipales e industriales (EC JRC, 2014).

En la provincia de Copiapó existe una gran cantidad de PAM de los cuales uno de ellos está catalogado como una de las 14 faenas mineras abandonadas más riesgosa del país. La expansión urbana, en su mayoría, no ha sido planificada, conteniendo 30 relaves de operaciones mineras abandonadas dentro del área urbana y periurbana, producto de esto, la provincia se ha enriquecido de contaminantes en sus suelos, tales como cromo, cobre, manganeso, molibdeno, plomo, zinc y arsénico (SERNAGEOMIN, 2011). Además de los relaves, a tan sólo 8 km del epicentro de la ciudad opera una fundición de cobre desde el año 1952.

El gobierno chileno, a través del Ministerio del Medio Ambiente (MMA), determinó la existencia de sitios con potencial presencia de contaminantes metálicos. Se estableció una priorización para continuar los estudios de riesgo a la salud a través del Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA, 2012). Durante estos estudios se concluyó que la concentración de Fe y Cu no significan un riesgo a la salud de los receptores en los escenarios de exposición analizados (CITUC, 2018). Los estudios realizados se enfocan en relaves y residuos mineros, sin embargo, aún existen brechas de información con respecto al contenido de metales y la calidad del suelo en las zonas urbanas y periurbanas. A la fecha se han realizado esfuerzos para mejorar las condiciones del área urbana como el retiro parcial del relave Ojancos, la estabilización del relave San Juan y la instalación de vegetación sobre uno de ellos para disminuir la degradación de suelo. Actualmente continúan los esfuerzos por parte de las autoridades para jerarquizar y remediar diversos sectores.

Lamentablemente, los mecanismos de control para evitar la liberación de estos desechos, tales como depósitos, muros de contención, entre otros, no han sido suficientemente considerados en las etapas de abandono de la actividad, quedando, en muchos casos, sin el debido tratamiento o algún otro manejo posterior que evite que se conviertan en un riesgo para el ecosistema (SERNAGEOMIN, 2010).

Es necesario considerar que estos contaminantes podrían moverse de una matriz a otra dependiendo de los fenómenos climáticos que acontezcan, tal como ocurrió con los aluviones del año 2015 en la Región de Atacama, donde una gran cantidad de material sólido se desplazó hasta las localidades habitadas, lo que incrementó la preocupación de los

pobladores acerca del posible impacto a su salud, producto de la exposición a metales (Cortés, 2015).

A pesar de la preocupación y necesidad de gestionar los suelos contaminados, esto no siempre suele concretarse debido al costo económico que implica. Según el informe de la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), en Europa, los costos de los proyectos de remediación suelen oscilar entre 50.000 y 500.000 euros, y los megasitios pueden requerir incluso más de 5 millones de euros.

Aproximadamente, el 81% del gasto en gestión de suelos contaminados se destina a medidas de remediación, mientras que sólo el 15% a investigaciones de sitios (EC JRC, 2014). En Chile, algunas estimaciones respecto al costo asociado a la remediación de suelos, bordea un mínimo de 50.000.000 de pesos chilenos, dentro de los cuales se consideran etapas como la caracterización del suelo, evaluación de riesgo, remoción de tierras, materiales, transporte y disposición, especialistas y mano de obra (Hidalgo, et al., 2016). La variabilidad del costo se encuentra sujeta a la complejidad de cada proyecto, en función del área geográfica, volúmenes, condición del suelo, y tecnologías de remediación seleccionadas (Fundación Chile, 2013).

Por esta razón, evaluar el riesgo derivado de la exposición a contaminantes es relevante para la gestión suelos contaminados, ya que nos permite confirmar o descartar la presencia de un nivel de riesgo, y esto a su vez nos da la posibilidad de asignar el nivel de prioridad que requiere el sitio específico para ser intervenido y así destinar los recursos de una manera más eficaz en función de la salud de la población.

Actualmente, Chile no dispone de un estándar o norma primaria que reglamente concentraciones máximas (mg/kg) de contaminantes y/o niveles límites permitidos en parámetros de suelos; por lo que, en virtud de la normativa vigente, no sería posible hablar de contaminación del suelo en el territorio. Si bien existen normas que regulan la calidad de lodos para su disposición en suelos (NCh2952 Of.2004), o también la calidad en la producción de compost a partir de residuos industriales (NCh2880 Of.2004), se hace necesaria una política y ley especializada en suelos, debido a los distintos usos que existen en el territorio, muchas veces incompatibles debido, entre otras cosas, a los residuos generados.

El 24 de noviembre del año 2021, ingresa en la Cámara del Senado un proyecto de Ley de Suelos, que establece normas primarias de suelo entre otros aspectos. El proyecto de Ley Marco de Suelos fue aprobado en general con fecha 12 de enero 2022 y actualmente se encuentra en plazo para presentar indicaciones. Esta Ley Marco de Suelos, pone de manifiesto los principales problemas de degradación que han sufrido los suelos en Chile, tanto degradación física, como química y biológica, y pretende sentar las bases sobre la protección y garantías que requiere por su función ecológica. En este contexto, apunta a cuatro aspectos fundamentales como focos de gestión; 1) Ordenamiento Territorial; 2) Contaminación del suelo; 3) Pérdida de los suelos/erosión; y 4) Cambio Climático. En el caso de la contaminación del suelo, hace énfasis en la que es producida como

consecuencia de actividades antropogénicas, que va en desmedro de la salud y de la calidad del suelo, destacando la necesidad de prevención de la contaminación de suelos, ya que, se considera que “ella impacta directamente en la calidad y cantidad de producción de alimentos; salud y bienestar de la población” (Comisión de Agricultura del Senado, 2022). En la mayoría de los casos de legislación internacional se aplica un enfoque basado en el riesgo a la salud (Azam, 2016). No obstante, ante una actual ausencia de normas de calidad ambiental, el Reglamento del SEIA, en su artículo N°11 establece que “las normas de calidad ambiental y de emisión que se utilizarán como referencia para los efectos de evaluar si genera o presenta el riesgo indicado en la letra a) y los efectos adversos indicados en la letra b), serán aquellas vigentes en los siguientes Estados: República Federal de Alemania, República de Argentina, Australia, República Federativa de Brasil, Confederación de Canadá, Reino de España, Estados Unidos Mexicanos, Estados Unidos de Norteamérica, Nueva Zelandia, Reino de los Países Bajos, República de Italia, Japón, Reino de Suecia y Confederación Suiza” (Sistema de Evaluación e Impacto Ambiental, 2013).

El presente trabajo pretende realizar, a través de guías elaboradas por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA de EE.UU.) una evaluación y caracterización de riesgos, utilizando los valores de concentración de muestras extraídas de suelo superficial por los autores 1) Jara & Lattapiat, 2013; y 2) Berho, 2015, durante el año 2013, en algunos sectores de la provincia de Copiapó, concluyendo si la exposición crónica a los niveles de contaminantes obtenidos en la matriz suelo de dichos sectores, representa un potencial riesgo de efectos cancerígenos y/o no cancerígenos a la salud de la población expuesta.

## **1.1. Evaluación de Riesgos por exposición a contaminantes**

El estudio de evaluación de riesgo comienza con la identificación de los mecanismos potenciales de liberación, migración y destino ambiental de los elementos potencialmente contaminantes de interés originados en la fuente. En el caso estudio, contaminantes metálicos.

### **1.1.1. Modelo Conceptual de Exposición**

Se conoce como modelo conceptual a la descripción gráfica del sistema ambiental y de los procesos físicos, químicos y biológicos que determinan el transporte de contaminantes desde la fuente, a través de los medios que componen el sistema, hasta los potenciales receptores que forman parte de él. Es decir, el modelo conceptual es una representación esquemática integrada, de la información recopilada acerca de fuentes de elementos y compuestos potencialmente contaminantes, los mecanismos de liberación, migración y destino ambiental de los mismos, y los puntos de contacto con los receptores hipotéticos identificados.

### **1.1.2. Factores de Exposición**

Los factores de exposición humana son variables que describen características biológicas y

fisiológicas del receptor humano, que están relacionadas con el ingreso de contaminantes al organismo. Se consideran en esta sección factores tales como el volumen de aire inspirado por hora o por día, la superficie dérmica de cada sujeto de estudio (infantes, adolescentes, adultos) la absorción dérmica por día, el peso corporal. Existe amplia información respecto a los valores máximos, mínimos, medianos y variables que definen los factores de exposición.

### **1.1.3. Dosis de Exposición**

Los algoritmos son expresiones matemáticas usadas para estimar la cantidad de contaminante presente en la matriz ambiental que puede ingresar al interior del organismo, que se define como dosis, según las ecuaciones entregadas en la Guía Metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes.

La exposición de un receptor genérico a un contaminante en las condiciones de un escenario definido, se expresa en términos de dosis/ingesta del mismo a través de cada una de las rutas de exposición que sean relevantes para el escenario en cuestión.

La ingesta media diaria es la mejor estimación posible de la exposición media a lo largo de un tiempo determinado. Esto significa que no considera episodios excepcionales de alta contaminación y se supone que todos los días se siguen rutinas semejantes.

Para las diferentes vías de exposición, se han definido fórmulas específicas que adecúan los componentes de esta ecuación a las condiciones de cada matriz y analito, incluyendo además varios factores de ajuste.

### **1.1.4. Índice de peligrosidad Total (IPT) utilizado en la evaluación de riesgos crónicos**

Un Índice de Peligrosidad Total (IPT) es la suma de más de un índice de peligro (IP) para múltiples sustancias y/o múltiples vías de exposición. El IP es el cociente del nivel de exposición de una sola sustancia por un período de tiempo especificado (por ejemplo, crónico), y la dosis de referencia para la misma sustancia derivada de un período de exposición similar.

El IPT es una estimación del índice de peligro para contaminantes crónicos no cancerígenos en las personas expuestas asociadas con el problema de contaminación en estudio.

### **1.1.5. Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV)**

El significado e interpretación del riesgo de cáncer es diferente al del Índice de Peligrosidad, y obedece a los conceptos descritos a continuación.

Riesgo basal (o background) de cáncer. Es aquel que se atribuye a una serie de causas acumulativas indeterminadas (radiación, genéticas, ambientales, etc.). Por ejemplo, en la población de los EE.UU. se estima que aproximadamente una de cada cuatro personas

contrae algún tipo de cáncer en su vida, incluyendo que sea cáncer tratable, reversible, o letal.

Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV). También llamado riesgo incremental o adicional de cáncer, en inglés corresponde a la expresión “lifetime extra cancer risk.”. El Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) es el límite superior de la probabilidad de que una persona va a contraer cáncer (ya sea tratable o letal) durante su vida entera, entre todas las personas expuestas de por vida a una concentración promedio del contaminante, y por encima de la probabilidad basal normal de contraer cáncer. El riesgo extra se atribuye a una causa específica. Se denomina riesgo “extra” de cáncer porque es un riesgo asociado al problema de contaminación, y por lo tanto es “extra” o “adicional” al riesgo normal basal de cáncer que tiene cada persona determinada o específica. Debido a las precauciones incluidas en el proceso de estimación, puede esperarse que el riesgo verdadero de cáncer sea inferior al calculado, sin embargo, no hay evidencia científica para esperar que fuese mayor.

Nivel riesgo aceptable (de minimis): Un nivel de riesgo aceptable es aquel que se juzga poco significativo como para ser de preocupación social, o como para justificar el uso de recursos de gestión de riesgo para su control. Corresponde a riesgo de cáncer considerado sin significado biológico o sin significado estadístico. Para los propósitos de reglamentación ambiental y su cumplimiento, como también para consideraciones políticas generales, en los EE.UU un RECV de uno en un millón ( $1:1.000.000 = 1E-6$ ) o menos es en general considerado estar por debajo de un nivel de riesgo significativo (aceptable).

En el caso de los contaminantes con efectos cancerígenos, también conocidos como contaminantes sin umbral tóxico definido, la estimación del riesgo asociado, se lleva a cabo usando procedimientos similares a los del índice de peligrosidad.

La integración de los resultados obtenidos de la evaluación de la exposición y perfiles de toxicidad de los contaminantes, permite caracterizar el riesgo extra de cáncer de por vida (RECV).

Para sustancias cancerígenas por la vía oral o dérmica se usa el Factor de Potencia Cancerígena (FPC), también denominado Factor de Pendiente. Para sustancias cancerígenas por la vía de inhalación la U.S.EPA recientemente ha recomendado que para estimar el riesgo se use la concentración aérea del cancerígeno, y el Factor de Riesgo Unitario (FRU).

---

## **2. Pregunta de investigación o hipótesis**

¿Representaron las concentraciones de contaminantes como Cd, Cr, Cu, Mn, Mo, Pb, Zn y As contenidas en la matriz suelo, un riesgo de efectos cancerígenos y/o no cancerígenos para los habitantes de los sectores muestreados?

## **3. Objetivos**

### **3.1. Objetivo General**

Evaluar el riesgo, retrospectivo, de efectos cancerígenos y no cancerígenos que representa la exposición a las concentraciones de contaminantes contenidas en la matriz suelo de los sectores muestreados, para los habitantes de dichos sitios.

### **3.2. Objetivos Específicos**

- 3.2.1. Elaborar un modelo conceptual de escenarios de exposición, basados en supuestos representativos del Caso Estudio.
- 3.2.2. Identificar el peligro de los contaminantes Cd, Cr, Cu, Mn, Mo, Pb, Zn y As, presentes en la matriz suelo muestreada durante estudios previos, y las relaciones dosis-respuesta respectivas.
- 3.2.3. Caracterizar el riesgo por efectos cancerígenos y no cancerígenos según el escenario de exposición propuesto.

#### **4. Metodología.**

##### **4.1. Elaborar un modelo conceptual de escenarios de exposición**

De acuerdo con los datos disponibles y recopilados para los sectores muestreados, se buscó elaborar un modelo conceptual que describa las interrelaciones con respecto tanto a las fuentes de contaminantes en el ambiente, las posibles vías de exposición y finalmente a los receptores potencialmente expuestos.

###### **4.1.1. Estudio del área muestreada**

A través de revisión bibliográfica y a modo de contextualizar el panorama local de los sectores muestreados se resumió la relevancia histórica que ha tenido la actividad minera en la zona, además de describir las condiciones ambientales como el medio físico, el recurso hídrico y la climatología de la región.

###### **4.1.2. Estudio de los receptores**

A través de revisión bibliográfica se identificaron los aspectos demográficos, socioeconómicos, y los hábitos de riesgo de los habitantes de la Región de Atacama, donde se encuentran ubicados los distintos sectores muestreados (Población Rosario, El Palomar, La Viñita, Paipote y Tierra Amarilla).

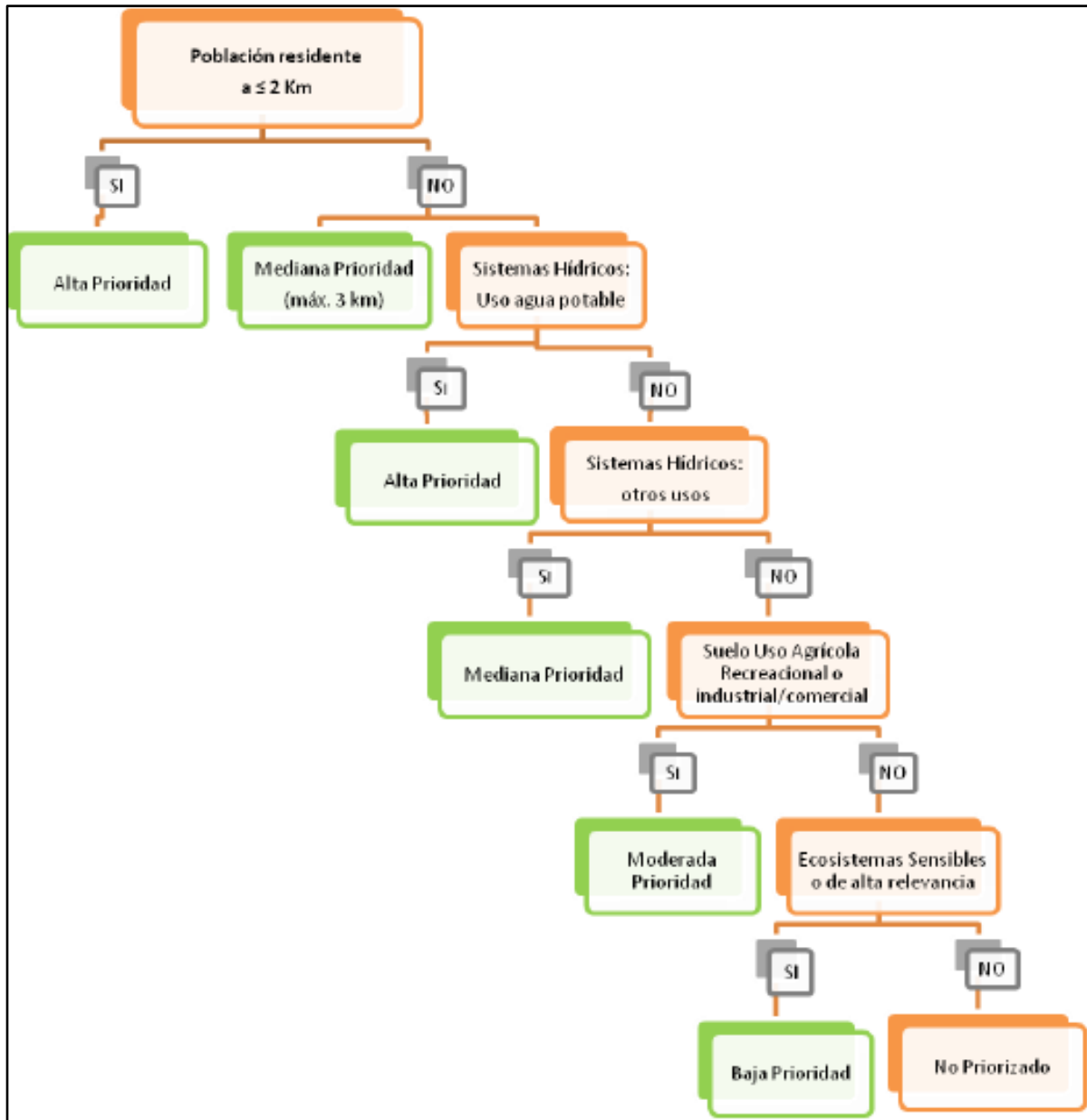
###### **4.1.3. Análisis de la información**

Considerando que este es un estudio retrospectivo, donde las muestras se obtuvieron el año 2013 en distintos sectores de la Región de Atacama, se comprobó bajo las metodologías disponibles actualmente, la asertividad en la selección de dichos sectores, según los antecedentes recopilados bibliográficamente. Pudiendo de esta manera, además verificar la correcta priorización y jerarquización de dichos sectores a evaluar.

###### **4.1.4. Priorización de los sectores muestreados**

Se comprobó el nivel de prioridad que requerían los sectores muestreados según la Guía Metodológica de Gestión de Suelo con Potencial Presencia de Contaminantes de Chile, la cual propone un criterio guiado por el siguiente diagrama, presentado en la **Ilustración nº 1**.

Ilustración nº 1: **Árbol de decisión general para la priorización de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC).**



Fuente: Guía Metodológica para la gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes, 2012.

#### **4.1.5. Jerarquización de los sectores muestreados**

Siguiendo las directrices de la Guía Metodológica de Gestión de Suelo con Potencial Presencia de Contaminantes de Chile, se procedió a jerarquizar la necesidad de gestión de los distintos sectores muestreados, asignando un valor final que pondera en función de la certeza de la fuente de contaminación, el tipo de contaminante, la(s) posible(s) vía(s) de exposición, y la cercanía de la potencial población expuesta a dicha(s) fuentes.

#### **4.1.6. Formulación del Modelo Conceptual**

En base a los antecedentes recopilados, se elaboró un modelo conceptual que pudiera representar de manera esquemática el problema a partir de los datos disponibles, considerando las limitaciones e incertidumbres inherentes a tales datos. Guardando especial cuidado en las consideraciones y suposiciones, ya que la fiabilidad de las conclusiones que se obtengan de los análisis depende de la representatividad del modelo conceptual.

Las incertidumbres en cuanto a toxicidad específica por el estado de valencia del contaminante, la biodisponibilidad y otros factores, se tratarán asumiendo la condición más protectora, para que, en cualquier caso, el sesgo se incline a sobrestimar el riesgo en lugar de subestimarlos.

Las vías de ingreso al organismo consideradas en el estudio serán vía oral por ingesta involuntaria de suelo, y la vía inhalatoria, por resuspensión de partículas (US EPA, 2004).

En cuanto a los factores de exposición, la tasa de ingesta de suelo en niños, duración de la exposición residencial en niños, tasa de inhalación, peso y área corporal en niños, adolescentes y adultos se basó en el U.S. EPA Exposure Factors Handbook (2011a). La tasa de ingesta y duración de la exposición en adultos, escenario residencial, se basó en U.S: EPA, 1991.

### **4.2. Identificación de los contaminantes**

#### **4.2.1. Muestreo, tratamiento y análisis químico durante estudio previo**

Durante un estudio previo, realizado el año 2013, se recolectaron y determinaron elementos traza en 67 muestras de suelo superficial, por lo que, para el desarrollo del presente estudio se dispone de valores de concentración de distintos elementos traza (arsénico (As), cadmio (Cd), cromo total (Cr), cobre (Cu), manganeso (Mn), Molibdeno (Mo), zinc (Zn) y plomo (Pb)), obtenidos en sectores específicos de la provincia de Copiapó.

La información obtenida de cómo se realizaron los muestreos, el tratamiento de estos y los posteriores análisis químicos respectivos fueron facilitados por la Dra. María Gabriela Lobos Valenzuela, directora de dos tesis de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Valparaíso, las cuales se desarrollaron durante el año 2013, en marco de Proyectos

Fonis. Por lo que, el muestreo y análisis químico de las muestras sólo se presentan a modo informativo. El presente estudio, comienza a partir de estos valores para la evaluación de riesgos.

Todas las muestras fueron sometidas al retiro de fragmentos grandes, como piedras, hojas y sustancias presentes en el suelo por accidente, que no debían ser incluidas en el análisis químico. Todos estos fragmentos fueron retirados por un colador para cada suelo.

Posteriormente, las muestras fueron secadas en una estufa desecadora (DRYING OVEN, modelo DHG-9053<sup>a</sup>) a 40°C durante tres días.

Las muestras de suelo ya secadas fueron tamizadas a un tamaño de partícula de 38 µm, utilizando un tamiz de luz. Se obtuvieron aproximadamente 5 gramos de muestras, estas fueron almacenadas en recipientes plásticos limpios y secos con sus respectivas tapas rotuladas.

Posteriormente, para cada muestra, se pesaron 0,25 g en una balanza analítica (SHIMADZU AUX220) y agregaron agua regia (HCl y HNO<sub>3</sub> en proporción 3:1). Luego, este producto fue sometido a digestión ácida mediante la aplicación de radiación de microondas en un sistema de digestión con rotor de alta presión (Milestone ETHOS PLUS HPR-1000/10S) con programas de 25 minutos, dividido en dos tandas de 10 y 15 minutos.

Posteriormente, se procedió a determinar la presencia de elementos traza y arsénico. Para los primeros, se utilizó Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES) (OPTIMA 2000 DV, PERKIN ELMER). Con este fin, se midieron los siguientes elementos: Cd, Cr, Cu, Mn, Mo, Pb y Zn.

Para determinar Arsénico (As) total, se utilizó la técnica de Espectroscopia de Fluorescencia Atómica previa generación de hidruros (HG-AFS) (PS ANALYTICAL, Millenium System) (Jara & Lattapiat, 2013; Berho, 2015).

Estos valores serán utilizados en el presente estudio como valores representativos de los sitios muestreados para contrastar con los valores de referencia en la etapa final, que consiste en la caracterización del riesgo.

Durante el presente estudio, se utilizó el software ArcGIS en su versión 10.8 para visualizar la cantidad, disposición y distribución espacial de los muestreos realizados en los distintos sectores.

#### **4.2.2. Resultados de los análisis en el laboratorio**

Los resultados de los análisis químicos realizados en laboratorio durante el año 2013 fueron ordenados por sitios, dejando sólo aquellos resultados de muestreos realizados en suelos superficiales con uso residencial, detallando para cada punto muestreado una nomenclatura asociada al sector, las coordenadas, y los valores de concentración obtenidos por

contaminante (expresados en mg/kg).

#### 4.2.3. Estadística descriptiva

A través del software ProUCL 5.0, se generaron tablas informativas con la estadística descriptiva de los datos disponibles, incluyendo el límite superior del intervalo de confianza de la media aritmética al 95% de confianza (UCL), los distintos valores según percentiles, y el análisis de la distribución de los datos. Esto se realizó de manera independiente para cada sector.

En aquellos casos donde los valores de metales se presentaron por debajo del límite de detección, se les asignaron valores calculados utilizando una técnica de sustitución simple, sugerida por la EPA, mediante la siguiente ecuación:

**Ecuación nº 1: Técnica de Sustitución simple de valores por debajo del límite de detección.**

$\text{Valor de reemplazo} = \text{Límite de Detección} / \sqrt{2}$
---

#### 4.2.4. Perfil de toxicidad de los metales muestreados

Los perfiles de toxicidad se obtuvieron por revisión de la base de datos IRIS de la USEPA y la ATSDR.

#### 4.2.5. Criterios de toxicidad de los contaminantes de riesgo potencial

Esta etapa del estudio también se conoce como la caracterización de la dosis-respuesta. Para estimar la exposición y el riesgo, es necesario recolectar información completa acerca de la toxicidad cualitativa y cuantitativa para cada contaminante. Los criterios de toxicidad para los contaminantes en estudio, se identificaron en la base de datos IRIS de la US.EPA, en: [www.epa.gov/iris/](http://www.epa.gov/iris/), para posteriormente generar una tabla resumen.

### 4.3. Caracterizar el riesgo por efectos cancerígenos y no cancerígenos según escenario de exposición propuesto

En esta etapa se integran los resultados de la identificación del peligro, la evaluación de la exposición, y la evaluación de la relación dosis-respuesta, con el fin de estimar la probabilidad de efectos negativos crónicos y/o cancerígenos.

#### 4.3.1. Selección de Factores de Exposición

La selección de los Factores de Exposición del presente estudio se obtuvo utilizando como guía la información a través de los valores de factores de exposición humana disponible en el documento Exposure Factors Handbook: 2011 Edition. EPA /600/R-090/052F.

#### 4.3.2. Cálculo de las Dosis de Exposición

Para los cálculos de las Dosis de Exposición en este estudio, se utilizaron las fórmulas dispuestas por la EPA en función de las vías de exposición identificadas en el modelo conceptual, determinando una dosis diaria promedio anual (DDPA), la dosis diaria promedio de por vida (DDPV), concentración diaria promedio anual (CDPA) y la concentración promedio de por vida (CDPV). A continuación, el factor de emisión de partículas y los valores considerados como fracción de absorción por contaminante según vía de ingreso.

La dosis de ingestión involuntaria de metales y arsénico en suelo se calculó mediante la **Ecuación nº 2**.

##### **Ecuación nº 2: Cálculo de Dosis Diaria Promedio por vía oral.**

$$DDPx - \text{oral} = (Cs \times Tx \times FC \times BDx \times FE \times DE) / (PCx \times TPx)$$

La concentración de exposición calculada a partir de la inhalación de partículas re-suspendidas del suelo se calculó mediante la **Ecuación nº 3**.

##### **Ecuación nº 3: Cálculo de Concentración Diaria Promedio por vía inhalatoria.**

$$CDPx - \text{inh} = (Cs \times FDP \times EV \times FEx DE) / (FEP \times PCx \times TPx)$$

**Tabla nº 1: Fracción de contaminante absorbida por vía oral e inhalatoria.**

Elemento	Factor de Emisión de Partículas (PEF)	ABS oral	ABS inhalatoria
Arsénico	1,36E+09	1	1
Cadmio	1,36E+09	0,05	1
Cromo VI	1,36E+09	0,025	1
Cobre	1,36E+09	1	1
Manganeso	1,36E+09	0,04	1
Molibdeno	1,36E+09	1	1
Plomo	1,36E+09	1	1
Zinc	1,36E+09	0,04	1

Fuente: US.EPA, 2016. Regional Screening Levels, Resident Soil Table.

Donde:

PEF (m<sup>3</sup>/kg): Factor de emisión de partículas

ABSoral: Fracción del contaminante absorbido por el tracto gastrointestinal (adimensional).

ABSinhal: Fracción del contaminante absorbido por la vía respiratoria (adimensional).

Los factores de exposición, valores de bioaccesibilidad y las ecuaciones obtenidas de U.S. EPA (2004) y U.S EPA (2001b), se presentan a continuación:

#### 4.3.2.1. Dosis de exposición por ingestión involuntaria de suelo

La dosis de ingestión involuntaria de metales y arsénico en suelo se calcularon mediante la Ecuación nº2.

Los valores de parámetros ingresados en la Ecuación nº 2: Cálculo de Dosis Diaria Promedio por vía oral. fueron los siguientes:

**Tabla nº 2: Parámetros considerados en el cálculo de la DDPx por vía oral.**

PARÁMETRO	VALOR	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
DDPx - oral	-	Dosis diaria promedio anual/de por vida – oral	mg (Kg-día)-1
Cs	-	Concentración en suelo	mg Kg suelo-1
Tx		Tasa ingestión suelo	
	100	Tasa ingestión suelo adultos	mg día-1
	100	Tasa ingestión suelo adolescente	mg día-1
	200	Tasa ingestión suelo niños	mg día-1
FC	1,00E-06	Factor de conversión	Kg mg-1
BDX		Biodisponibilidad oral	
	1,00	Bioaccesibilidad Cd	Adimensional
	0,57	Bioaccesibilidad Cr	Adimensional
	0,84	Bioaccesibilidad Cu	Adimensional
	0,36	Bioaccesibilidad Mn	Adimensional
	1,00	Bioaccesibilidad Mo	Adimensional
	0,96	Bioaccesibilidad Pb	Adimensional
	0,79	Bioaccesibilidad Zn	Adimensional

	0,49	Bioaccesibilidad As	Adimensional
FE	365	Frecuencia de exposición	Días año-1
DE		Duración de la exposición	
	30	Duración de la exposición - adultos	Años
	9	Duración de la exposición - adolescentes	Años
	8	Duración de la exposición - niños	Años
PCx		Peso corporal	
	70	Peso corporal adultos	Kg
	48	Peso corporal adolescentes	Kg
	16	Peso corporal niños	Kg
TPx		Tiempo ponderado	
	10950	Tiempo ponderado – adultos – no carc.	Días
	25550	Tiempo ponderado – adultos – carc.	Días
	3285	Tiempo ponderado – adolescentes – no carc.	Días
	25550	Tiempo ponderado – adolescentes – carc.	Días
	2920	Tiempo ponderado – niños – no carc.	Días
	25550	Tiempo ponderado – niños – carc.	Días

#### 4.3.2.2. Dosis por inhalación de partículas en polvo resuspendido

La concentración de exposición calculada a partir de la inhalación de partículas resuspendidas del suelo se calcularon mediante la **Ecuación nº 3: Cálculo de Concentración Diaria Promedio por vía inhalatoria.**, utilizando los valores que se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla nº 3: Parametros considerados en el cálculo de la CDPx por vía inhalatoria.**

PARÁMETRO	VALOR	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
CDPx - inh	-	Conc. diaria promedio anual/de por vida – inhalat.	mg (m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>
Cs	-	Concentración en suelo	mg Kg suelo <sup>-1</sup>
FDP	0,25	Fracción inhalada depositada en pulmón	Adimensional
EV	1	Eventos por día	Día <sup>-1</sup>
FE	365	Frecuencia de exposición	Días año <sup>-1</sup>
DE		Duración de la exposición	
	30	Duración de la exposición – adultos	Años
	9	Duración de la exposición - adolescentes	Años
	8	Duración de la exposición – niños	Años
FEP	1,4E-9	Factor de emisión de partículas	m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup>
PCx		Peso corporal	
	70	Peso corporal adultos	Kg
	48	Peso corporal adolescentes	Kg
	16	Peso corporal niños	Kg
TPx		Tiempo ponderado	
	10950	Tiempo ponderado – adultos – no carc.	Días
	25550	Tiempo ponderado – adultos – carc.	Días
	3285	Tiempo ponderado – adolescentes – no carc.	Días
	25550	Tiempo ponderado – adolescentes – carc.	Días
	2920	Tiempo ponderado – niños – no carc.	Días
	25550	Tiempo ponderado – niños – carc.	Días

En base a lo anterior, se obtuvieron las dosis y concentraciones de exposición para cada uno de los sectores muestreados, especificando el contaminante y receptor considerado en el modelo conceptual.

#### 4.3.3. Riesgos por exposición a plomo

La caracterización del riesgo por exposición al plomo, tanto en niños como en adolescentes y adultos se llevó a cabo separadamente de los otros contaminantes. En este caso el riesgo se estima como nivel de plomo en la sangre asociado con una exposición al plomo que ingresa al organismo simultáneamente por las vía oral, inhalación y dérmica. La US.EPA recomienda el uso del modelo Integrated Exposure Uptake Biokinetic Model for Lead in Children (IEUBKwin), v.1.1 (2010) en vez de usar estimaciones de exposición o mediciones de plomo sanguíneo.

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

**Ecuación nº 4: Estimación de concentración de Pb en aire.**

$$CPb \text{ en el aire} = CPb \times (1/PEF)$$

Donde:

CPb: Concentración de Pb P95 en suelo.

PEF: Factor de emisión de partículas (US.EPA).

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

**4.3.4. Determinación de los Índices de Peligro por efectos no cancerígenos**

La integración de los resultados obtenidos de la evaluación de la exposición y perfiles de toxicidad de los contaminantes de interés, permite caracterizar el riesgo no cancerígeno a través del Índice de Peligro. Para los riesgos crónicos, se utilizó un nivel de índice de peligrosidad igual a 1 como referencia para representar un valor de riesgo no significativo.

Del cociente entre las dosis de exposición estimadas para las distintas vías (ingestión e inhalación) obtenidas a través de la aplicación de los algoritmos detallados con anterioridad y la dosis de referencia correspondiente, se obtiene el Índice de Peligro, con las contribuciones por cada contaminante y vía de exposición, para cada receptor y escenario de exposición.

**Ecuación nº 5: Cálculo de índices de peligro.**

$$IP = \sum \frac{\text{Dosis calculada por vía de ingreso}}{\text{Dosis de Referencia por vía de ingreso}}$$

Y para ponderar el Índice de Peligro Total (IPT), la fórmula utilizada para calcular el Índice, fue la siguiente:

**Ecuación nº 6: Ponderación de Índices de Peligro Total (IPT).**

$$IPT = IP \text{ ingestión} + IP \text{ inhalación}$$

**4.3.5. Determinación del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV)**

Para la determinación del RECV se utiliza el modelo clásico de caracterización del riesgo aplicado a sustancias carcinogénicas y genotóxicas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA) y la Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de

Enfermedades (ATSDR), el cual se basa en el cálculo del riesgo incremental (o extra) de cáncer debido a la exposición de por vida a uno o varios compuestos, valor que debe ser contrastado contra el nivel de riesgo aceptable.

El RECV se estimó usando la Dosis Diaria Promedio de por Vida (DDPV) estimada para cada contaminante cancerígeno por cada vía de exposición, y multiplicada por el respectivo criterio de toxicidad.

**Ecuación nº 7: Cálculo de la Dosis Diaria Promedio de por Vida.**

$$\text{DDPV} \times (\text{FPC o FRU}) = \text{RECV}$$

Dónde:

FPC = Factor de Potencia Cancerígena

FRU = Factor de Riesgo Unitario

En consecuencia, en este estudio un valor menor a  $1 \times 10^{-6}$  se consideró como nivel de riesgo aceptable para efectos cancerígenos, lo que en términos estadísticos hace referencia a que son aceptables las probabilidades de que 1 en 1.000.000 de individuos puedan contraer cáncer debido a la exposición a determinados niveles de alguna sustancia.

## 5. Resultados

### 5.1. Elaborar un modelo conceptual de escenarios de exposición

#### 5.1.1. Estudio del área muestreada

##### 5.1.1.1. *Estudio del medio físico, recurso hídrico y climatología*

La Región de Atacama corresponde a una zona vegetal desértica acorde a un clima predominante de tipo desértico, que se atenúa de norte a sur debido al aumento de precipitaciones. La variación térmica incrementa de oeste a este. Cercano a la cordillera de los Andes, el clima se vuelve desértico frío alcanzando características de tundra en las zonas con mayor altitud. En la costa se da lugar el fenómeno conocido como camanchaca, una neblina copiosa características de las costas del norte

La cuenca del Río Copiapó se encuentra ubicada en la Provincia de Copiapó y tiene una extensión de alrededor de 18.400 km<sup>2</sup>, la cual abarca las comunas de Copiapó, Caldera y Tierra Amarilla. Generalmente sólo se activa después de fuertes lluvias. No obstante, la tasa de precipitación aumenta considerablemente hacia la cordillera, por eso los ríos tributarios como Pulido, Cachito y Montosa mantienen un buen caudal durante todo el año. En su trayectoria aguas abajo, el Río Copiapó pierde su caudal por razones naturales como evaporación y filtración, y también por actividades antropogénicas como la agronomía, minería y el bombeo de agua potable para distintos fines (DGA, 2003).

Según el estudio denominado: “Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad, Cuenca Río Copiapó” tanto las aguas superficiales como las subterráneas presentarían una calidad natural buena, teniendo altas concentraciones de algunos metales debido a la geología del lugar. Sin embargo, esta calidad empeora mientras el Río atraviesa la ciudad de Copiapó principalmente debido a los aportes de metales atribuidos a la actividad minera y al aumento de la lixiviación de las sales de los suelos debido a la tala del matorral, sumado a que en eventos aislados las crecidas importantes, arrastran parte de los relaves que se encuentran en la ribera del mismo o inclusive más distante, generando gran incorporación de material al cauce y al sedimento depositado en el lecho del río (CADE-IDEPE, 2004).

Además de la recurrencia de grandes desastres en Chile asociada principalmente a fenómenos sísmicos y volcánicos, también sufre otros tipos de desastres a escala regional. Si bien, estos eventos son inusuales, existen registros históricos que evidencian ocurrencias periódicas.

En la **Tabla nº 4**, se presenta una revisión general de los diversos aluviones ocurridos en épocas anteriores.

**Tabla nº 4: Resumen aluviones históricos (recientes) en Atacama y sus mecanismos de precipitación (1980- 2017).**

Evento	Descripción	Mecanismo de precipitación	Fuente de consulta
<b>Aluvión 1980</b>	El 6 de abril se produjo un aluvión en el Valle Copiapó; evento con truenos y relámpagos. Múltiples aluviones ocurrieron a lo largo de la región y varias familias fueron evacuadas.	Fenómeno del Niño.	Vargas (2017) y DGA y CONAMA (2009)
<b>Aluvión 1983</b>	El 1 de Julio de 1983, se registró una inundación que afectó las ciudades de Copiapó, Chañaral, Salvador, Potrerillos, Diego de Almagro y Paipote, dejando un saldo de 85 damnificados en Chañaral y 186 en Copiapó. (Grijalba, 2016). Dichas inundaciones interrumpieron varias rutas por desbordes de agua y derrumbes.	Baja Segregada, sin Anticiclón de Bloqueo, con humedad transportada desde el trópico.	Grijalba (2016)
<b>Aluvión 1985</b>	El 14 de mayo de 1985, un violento aluvión, con un volumen total estimado de $5 \times 10^6$ m <sup>3</sup> , se precipitó por el valle del río Manflas, afluente del río Copiapó.	Influencia del invierno altiplánico.	DGA (1987)
<b>Aluvión 1997</b>	El día 12 de junio de 1997, un flujo de detrito ocurrido en la ciudad de Copiapó provocó la muerte de 7 personas y severos daños en la zona urbana, en sectores donde las quebradas de descarga estaban ocupadas por viviendas.	Lluvias asociadas a eventos del niño. (Castro et al., 2010)	DGA y CONAMA (2009) Semageomin (2017)
<b>Aluvión 2015</b>	El aluvión de Atacama 2015 fue provocado por un evento anómalo de precipitación en el norte semi e hiper árido de Chile, en la segunda mitad de marzo. Este evento consta de varias etapas y mecanismos que propiciaron un gran temporal que generó diversos aluviones e inundaciones en el norte, además de grandes nevazones en las zonas cordilleranas hasta la latitud de Santiago.	Baja segregada en la costa norte de Chile y anomalías positivas de TSM en Pacífico Occidental Tropical principalmente.	Bozkurt (2016) Semageomin (2015) ONEMI (2015)
<b>Aluvión 2017</b>	El 12 y 13 de mayo del 2017 una fuerte lluvia afectó al Norte Chico, provocando inundaciones en Chañaral y Copiapó nuevamente. Un 70% de los hogares quedó sin agua potable y empeoró la situación ambiental relativa a episodios de contaminación del aire.	Baja Segregada.	Semageomin (2017)

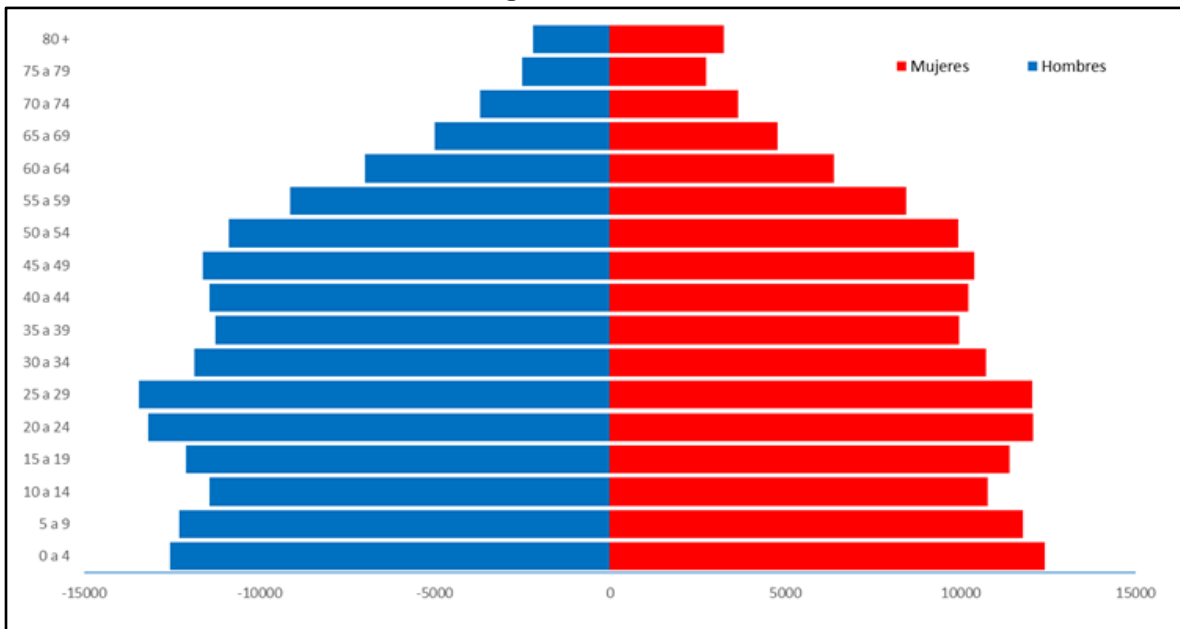
Fuente: Gestión del riesgo en Copiapó: hacia la construcción de una propuesta metodológica resiliente. Soto, 2019.

## 5.1.2. Estudio de los receptores

### 5.1.2.1. Aspectos demográficos

La población de la Región de Atacama alcanza los 320.799 habitantes al año 2017 (165.905 hombres y 154.894 mujeres). El Departamento de Estadística e Información de Salud en su informe del año 2017, refleja una población urbana, en transición, con cierta estabilidad en las tasas de natalidad, y un ligero aumento en la expectativa de vida, lo cual se puede observar en el **Gráfico nº 1**.

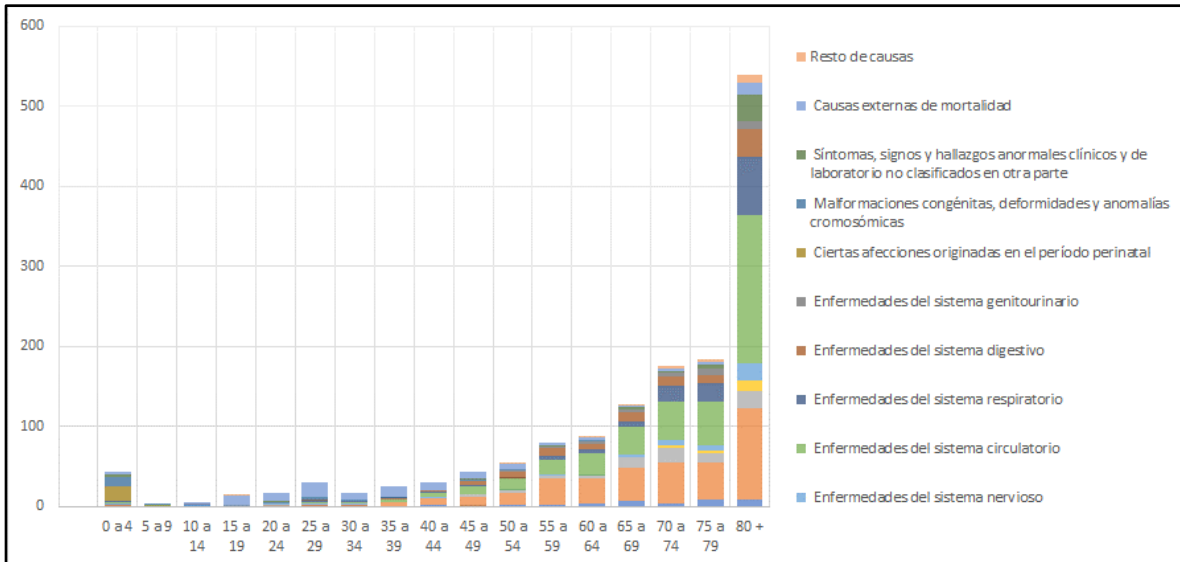
**Gráfico nº 1: Pirámide Poblacional estimada 2017 por grupos quinquenales de edad y sexo.  
Región de Atacama.**



Fuente: Elaborado a partir de datos disponibles del Departamento de Estadísticas de Información de Salud, en Indicadores Básicos de Salud (IBS, 2017).

En el **Gráfico nº 2**, puede observarse las causas de defunción por grupo etario en la región de Atacama, donde más del 60% de las defunciones para el año 2014 ocurrieron en los grupos etarios por sobre los 70 años. A nivel general las principales causas de defunción en orden decreciente fueron enfermedades del sistema circulatorio con un 27,6%, seguido por neoplasias con un 24,7%, enfermedades del sistema respiratorio (9,4%), causas externas de mortalidad (8,6%), enfermedades del sistema digestivo (6,7%), enfermedades endocrinas, nutricionales y metabólicas (5,2%), entre otras.

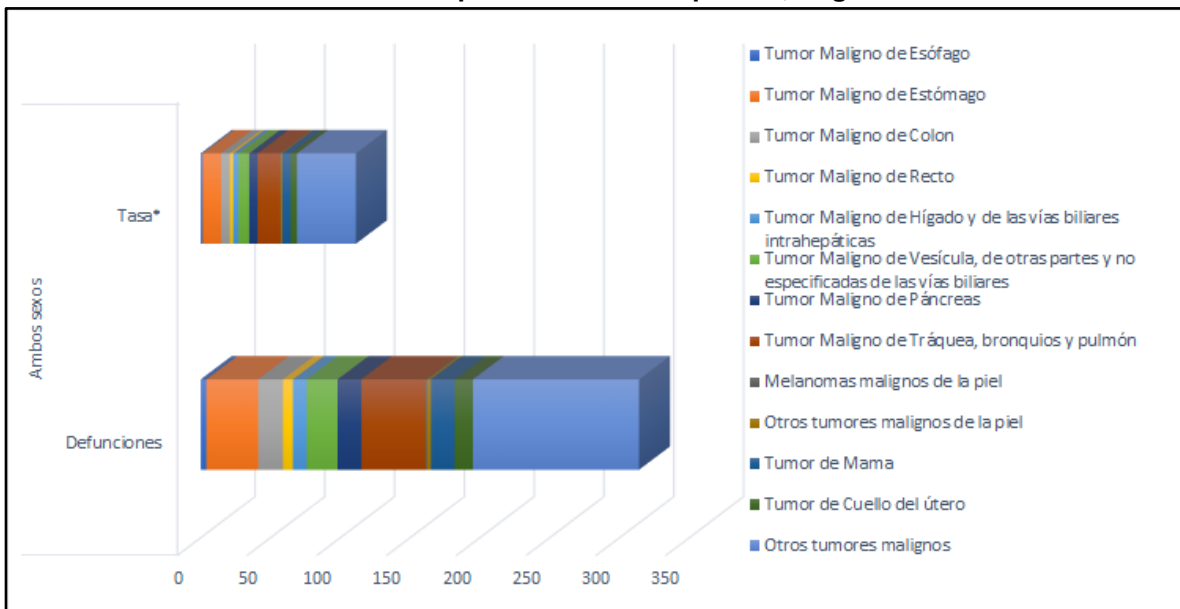
**Gráfico nº 2: Causas de defunciones según grupo etario. Región de Atacama, periodo 2014.**



Fuente: Elaborado a partir de datos disponibles del Departamento de Estadísticas de Información de Salud, en Indicadores Básicos de Salud (IBS, 2017).

En el **Gráfico nº 3**, se puede observar el detalle de defunciones a causa de neoplasias desde el año 2000 al 2011, donde la mayor cantidad de defunciones fue provocada por tumor maligno de Tráquea, bronquios y pulmón (16,3%), seguido del tumor maligno de estómago (13,1%), Tumor Maligno de Vesícula, de otras partes y no especificadas de las vías biliares (7,8%), Tumor Maligno de Colon (6,4%), Tumor de Mama (6,0%), Tumor Maligno de Páncreas (6,0%), Tumor de Cuello del útero (4,6%), entre otros.

**Gráfico nº 3: Gráfico nº: Mortalidad por causas de neoplasias, Región de Atacama 2000-2011.**



Fuente: DEIS-MINSAL. \* Tasa de mortalidad de "Todas las causas" por 1.000 habitantes y

tasas de mortalidad por causas específicas por 100.000 habitantes.

### 5.1.2.2. Aspectos socioeconómicos

Los niveles de pobreza multidimensional en la región de Atacama supera el promedio nacional en un 5,8%, mientras que el porcentaje de alfabetización, cobertura educacional, saneamiento de hogares, entre otros, se encuentra dentro de la media, como puede observarse en la **Tabla nº 5**.

De acuerdo con el Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS), Copiapó posee 45 establecimientos de salud a diciembre del 2020, destacando 13 centros de salud, 8 centros de salud familiar, 3 clínicas, 7 laboratorios clínicos dentales, 3 servicios de atención primaria de urgencia, y 4 vacunatorios entre otros. Según el boletín estadístico 2019 de la Biblioteca del Congreso Nacional, la población inscrita y validada para el financiamiento de la atención primaria de salud en establecimientos municipales corresponde a 118.622 habitantes (Biblioteca Congreso Nacional, 2021).

**Tabla nº 5: Indicadores Socioeconómicos de la región de Atacama y a nivel País.**

INDICADORES SOCIOECONÓMICOS	Porcentaje de hogares en situación de Pobreza Multidimensional	Porcentaje alfabetización (saber leer y escribir)	Porcentaje cobertura educacional total	Porcentaje hogares con saneamiento deficitario	Porcentaje personas percibe microbasurales en el barrio
REGIÓN DE ATACAMA	26,2%	96,5%	79,6%	4,4%	19,6%
TOTAL PAÍS	20,4%	96,2%	80,8%	4,9%	23,4%

Fuente: Diagnósticos Regionales en Salud con Enfoque en Determinantes Sociales, 2017.

En el caso de las áreas urbanas, los servicios básicos hacen referencia al acceso de los hogares al agua potable, mientras que en las áreas rurales se relaciona con aquellos hogares que posean una llave fuera de la vivienda y/o disponibilidad de servicio de eliminación de aguas servidas (solución diferente a W.C conectado a alcantarillado o fosa séptica) (Biblioteca del Congreso Nacional, 2021). El Sistema Integrado de Información Social con Desagregación Territorial (SIIT-T) del Ministerio de Desarrollo Social y Familia, indica que el 11,9% de los habitantes de la comuna de Copiapó carecen de servicios básicos a diciembre de 2020.

### 5.1.2.3. Factores de riesgo sanitario

De los habitantes de la Región de Copiapó, un 41,7% manifestó haber consumido tabaco durante el último mes, un 19,6% tener problemas con el alcohol, 10% consumieron marihuana durante el último año, un 1,8% consumió cocaína y/o pasta base durante el último

año, y un 89% fueron considerados personas sedentarias (DEIS, 2017). Los valores porcentuales son similares a los obtenidos a nivel país, como puede apreciarse en la **Tabla nº 6**.

**Tabla nº 6: Indicadores de Estilos de Vida de la región de Atacama y a nivel País.**

INDICADORES DE ESTILOS DE VIDA	Porcentaje de personas que consume tabaco último mes	Porcentaje bebedores problemas	Porcentaje de personas que consumió marihuana el último año	Porcentaje consumo cocaína total (cocaína + pasta base año)	Porcentaje personas sedentarias
REGIÓN DE ATACAMA	41,7%	19,6%	10%	1,8%	89,7%
TOTAL PAÍS	40,5%	17,6%	11,3%	1,7%	88,6%

**Fuente: Diagnósticos Regionales en Salud con Enfoque en Determinantes Sociales, 2017.**

### 5.1.3. Análisis de la información

El muestreo se realizó en sectores puntuales, no obedeciendo una grilla o metodología en específico, por lo que, los valores obtenidos no se pueden extrapolar a la provincia en general, sino solamente a los sectores especificados en este estudio. De igual manera, los resultados, discusiones y conclusiones obedecen a los supuestos establecidos en el modelo, considerando que tanto los valores detectados para cada sector muestreado como las condiciones de exposición por parte de los receptores se mantuvieran constantes en a lo largo de la vida de los individuos.

### 5.1.4. Priorización de los sectores muestreados

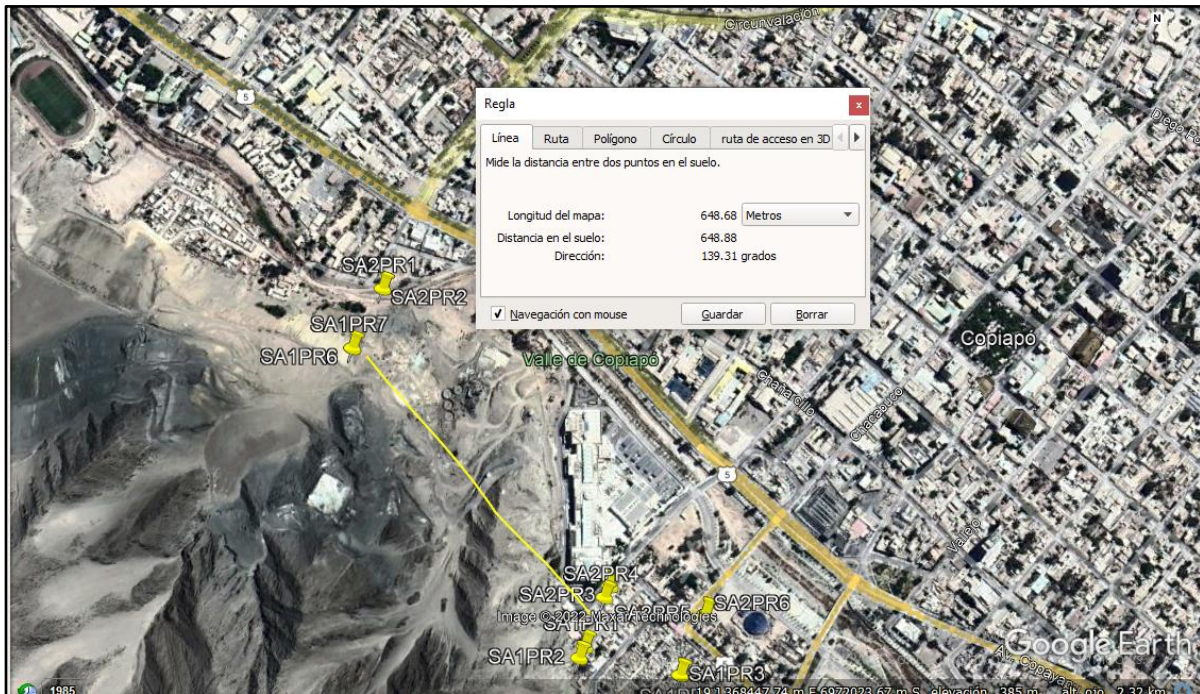
Considerando que los muestreos se realizaron previo al lanzamiento de la Guía Metodológica de Gestión de Suelo con Potencial Presencia de Contaminantes, la cual propone un árbol de priorización como el que se presenta en la , en el presente estudio, se siguieron los pasos de la Guía para identificar si bajo los criterios establecidos en esta, los 5 sectores muestreados alcanzarían algún nivel de priorización; Obteniendo como resultado que todos serían considerados como sitios de Alta Prioridad, ya que los focos de contaminación como depósitos de relave se encuentran a menos de 2 kilómetros de la población residente como se muestra en la **Tabla nº 7**.

**Tabla nº 7: Nivel de Priorización de intervención en sectores según criterios de la Guía Metodológica de Gestión de Suelo con Potencial Presencia de Contaminantes.**

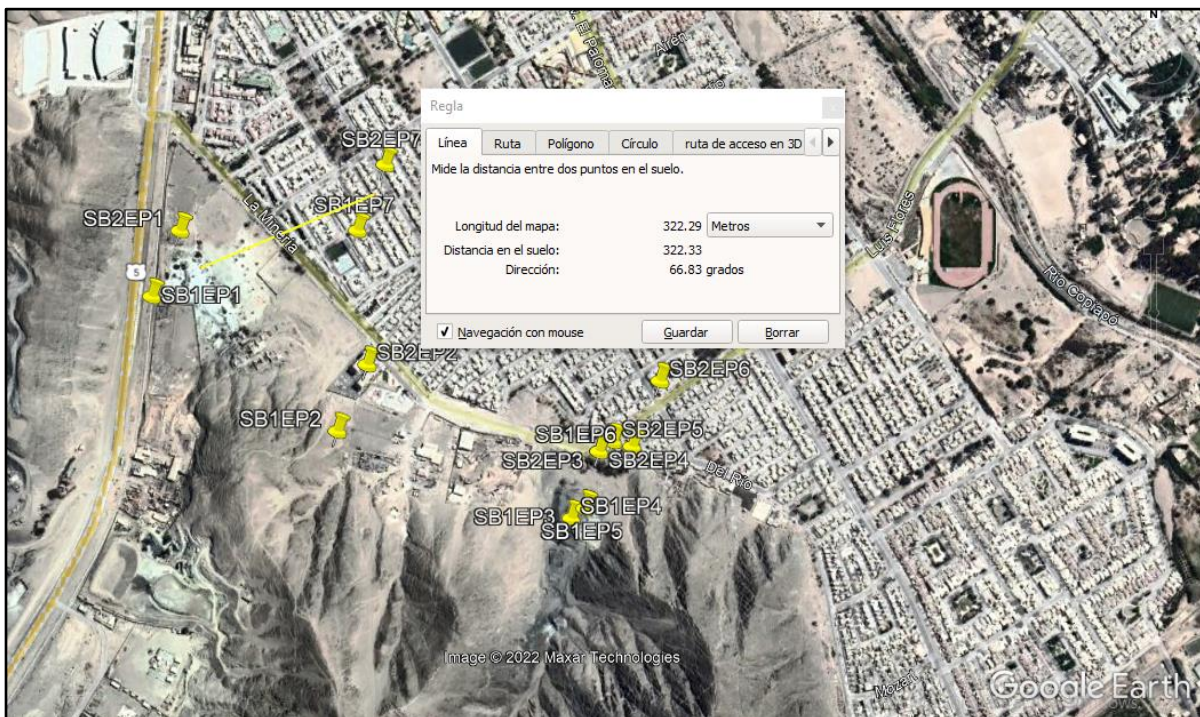
Sector	Población Residente a $\leq 2$ km	Sistemas Hídricos:	Sistemas Hídricos:	Suelo Agrícola, Recreacional,	Ecosistemas Sensibles o de	Nivel de Priorización

	de un foco de contaminación	Uso Agua Potable	Otros Usos	Industrial / Comercial	Alta Relevancia	
Población Rosario	<650 m	En algunos casos	Sí	Residencial	No	<b>Alta Priorización</b>
El Palomar	<350 m	En algunos casos	Sí	Residencial	No	<b>Alta Priorización</b>
La viñita	<700 m	En algunos casos	Sí	Agrícola	No	<b>Alta Priorización</b>
Paipote	<1500 m	En algunos casos	Sí	Residencial	No	<b>Alta Priorización</b>
Tierra Amarilla	<1000 m	En algunos casos	Sí	Residencial	No	<b>Alta Priorización</b>

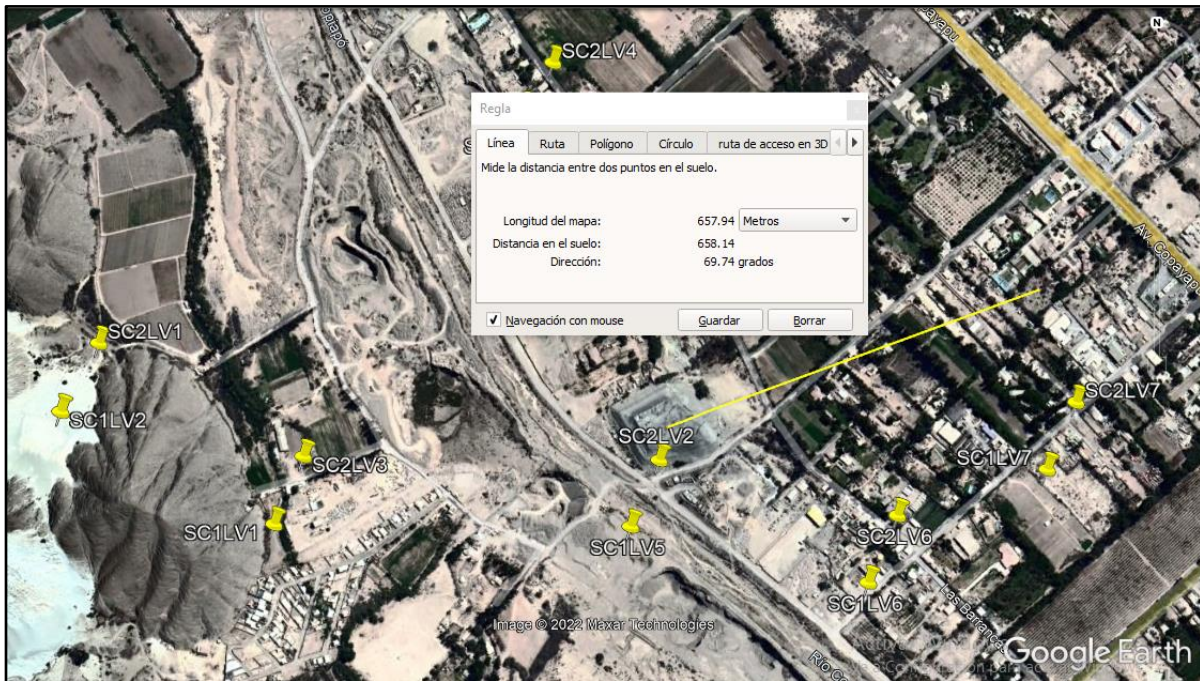
El detalle de las distancias entre los potenciales focos de contaminación y la población residente puede apreciarse en las siguientes imágenes:



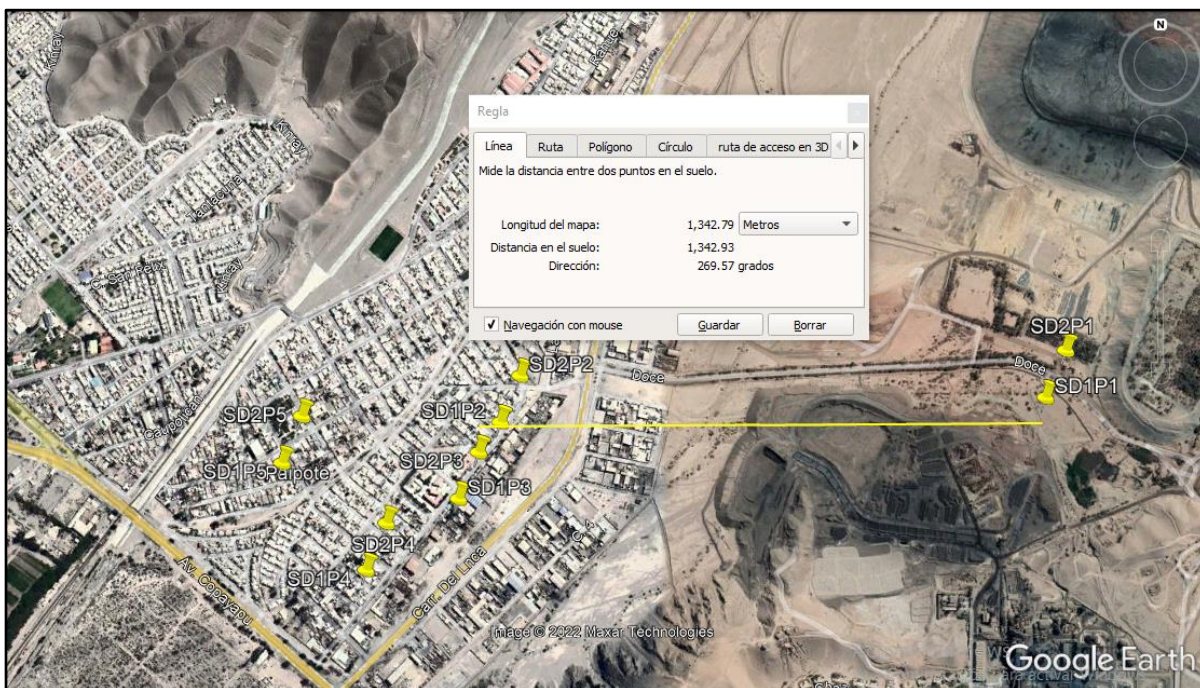
**Imagen nº 1: Distancia desde foco de contaminación a patio de Colegio, Sector Población Rosario.**



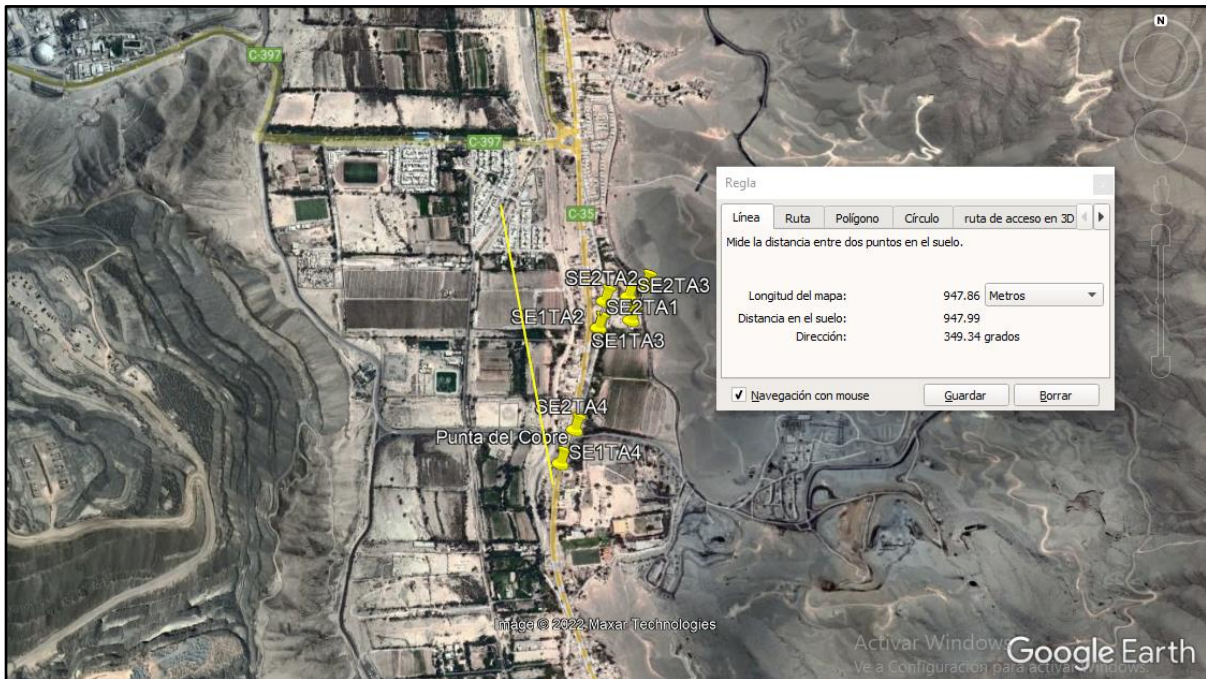
**Imagen nº 2: Distancia desde foco de contaminación al exterior de área residencial, Sector El Palomar.**



**Imagen nº 3: Distancia desde foco de contaminación al patio de residencia habitada, Sector la Viñita.**



**Imagen nº 4: Distancia desde foco de contaminación a espacio público de uso recreativo, Sector Paipote.**



**Imagen nº 5: Distancia desde foco de contaminación a área residencial, Sector Tierra Amarilla.**

### 5.1.5. Jerarquización de los sectores muestreados

La jerarquización efectuada a través de la información contenida en la ficha de inspección de suelos con potencial presencia de contaminantes para los 5 sectores, arrojó los siguientes puntajes:

- Fuente (F): con sospecha de fuente contaminante (0,5) asociada a contaminantes metálicos (0,1) = 0,6
- Ruta (Ru): agua subterránea de uso potable (0,2) + aire (0,2) + suelo (0,15) + agua de otros usos, riego (0,15) = 0,7
- Receptor (Re): población residente a menos de 2 km (0,6) + entre 10.000 – 1.000 habitantes (0,2) = 0,7
- Puntaje Total :  $((F + Ru + Re) * 100/3) = 70\%$

De acuerdo a estos resultados y el criterio de jerarquización presentado en la **Tabla nº 8**, los sitios serían considerados de alta jerarquía, confirmando la presencia de los tres elementos del riesgo (fuente-ruta-receptor).

Tabla nº 8: Categorización de Jerarquía de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes.

Puntaje	Descripción
0-30%	Baja jerarquía
30-60%	Mediana jerarquía
60-100%	Alta jerarquía

Fuente: Guía Metodológica para la gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes, 2012.

### 5.1.6. Formulación del Modelo Conceptual

#### 5.1.6.1. Determinación de las vías de exposición involucradas

Una vía de exposición consta de los siguientes cinco elementos:

1. Una fuente de contaminación,
2. transporte a través de un compartimiento ambiental,
3. un punto de exposición,
4. una ruta de exposición humana, y
5. un receptor

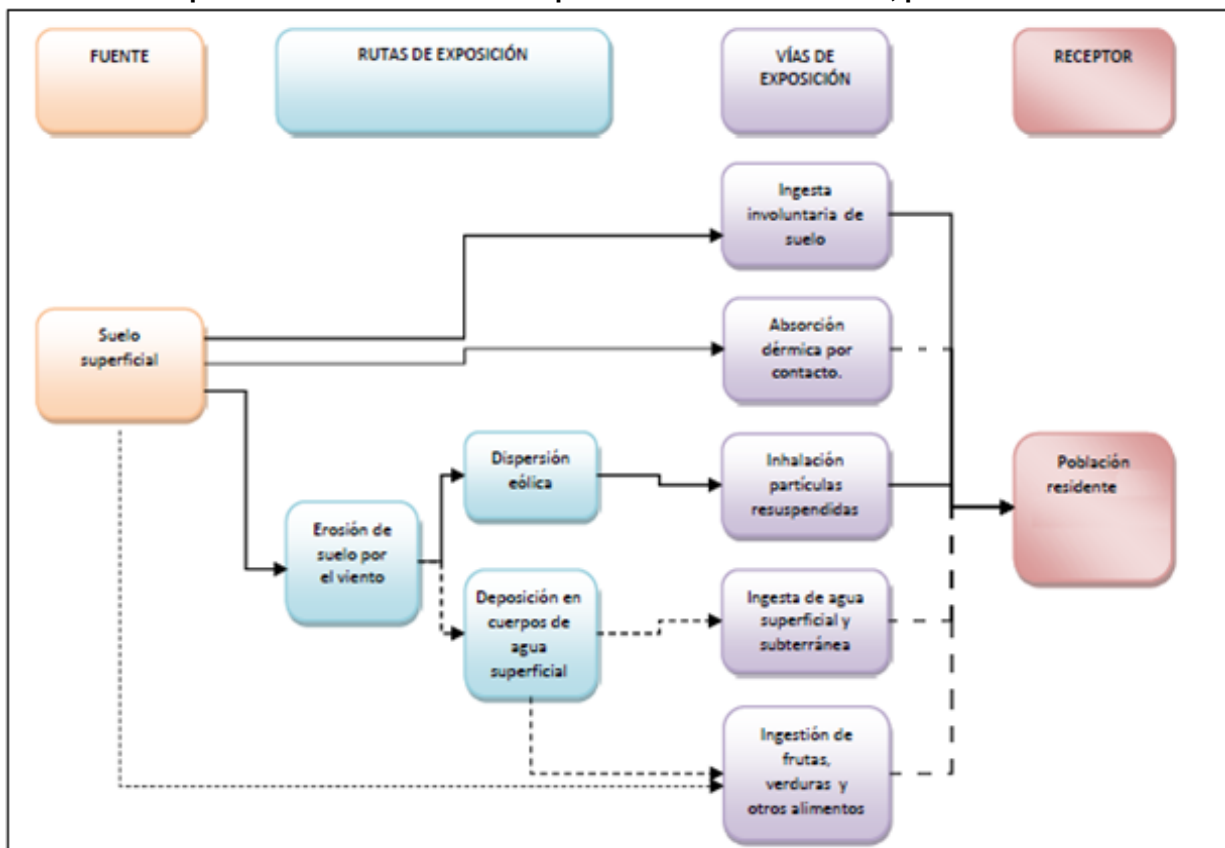
Dado el supuesto aumento generalizado de contaminantes en la superficie del suelo producto de la actividad minera de la zona y el aporte natural de procesos de movilización, retención e interacción del arsénico presente en la geosfera, el suelo de cada sector se definió como una fuente difusa de exposición, para el diseño del modelo conceptual.

La dispersión eólica de partículas de suelo fue considerada como mecanismo de transporte, mientras que su posterior inhalación y la ingesta involuntaria de suelo directo fueron considerados como vías de exposición para la hipótesis de exposición de la población residente en los distintos sectores. Las rutas y vía de exposición asociadas a la ingesta de agua potable y la ingesta de alimentos se han considerado como rutas incompletas de exposición dado que no se describen antecedentes que permitan asociar la presencia de metales y arsénico en el suelo de los distintos sectores con la ingesta de estos elementos a través de los alimentos o el agua potable. Se consideraron como receptores de manera independiente a niños, adolescentes y adultos habitantes de los 5 sectores.

En resumen, el modelo conceptual (**Ilustración nº 2**) consideró las siguientes vías completas de exposición para la población de los 5 sectores asociados a la exposición a metales y arsénico provenientes del suelo como fuente difusa:

- a) inhalación de material particulado con contenido de metales y Arsénico,
- b) ingestión involuntaria de suelo con la presencia de los Polimetales.

**Ilustración nº 2: Modelo conceptual para la evaluación de riesgos a la salud humana debido a la presencia de contaminantes para cada sector evaluado, periodo 2013.**



---

#### **5.1.6.2. Determinación y descripción de los escenarios de exposición**

De acuerdo a lo señalado anteriormente, se confeccionaron 3 escenarios genéricos de exposición para cada sector muestreado, considerando el percentil 95 determinado de los valores de concentración para cada agente en la matriz suelo en el horizonte de 0-20 cm. De esta forma, se puede consignar la exposición de un residente que vive y se desplaza por el sector muestreado de manera cotidiana a lo largo del periodo de exposición.

Escenario 1: Niños (0-8 años), escenario residencial.

Escenario 2: Adolescentes (9-18 años), escenario residencial.

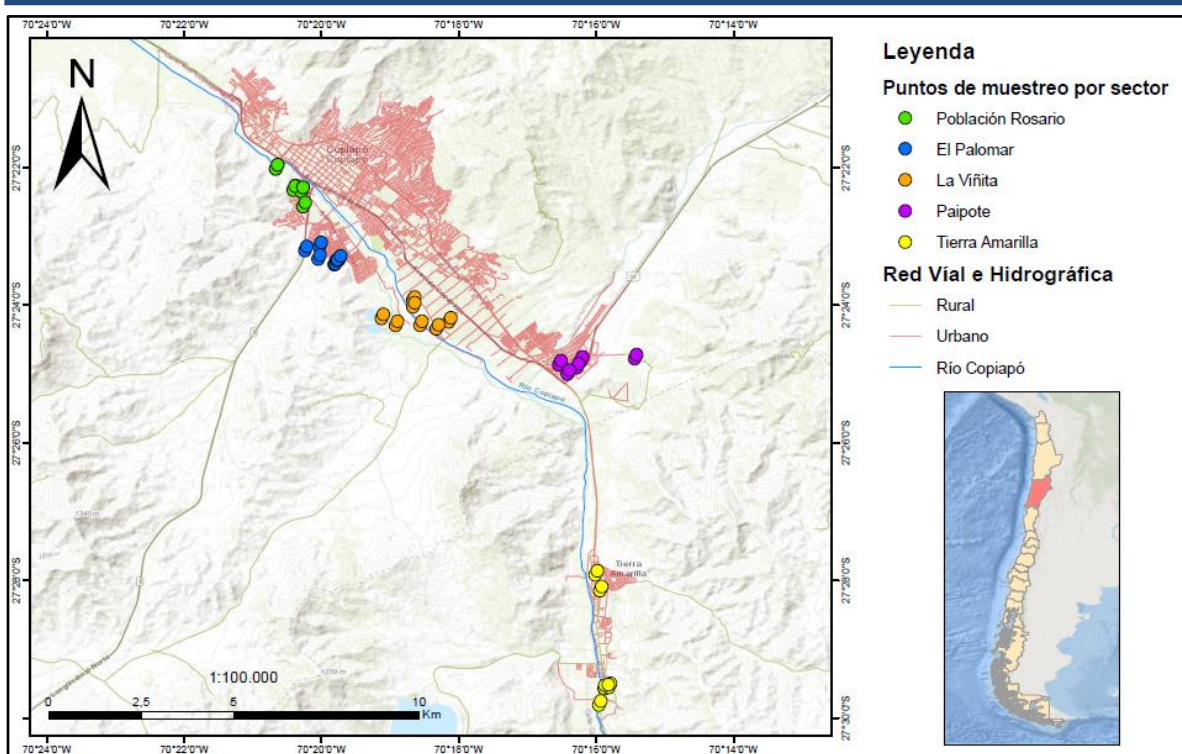
Escenario 3: Adultos (19 – 70 años), escenario residencial.

### **5.2. Identificación de los contaminantes**

#### **5.2.1. Muestreo, tratamiento y análisis químico previo**

Durante el periodo 2013, se realizaron un total de 66 muestreos distribuidos entre 5 sectores de la Provincia de Copiapó, de las cuales 46 fueron muestras de suelo superficial obtenidas entre 0 y 20 cm de profundidad, mientras que las otras 20 muestras fueron obtenidas de la superficie de relaves presentes en estos sectores.

Todos los puntos de muestreo se encuentran insertos y aledaños a sectores poblados. La distribución espacial general de los sectores muestreados se presenta en la **Figura nº 1**:



**Figura nº 1: Localización de los puntos de muestreo del periodo 2013.**

A continuación, se detalla espacialmente cada grupo de muestras por sector.

En las figuras nº2, 3, 4, 5 y 6, puede apreciarse el detalle de muestras obtenidas por sector, especificando la naturaleza de la matriz muestreada, donde además se logra apreciar la cercanía entre los relaves y el perímetro urbano.

En las imágenes nº1, 2, 3, 4 y 5, puede observarse que los puntos de muestreo realizados en la matriz de suelo superficial se encuentran localizados en sitios de interés para la población, tales como colegios y áreas residenciales.

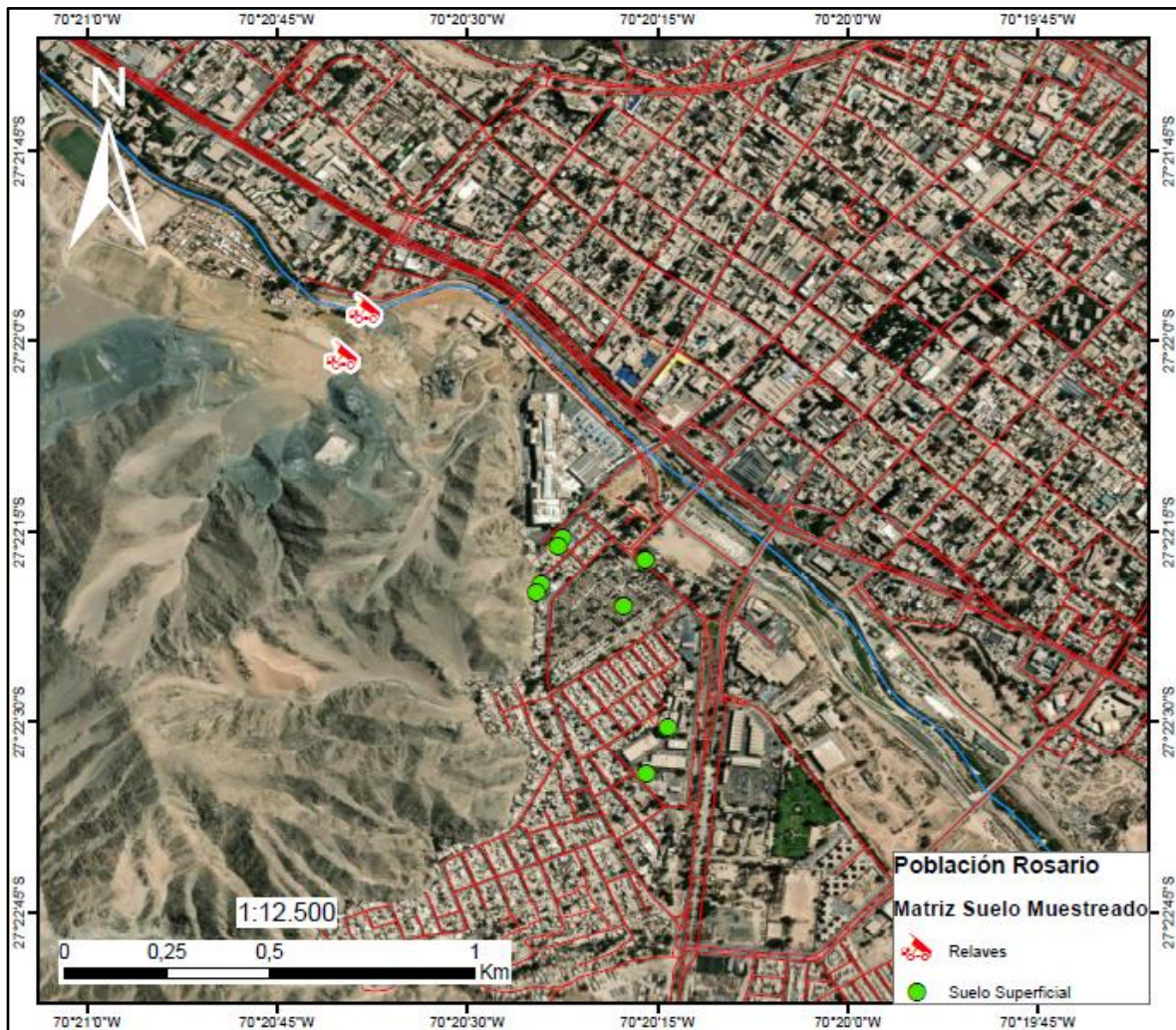


Figura nº 2: Puntos de muestreo en Sector Población Rosario, periodo 2013.

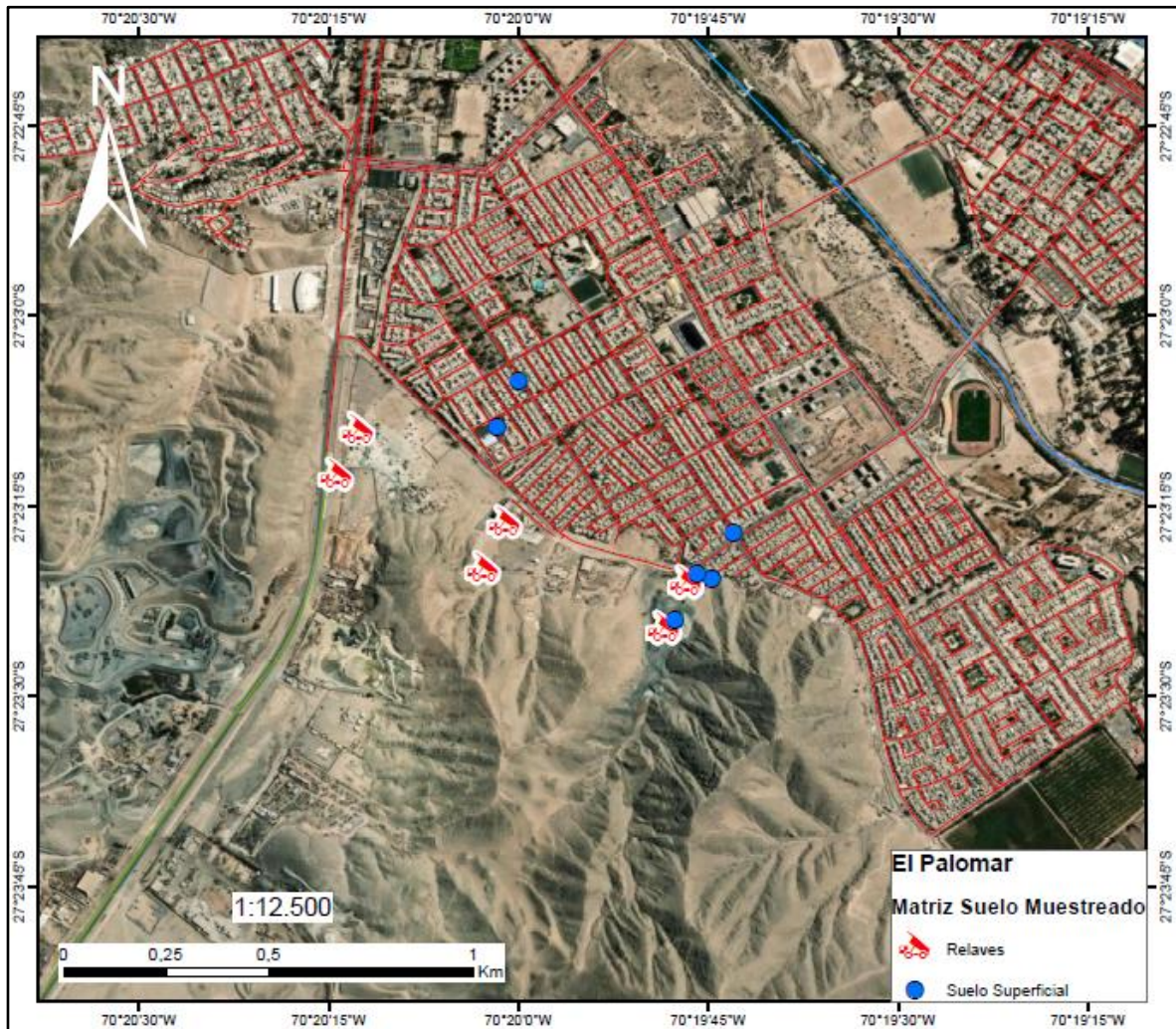
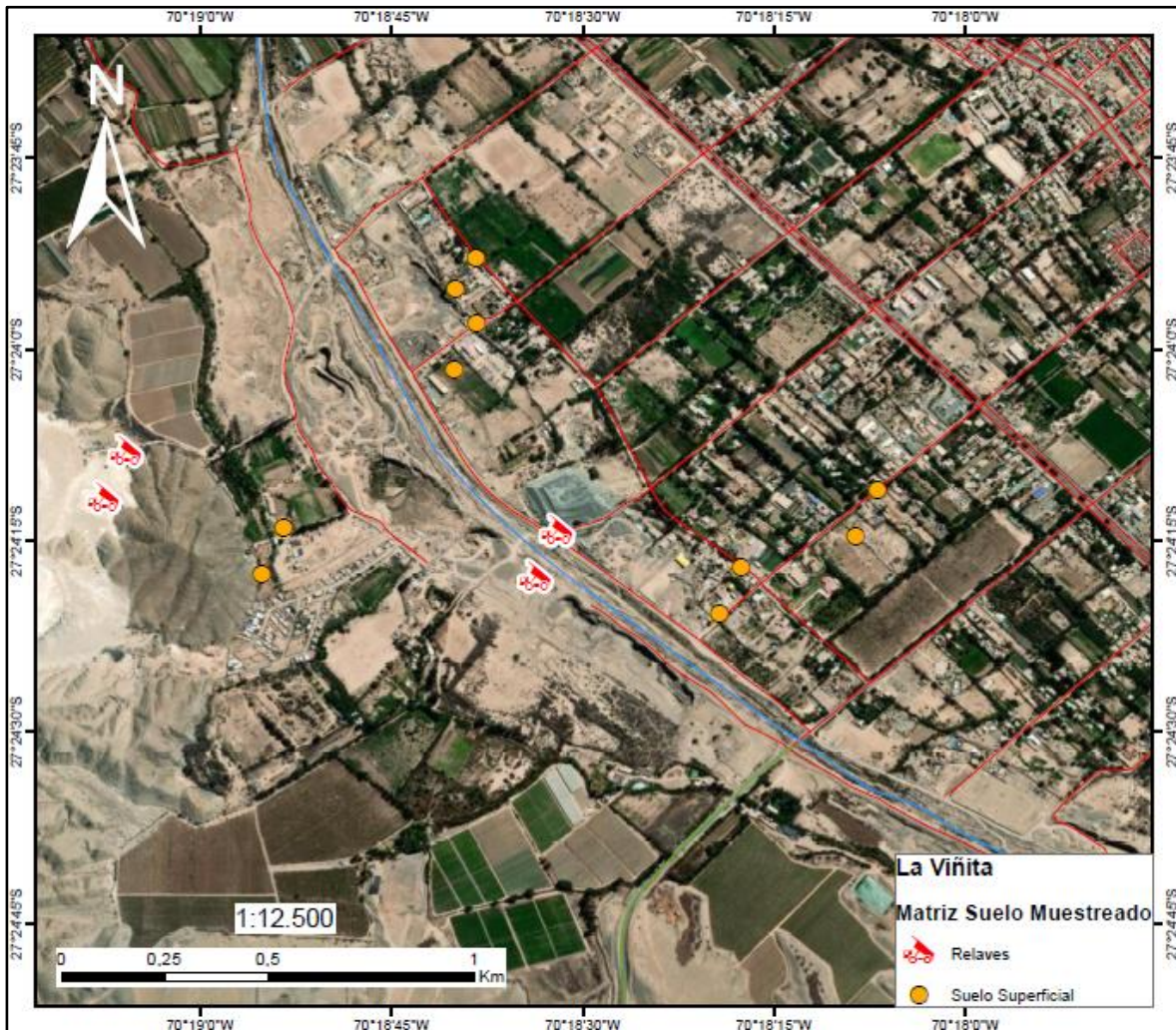


Figura nº 3: Puntos de muestreo en Sector El Palomar, periodo 2013.



**Figura nº 4: Puntos de muestreo en Sector La Viñita, periodo 2013.**



Figura nº 5: Puntos de muestreo en Sector Paipote, periodo 2013.

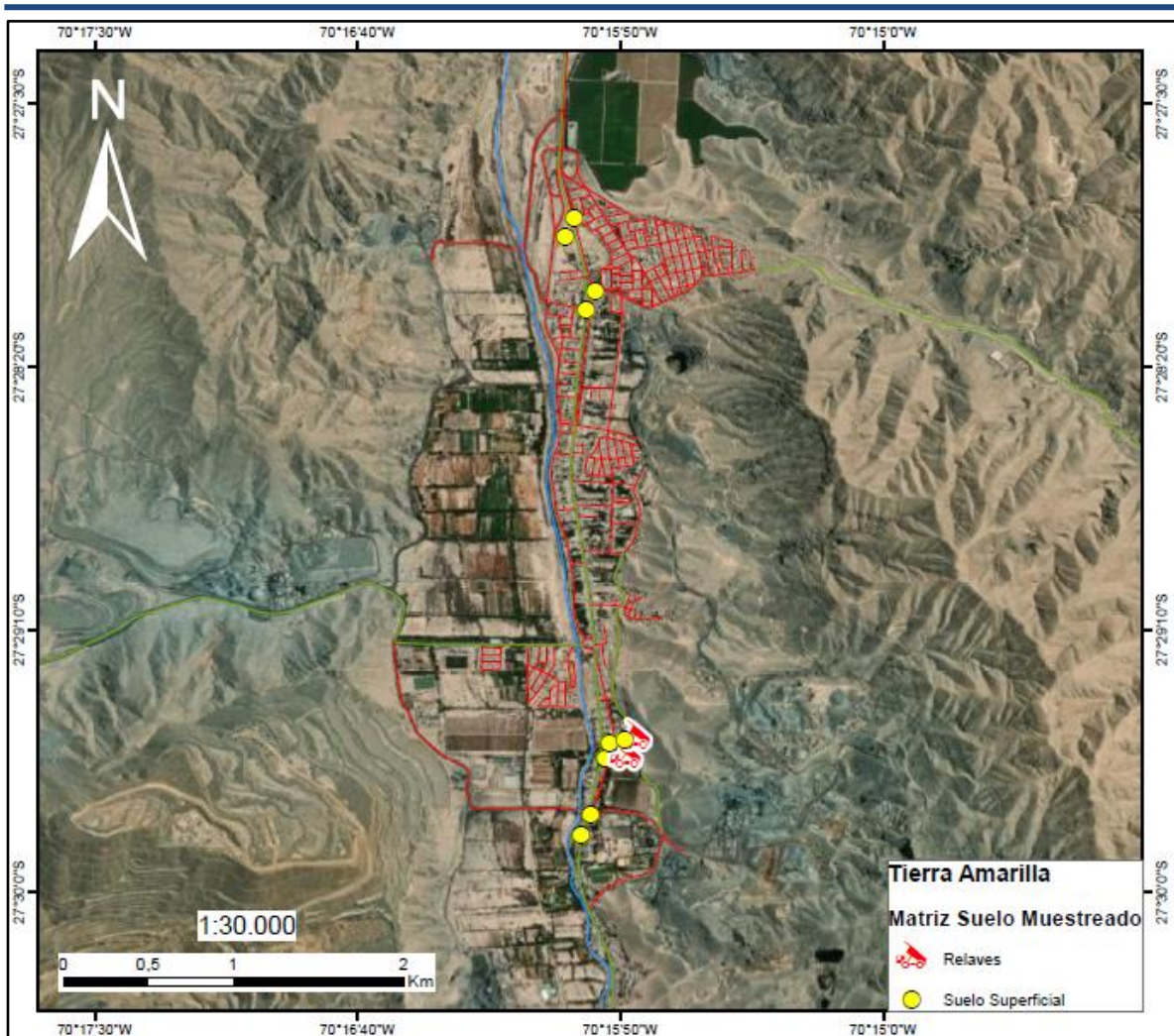


Figura nº 6: Puntos de muestreo en Sector Tierra Amarilla, periodo 2013.

### 5.2.2. Estadística descriptiva

La estadística descriptiva, incluyendo el límite superior del intervalo de confianza de la media aritmética al 95% de confianza (UCL) y los distintos percentiles, se computaron utilizando el software ProUCL 5.0, al igual que el análisis de la distribución de los datos. Esto se realizó de manera independiente para cada sector, y contaminantes.

En el caso del Arsénico, no se presentaron valores por debajo del límite de detección en ningún punto muestreado. En cuanto a la distribución estadística de los datos, en la mayoría de los casos, estos siguieron una distribución tipo Student, y en menor medida distribuciones tipo Chebychev o Gamma Ajustada, como puede observarse desde la **Tabla nº 9** a la **Tabla nº 13**.

**Tabla nº 9: Estadística descriptiva de las determinaciones de contaminantes en suelo superficial del Sector Población Rosario, periodo 2013.**

ELEMENTO	MÍN	MÁX	MEDIA	DESVEST	COEFICIENTE DE VARIACIÓN	UCL	DISTRIBUCIÓN SUGERIDA UCL	P50	P75	P90	P95
Cd	0,029	0,5	0,172	0,184	1,072	0,323	95% Student's-t UCL	0,123	0,218	0,361	0,43
Cr	0,1	33,2	21,2	12,51	0,59	31,49	95% Student's-t UCL	23,05	30,5	32,1	32,65
Cu	374	1121	716,1	299,1	0,418	962,2	95% Student's-t UCL	733,8	900,8	1036	1078
Mn	433,2	1535	780	398,3	0,511	1108	95% Student's-t UCL	663	821,8	1199	1367
Mo	0,035	0,035	0,035	0	N/A	0,04	95% Chebyshev	0,035	0,035	0,035	0,035
Pb	18,2	173	65,4	58,73	0,898	113,7	95% Student's-t UCL	47,4	79,43	130,5	151,7
Zn	91,9	290	158,1	74,08	0,469	219	95% Student's-t UCL	124,3	181,4	245	267,5
As	33,91	65	49,97	13,34	0,267	60,94	95% Student's-t UCL	51,35	60,75	64	64,5

Fuente: Elaboración propia. Mín.: valor mínimo. Máx.: valor máximo. Media: media aritmética. Desvest.: desviación estándar. UCL: límite superior del intervalo de confianza de la media (95%). Px: Percentil. Los valores se presentan como mg kg<sup>-1</sup> de suelo. N = 6.

**Tabla nº 10: Estadística descriptiva de las determinaciones de contaminantes en suelo superficial del Sector El Palomar, periodo 2013.**

ELEMENTO	MÍN	MÁX	MEDIA	DESVEST	COEFICIENTE DE VARIACIÓN	UCL	DISTRIBUCIÓN SUGERIDA UCL	P50	P75	P90	P95
Cd	0,018	0,168	0,0543	0,0561	1,032	0,154	95% Chebyshev	0,035	0,035	0,102	0,135
Cr	17,5	44,8	30,07	9,966	0,331	38,27	95% Student's-t UCL	32,15	33,55	39,2	42
Cu	153,4	568	342,8	146,7	0,428	463,5	95% Student's-t UCL	298	419,1	512,9	540,5
Mn	475,2	834	628,1	128,7	0,205	734	95% Student's-t UCL	625,3	679,5	763	798,5
Mo	0,035	0,035	0,035	0	N/A	0,04	95% Student's-t UCL	0,035	0,035	0,035	0,035
Pb	5,5	27,67	16,2	7,276	0,449	22,18	95% Student's-t UCL	15,25	18,63	23,59	25,63
Zn	41,8	326	147,8	95,33	0,645	226,2	95% Student's-t UCL	122,5	150,1	242,2	284,1
As	33	45	37,53	4,407	0,117	41,16	95% Student's-t UCL	36,85	39,1	42,4	43,7

Fuente: Elaboración propia. Los valores se presentan como mg kg<sup>-1</sup> de suelo. N = 6.

**Tabla nº 11: Estadística descriptiva de las determinaciones de contaminantes en suelo superficial del Sector La Viñita, periodo 2013.**

ELEMENTO	MÍN	MÁX	MEDIA	DESVEST	COEFICIENTE DE VARIACIÓN	UCL	DISTRIBUCIÓN SUGERIDA UCL	P50	P75	P90	P95
Cd	0,035	0,53	0,125	0,152	1,21	0,334	95% Chebyshev	0,0725	0,137	0,206	0,368
Cr	18,2	45,5	28,9	7,835	0,271	33,44	95% Student's-t UCL	27,85	31,6	36,5	41
Cu	238,7	7667	1120	2303	2,057	4294	95% Chebyshev	402,3	497,3	1293	4480
Mn	486,4	2840	887,7	696	0,784	1291	95% Student's-t UCL	701	802,5	1019	1930
Mo	0,035	0,035	0,035	7,31E-18	N/A	0,04	95% Chebyshev	0,035	0,035	0,035	0,035
Pb	14,1	88,1	40,66	22,37	0,55	53,63	95% Student's-t UCL	38,5	52	58,49	73,3
Zn	77,4	551,7	212,8	156,7	0,737	349,4	95% Adjusted Gamma UCL	164	210	446,7	499,2
As	34,4	69,9	48,82	12,82	0,263	56,25	95% Student's-t UCL	44,55	55,55	69,09	69,5

Fuente: Elaboración propia. Los valores se presentan como mg kg<sup>-1</sup> de suelo. N = 10.

**Tabla nº 12: Estadística descriptiva de las determinaciones de contaminantes en suelo superficial del Sector Paipote, periodo 2013.**

ELEMENTO	MÍN	MÁX	MEDIA	DESVEST	COEFICIENTE DE VARIACIÓN	UCL	DISTRIBUCIÓN SUGERIDA UCL	P50	P75	P90	P95
Cd	0,035	1,08	0,268	0,436	1,625	0,561	95% Student's-t UCL	0,035	0,241	0,924	1,002
Cr	13	51	27,75	12,67	0,457	36,24	95% Student's-t UCL	22,75	36,35	41,69	46,35
Cu	513,4	2621	1485	798,5	0,538	2020	95% Student's-t UCL	1404	2178	2382	2502
Mn	532,2	927	656,8	147,2	0,224	796,1	95% Student's-t UCL	577,9	734,4	854,2	890,6
Mo	0,035	2,5	0,611	1,07	1,751	1,328	95% Student's-t UCL	0,035	0,571	2,276	2,388
Pb	14,3	108,9	48,99	32,89	0,671	71,02	95% Student's-t UCL	43,7	59,65	92,17	100,5
Zn	113	511,2	289,7	133,3	0,46	379	95% Student's-t UCL	283,5	384,5	423,6	467,4
As	39,4	87,1	62,61	14,94	0,239	72,62	95% Student's-t UCL	62,5	69,43	77,93	82,52

Fuente: Elaboración propia. Los valores se presentan como mg kg<sup>-1</sup> de suelo. N = 8.

**Tabla nº 13: Estadística descriptiva de las determinaciones de contaminantes en suelo superficial del Sector Tierra Amarilla, periodo 2013.**

ELEMENTO	MÍN	MÁX	MEDIA	DESVEST	COEFICIENTE DE VARIACIÓN	UCL	DISTRIBUCIÓN SUGERIDA UCL	P50	P75	P90	P95
Cd	0,035	1,21	0,249	0,454	1,823	0,875	95% Chebyshev	0,035	0,035	1,021	1,116
Cr	13,3	46	25,92	9,698	0,374	31,54	95% Student's-t UCL	24,9	27,18	37,81	41,91
Cu	433,3	4763	2269	1545	0,681	3165	95% Student's-t UCL	1726	3653	4285	4524
Mn	459,8	958	705,6	156,9	0,222	796,5	95% Student's-t UCL	691,5	779,8	916,6	937,3
Mo	0,035	2,9	0,715	1,13	1,582	4,27	95% Chebyshev	0,035	1,284	2,36	2,63
Pb	33	98	66,09	20,7	0,313	78,09	95% Student's-t UCL	69,45	80,15	85,4	91,7
Zn	196,2	589,3	330,4	143,2	0,433	413,4	95% Student's-t UCL	273,5	395,3	558,4	573,9
As	60,8	175,9	111,1	40,8	0,367	134,7	95% Student's-t UCL	107,3	138,3	165,2	170,5

Fuente: Elaboración propia. Los valores se presentan como mg kg<sup>-1</sup> de suelo. N = 10.

### 5.2.3. Perfil de toxicidad de los metales muestreados

Los siguientes perfiles de toxicidad han sido preparados para los contaminantes del presente estudio. Se ha utilizado como referencia la información de la Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR). 2005. Perfil toxicológico del arsénico, cadmio, cromo, cobre, manganeso, molibdeno y zinc. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública.

#### 5.2.3.1. Perfil de toxicidad del arsénico

##### Fuentes de exposición

###### Poblaciones generales

La población en general puede estar expuesta al arsénico en el aire, el agua potable y los alimentos. De estos, los alimentos suelen ser la mayor fuente de arsénico.

Antes de 2003, el arsénico se usaba en la producción de conservantes de madera, principalmente arseniato cromado de cobre (CCA); los conservantes de madera con arsénico se han eliminado gradualmente para ciertos productos de madera. Aserrar o lijar madera tratada con conservantes de arsénico puede generar aserrín contaminado con arsénico. De manera similar, quemar madera tratada con arsénico puede resultar en niveles elevados de arsénico en el humo.

Varios arsenicales orgánicos se utilizan como herbicidas y como aditivos antimicrobianos para alimentos para animales y aves.

###### Poblaciones ocupacionales

Algunas ocupaciones en las que puede haber exposición al arsénico incluyen la fundición de cobre o plomo y el tratamiento de la madera.

Los trabajadores involucrados en la producción o aplicación de pesticidas que contienen arsenicales orgánicos también pueden estar expuestos a niveles más altos.

##### Toxicocinética y niveles humanos normales

###### Toxicocinética

Tanto el arseniato como el arsenito se absorben bien tanto por vía oral como por inhalación. La absorción por vía dérmica no ha sido bien caracterizada, pero es baja en comparación con otras vías.

Una vez absorbidos, los arseniatos se reducen parcialmente a arsenitos, produciendo una mezcla de As(III) y As(V) en la sangre.

El As(III) sufre metilación principalmente en el hígado para formar ácido monometilarsónico (MMA) y ácido dimetilarsínico (DMA). La tasa y proporción relativa de producción de metilación varía entre especies.

La mayor parte del arsénico inorgánico se excreta rápidamente en la orina como una mezcla de As(III), As(V), MMA y DMA. Cantidades más pequeñas se excretan en las heces.

En la mayoría de las especies, incluidos los humanos, los compuestos orgánicos de arsénico ingeridos, como MMA y DMA, experimentan un metabolismo limitado, no ingresan fácilmente a la célula y se excretan principalmente sin cambios en la orina.

### Niveles humanos normales

Niveles de arsénico en individuos no expuestos:

- < 1 µg/L en sangre
- <100 µg/L en orina
- ≤ 1 ppm en uñas
- ≤ 1 ppm en cabello

### **Biomarcadores/Niveles Ambientales**

#### Biomarcadores

La medición de los niveles de arsénico en la orina se acepta generalmente como el indicador más confiable de exposición reciente al arsénico.

#### Niveles Ambientales

Aire

- 1-3 ng/m<sup>3</sup> en lugares remotos.
- 20-100 ng/m<sup>3</sup> en áreas urbanas.

Sedimento y Suelo

- La media y el rango de arsénico en el suelo y otros materiales superficiales en los EE. UU. son 7,2 y <0,1–97 µg/g, respectivamente.

Agua

- El agua potable generalmente contiene un promedio de 2 µg/L de arsénico, aunque se han medido niveles más altos en algunas partes de los EE. UU.
- Se han medido niveles de arsénico que oscilan entre 0,138 y 1700 µg/L en aguas superficiales de los EE. UU.

### **Información química y física**

- El arsénico es un metaloide que se presenta como metal gris acero naturalmente.
- Los compuestos de arsénico se pueden categorizar como inorgánicos u orgánicos.
- El arsénico inorgánico se utiliza principalmente como conservante de la madera para hacerla resistente a la putrefacción y descomposición. En 2003, se eliminó gradualmente el uso de conservantes de madera que contienen arsénico para ciertos usos residenciales, como estructuras de juego, mesas de picnic, terrazas, cercas y paseos marítimos. Los conservantes de madera de arsénico todavía se utilizan en aplicaciones industriales.
- El arsénico inorgánico se encuentra naturalmente en el suelo y en muchos tipos de rocas, especialmente en minerales y menas que contienen cobre o plomo.
- El arsénico elemental se utiliza como elemento de aleación en municiones y soldaduras, como aditivo antifricción para los metales utilizados para los cojinetes y para fortalecer las rejillas de las baterías de almacenamiento de plomo-ácido.
- En el pasado, los compuestos inorgánicos de arsénico se usaban como plaguicidas; este uso ya no está permitido.
- MMA se utiliza para el control de malezas en algodón, césped y debajo de árboles, enredaderas y arbustos. El DMA, también conocido como ácido cacodílico, se usa para el control de malezas debajo de los árboles de cítricos que no dan frutos, alrededor de edificios y aceras, y para la renovación del césped.

### **Rutas de exposición**

- Inhalación: vía menor de exposición para la población en general. Vía predominante de exposición ocupacional.
- Oral: ruta predominante de exposición para la población general; para la mayoría de las personas, la dieta es la mayor fuente de exposición al arsénico. La ingestión de arsénico en la suciedad a través de la mano a la boca puede ser una vía importante de exposición para los niños pequeños.
- Dérmica: vía menor de exposición.

### **Arsénico en el Medio Ambiente**

- El arsénico no se puede destruir en el medio ambiente. Solo puede cambiar su forma o adherirse o separarse de las partículas.

- El arsénico adherido a partículas muy pequeñas puede permanecer en el aire durante muchos días y viajar largas distancias.
- El arsénico en el suelo puede ser transportado por el viento o en la escorrentía o puede filtrarse al subsuelo. El arsénico es en gran parte inmóvil en los suelos agrícolas, por lo tanto, tiende a concentrarse y permanecer indefinidamente en las capas superiores del suelo.
- El transporte y la distribución del arsénico en el agua depende de la forma química.
- Las formas solubles se mueven con el agua y pueden transportarse largas distancias. El arsénico se puede adsorber del agua a los sedimentos o suelos.

### **Importancia para la salud pública (efectos sobre la salud)**

#### Niveles Mínimos de Riesgo (MRLs)

- Inhalación: No se derivaron LMR de inhalación de duración aguda, intermedia o crónica para el arsénico inorgánico o los compuestos de arsénico orgánico.
- Oral: Se ha derivado un LMR de 0,005 mg As/kg/día para la exposición oral de duración aguda ( $\leq 14$  días) al arsénico inorgánico.
- No se derivó un LMR oral de duración intermedia para el arsénico inorgánico.
- Se ha derivado un LMR de 0,0003 mg As/kg/día para la exposición oral de duración crónica ( $\geq 1$  año) al arsénico inorgánico.
- No se derivó un LMR oral de duración aguda para el ácido monometilarsónico (MMA).
- Se ha derivado un LMR de 0,1 mg de MMA/kg/día para la exposición oral de duración intermedia (15-364 días) a MMA.
- Se ha derivado un LMR de 0,01 mg de MMA/kg/día para la exposición oral de duración crónica ( $\geq 1$  año) a MMA.
- No se derivaron LMR orales de duración aguda o intermedia para el ácido dimetilarsínico (DMA).
- Se ha derivado un LMR de 0,02 mg DMA/kg/día para la exposición oral de duración crónica ( $\geq 1$  año) a DMA.

#### **Efectos en la salud**

- La inhalación de arsénico inorgánico puede causar irritación respiratoria, náuseas, efectos en la piel y un mayor riesgo de cáncer de pulmón.
- La exposición oral aguda a altas dosis de arsénico inorgánico puede causar náuseas, vómitos, diarrea, efectos cardiovasculares y encefalopatía.
- La exposición oral a largo plazo a niveles bajos de arsénico inorgánico puede causar efectos dérmicos (como hiperpigmentación e hiperqueratosis, callos y verrugas) y

neuropatía periférica caracterizada por un entumecimiento en las manos y los pies que puede progresar a un doloroso "hormigueo".

- También puede haber un mayor riesgo de cáncer de piel, cáncer de vejiga y cáncer de pulmón.
- El arsénico es un cancerígeno humano clase A, con factor de potencia oral =  $1,5E+0$  (mg/kg)/día y Factor Unitario de Riesgo =  $4,3E-3$  por ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).
- La exposición oral a MMA puede resultar en daño gastrointestinal. Pueden observarse efectos renales después de una exposición crónica.
- La exposición oral crónica a DMA puede provocar efectos en la vejiga urinaria y los riñones.

### Salud Infantil

- Los niños que están expuestos a altos niveles de arsénico presentan síntomas similares a los que se observan en los adultos, incluidos efectos cardiovasculares, dérmicos y neurológicos, y vómitos después de la ingestión.

#### 5.2.3.2. Perfil de toxicidad del Cadmio

### Fuentes de exposición

#### Poblaciones generales

- La población en general puede estar expuesta diariamente al cadmio a través de los alimentos, el humo del cigarrillo, el agua potable y el aire.
- El cadmio se introduce en la cadena alimentaria a través de los suelos agrícolas, que pueden contener cadmio de forma natural, o de fuentes antropogénicas, a partir de utensilios enchapados en cadmio y equipos galvanizados utilizados en el procesamiento y la preparación de alimentos; esmaltes y vidriados de cerámica con pigmentos a base de cadmio; y estabilizadores utilizados en plásticos en contacto con alimentos.
- Los niveles más altos de cadmio en los alimentos se encuentran típicamente en las verduras de hoja, como la lechuga y la espinaca, las papas, los granos, los cacahuates y las vísceras, como el hígado y los riñones.
- Se espera que los niveles de cadmio sean bajos en el agua potable y el aire ambiente, excepto en las inmediaciones de industrias o incineradores que emiten cadmio.

#### Poblaciones ocupacionales

- La exposición ocupacional al cadmio ocurre principalmente en operaciones que involucran el calentamiento de productos que contienen cadmio.
- Las ocupaciones con el mayor potencial de exposición incluyen: producción de

aleaciones, producción de baterías, producción y uso de pigmentos, producción de plásticos y fundición y refinación.

## **Toxicocinética y niveles humanos normales**

### Toxicocinética

- El cadmio no se absorbe bien; aproximadamente 25, 1–10 o <1% de un
- la dosis se absorbe después de la exposición por inhalación, oral o dérmica, respectivamente.
- Varios factores afectan la absorción de cadmio. Los aerosoles de cadmio con partículas de tamaño pequeño, como las que se encuentran en el humo del cigarrillo, se absorben más que las partículas de mayor tamaño. Las reservas corporales de hierro influyen en la absorción de cadmio a través del tracto gastrointestinal; las personas con niveles bajos de hierro en el cuerpo absorberán más cadmio.
- Independientemente de la ruta de exposición, el cadmio se distribuye ampliamente en el cuerpo y los niveles más altos se encuentran en el hígado y los riñones.
- El cadmio absorbido se excreta muy lentamente, siendo la excreción urinaria y fecal aproximadamente igual.
- El tiempo medio para el cadmio en todo el cuerpo humano es >26 años.

### Niveles humanos normales

- El nivel geométrico de cadmio en sangre en la población general ( $\geq 1$  año de edad) es de 0,315  $\mu\text{g/L}$ .
- El nivel geométrico de cadmio en orina en la población general ( $\geq 6$  años de edad) es de 0,193  $\mu\text{g/g}$  de creatinina (0,185  $\mu\text{g/L}$ ).

## **Biomarcadores/Niveles Ambientales**

### Biomarcadores

- Los niveles de cadmio en sangre, orina, heces, hígado, riñón, cabello y otros tejidos se han utilizado como biomarcadores de exposición. Los niveles de cadmio en sangre y orina son los biomarcadores de exposición más utilizados.
- Los niveles de cadmio en la sangre son indicativos de exposición reciente en lugar de cargas en todo el cuerpo.
- Los niveles de cadmio en orina reflejan principalmente la carga corporal total. Un modelo biocinético puede estimar la ingesta en función de los niveles urinarios.

### Niveles Ambientales

Aire

- Los niveles de cadmio en el aire ambiente oscilan entre 0,1 y 5 ng/m<sup>3</sup> en áreas rurales, entre 2 y 15 ng/m<sup>3</sup> en áreas urbanas y entre 15 y 150 ng/m<sup>3</sup> en áreas industrializadas.

#### Sedimento y Suelo

- Las concentraciones de cadmio en suelos no contaminados por fuentes antropogénicas oscilan entre 0,06 y 1,1 mg/kg.
- Las concentraciones de la capa superior del suelo son a menudo dos veces más altas que los niveles del subsuelo.
- La concentración promedio de cadmio en suelos agrícolas es de 0.27 mg/kg.

#### Agua

- El nivel promedio de cadmio en el agua del océano está entre <5 y 110 ng/L.
- La EPA requiere que los proveedores de agua limiten la concentración de cadmio en el agua a <5 µg/L.

#### Información química y física

- El cadmio es un metal que se encuentra en la corteza terrestre y se asocia comúnmente con minerales de zinc, plomo y cobre.
- Es un constituyente natural del agua del océano.
- El cadmio se refina y consume para su uso en baterías, pigmentos, revestimientos y revestimientos, estabilizadores para plásticos y aleaciones no ferrosas y dispositivos fotovoltaicos.

#### Rutas de exposición

- Inhalación: ruta predominante de exposición para la población general y la población ocupacional que fuma.
- Oral: ruta predominante de exposición para la población general no fumadora.
- Dérmica: vía de exposición menor para la población en general.

#### Cadmio en el Medio Ambiente

- El cadmio se libera a la atmósfera a través de fuentes naturales y antropogénicas; emisiones de fuentes antropogénicas
- superan a los de origen natural en un orden de magnitud.
- Las principales fuentes industriales de emisiones de cadmio incluyen operaciones de fundición de zinc, plomo, cobre y cadmio, calderas de carbón y petróleo, fabricación de fertilizantes fosfatados e incineradores de lodos municipales y cloacales.
- Los fertilizantes de fosfato son una fuente importante de entrada de cadmio al suelo agrícola.

- Las hojas de tabaco acumulan naturalmente grandes cantidades de cadmio.
- El cadmio se bioacumula en todos los niveles de la cadena alimentaria.

### **Importancia para la salud pública (efectos sobre la salud)**

#### Niveles Mínimos de Riesgo (LMR)

##### Inhalación

- Se ha derivado un LMR de  $3 \times 10^{-5}$  mg Cd/m<sup>3</sup> para la exposición a cadmio por inhalación de duración aguda ( $\leq 14$  días).
- No se derivó ningún LMR de inhalación de duración intermedia para el cadmio.
- Se ha derivado un LMR de  $1 \times 10^{-5}$  mg Cd/m<sup>3</sup> para la exposición a cadmio por inhalación de duración crónica ( $\geq 1$  año).

##### Oral

- No se derivó un LMR oral de duración aguda para el cadmio.
- Se ha derivado un LMR de  $5 \times 10^{-4}$  mg Cd/kg/día para la exposición oral al cadmio de duración intermedia (15–364 días).
- Se ha derivado un LMR de  $1 \times 10^{-4}$  mg Cd/kg/día para la exposición oral crónica al cadmio ( $\geq 1$  año).

### **Efectos en la salud**

- Los objetivos más sensibles de la toxicidad del cadmio son los riñones y los huesos después de la exposición oral y los riñones y los pulmones después de la exposición por inhalación.
- Los efectos observados en humanos incluyen daño tubular renal, daño glomerular, disminución de la mineralización ósea, mayor riesgo de fracturas óseas, disminución de la función pulmonar y enfisema.
- Estos efectos generalmente ocurren después de una exposición prolongada al cadmio.
- Algunos estudios han encontrado que los trabajadores del cadmio aumentan el riesgo de cáncer de pulmón. El DHHS y la IARC consideran que el cadmio es un carcinógeno humano. La EPA considera que el cadmio es un carcinógeno humano probable por vía de inhalación con un peso de evidencia B1, es decir, es un probable cancerígeno humano basado en evidencia cancerígena limitada en humanos.
- El Riesgo Unitario cancerígeno (FUR) por inhalación es  $1,8 \times 10^{-3}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )-1.

### **Salud Infantil**

- Es probable que los efectos observados en adultos expuestos al cadmio también se observen en niños. Debido a que el cadmio es una toxina acumulativa y tiene una vida media muy prolongada en el cuerpo, la exposición de los niños, incluso en cantidades bajas, puede tener consecuencias a largo plazo. Los estudios en animales sugieren que los niños pueden ser más susceptibles que los adultos al daño óseo inducido por cadmio.
- En animales de laboratorio, el cadmio provoca disminuciones en el peso corporal del feto o de las crías, malformaciones esqueléticas y alteraciones del comportamiento.

### **5.2.3.3. Perfil de toxicidad del Cobre**

#### **Fuentes de exposición**

##### Poblaciones generales

- Todo el mundo está expuesto diariamente al cobre en los alimentos, el agua y el aire.
- El cobre es un nutriente esencial para los seres humanos y se deben consumir diariamente niveles bajos. Se estima que la ingesta dietética diaria promedio en humanos es de 2 mg/día.
- Es más probable que haya exceso de cobre en el agua potable en hogares con tuberías de cobre o agua corrosiva.
- El consumo regular de ostras o almejas puede aumentar sustancialmente la ingesta de cobre en la dieta.
- El consumo de suplementos dietéticos, multivitamínicos o alimentos fortificados puede aumentar la ingesta de cobre en la dieta.
- Las personas pueden ingerir o inhalar accidentalmente polvos, polvos o cristales de cobre que están disponibles para la compra comercial y de consumo.

##### Poblaciones ocupacionales

- Las personas que trabajan en instalaciones que procesan, reciclan o extraen cobre pueden estar expuestas por inhalación o contacto dérmico.
- Los trabajadores agrícolas pueden inhalar aerosoles de herbicidas o pesticidas que contienen sales de cobre.
- Los trabajadores de estas industrias corren un mayor riesgo de exposición que la población general.

#### **Toxicocinética y niveles humanos normales**

##### Toxicocinética

- Después de la ingestión, el cobre se absorbe en el tracto gastrointestinal,

principalmente en el intestino delgado. Para mantener la homeostasis del cobre, el cuerpo absorberá menos cobre de la dieta a medida que aumente la ingestión. Ningún estudio examinó la absorción de la exposición por inhalación.

- La distribución del cobre es un proceso de dos fases: (1) el hígado absorbe el 75 % del cobre distribuido por la vena porta y (2) el cobre del hígado se libera a los sistemas de circulación sanguínea y se distribuye en varios tejidos de órganos. Después de la inhalación, el cobre se distribuye al hígado, plasma, pulmones y riñones.
- El metabolismo del cobre está regulado por APT7A y ATP7B. Cu(II) se reduce a Cu(I) para el transporte a través de las membranas celulares.
- La excreción de bilis a través de las heces es la principal vía de excreción del cobre. El cobre también se encuentra en la orina y la leche materna. Se desconoce la velocidad y el alcance de la excreción por exposición a la inhalación.
- La vida media del cobre en tejidos de rata es: 3,9 a 21 días en el hígado, 5,4 a 35 días en el riñón, 23 a 662 días en el corazón y 457 días en el cerebro. En ratas, la vida media en los pulmones es de 7,5 horas.

#### NHANES Biomonitoring

- La media geométrica de los niveles de cobre sérico para todos los adultos en el NHANES 2015-2016 fue de 1146,6 µg/L.

#### **Biomarcadores/Niveles Ambientales**

##### Biomarcadores

- El cobre se puede medir en sangre, orina, cabello y uñas para indicar exposición. Cuando están elevados, pueden indicar una exposición excesiva al cobre o una alteración de la homeostasis del cobre.
- No hay biomarcadores de efecto específicos para la toxicidad del cobre. El seguimiento de los síntomas gastrointestinales y la medición de los niveles de enzimas hepáticas se pueden utilizar para controlar y controlar los efectos tóxicos del cobre en los tejidos.

##### Niveles Ambientales

- Al aire libre, rango medio: 0,02–0,79 µg/m<sup>3</sup> Agua
- Rango de agua subterránea: 0.2–98.4 µg/L
- Rango de agua superficial: 0.021–69,000 µg/L
- Rango de agua potable: 0,009–2450 µg/L

##### Suelo y Sedimento

- Rango de suelos: 0.005–200,000 ppm

- Rango de sedimentos: 0.001–150,000 ppm
- Mediana de suelos y sedimentos: 30 ppm

#### Alimento

- Rango medio: 0–135 mg/kg
- Rango medio de alimentos para bebés: 0,02–1,6 mg/kg

#### Información química y física

- El cobre es un metal rojizo que tiene alta conductividad térmica, alta conductividad eléctrica, baja corrosividad, capacidad de aleación y es maleable.
- Ocurre naturalmente, es un elemento del grupo 11 (metales nobles), y es un nutriente esencial. El cobre es inodoro con un color rojizo brillante y existe en estado sólido.
- El cobre es insoluble en agua. Por el contrario, su sal, sulfato de cobre (II), es soluble en agua.
- El sulfato de cobre (II) se produce tratando el cobre caliente con ácido sulfúrico. Es un sólido de color blanco verdoso cuando está anhidro y azul cristalizado cuando está hidratado. Tiene un olor agradable.
- El cloruro de cobre (II) se produce por una reacción de cobre metálico con cloro. Es un polvo amarillo-marrón en forma anhidra. Es inodoro y soluble en acetona y etanol.

#### Rutas de exposición

- Inhalación: el público en general inhala cobre en la atmósfera, ya que normalmente está ligado a partículas. La inhalación puede ocurrir en trabajadores que manipulan polvos, polvos o aerosoles de cobre.

#### Comunidades

- Vivir cerca de instalaciones que procesan o extraen cobre puede estar expuesto por inhalación.
- Oral: el público en general está expuesto diariamente al cobre en el agua y los alimentos. El cobre se ingiere principalmente a través del agua potable.
- Dérmico: el contacto dérmico es una ruta potencial de exposición para los trabajadores. Los niños también pueden estar expuestos si juegan en suelos contaminados.

#### Cobre en el Medio Ambiente

- El cobre se encuentra naturalmente en el aire, el agua, el suelo y los sedimentos.
- En la atmósfera, el cobre se encuentra en forma de partículas o adsorbido en ellas. Puede viajar largas distancias lejos de su fuente original.

- El cobre no es estable en agua debido a su solubilidad, pero sus sales, como el sulfato de cobre, normalmente se miden en agua.
- En el agua, el cobre puede disolverse o unirse a partículas.
- El cobre se une a suelos y sedimentos, especialmente aquellos con alto contenido orgánico. Su movilidad depende de la composición del suelo.
- Las plantas y los cultivos absorben el cobre de los suelos, ya que es necesario para el crecimiento.
- El cobre no se bioconcentra en el pescado, pero sí en moluscos como almejas, ostras y calamares, donde las concentraciones pueden ser relativamente altas.

### **Importancia para la salud pública (efectos sobre la salud)**

#### Niveles Mínimos de Riesgo (LMR)

##### Inhalación

- No se derivaron LMR de inhalación aguda ( $\leq 14$  días), intermedia (15-364 días) o crónica ( $\geq 365$  días) para el cobre.

##### Oral

- Se derivó para el cobre un LMR provisional oral de duración aguda de 0,02 mg Cu/kg/día.
- Un provisional oral de duración intermedia
- Se derivó un LMR de 0,02 mg Cu/kg/día para el cobre mediante la adopción del LMR oral de duración aguda.
- No se derivó LMR oral de duración crónica para el cobre.

### **Efectos en la salud**

- Estudios en humanos muestran que los síntomas gastrointestinales de vómitos, náuseas, diarrea y dolor abdominal son los efectos más informados después de la ingestión oral de altas concentraciones de cobre.
- Se han esperado síntomas gastrointestinales similares en niños expuestos por vía oral a altas concentraciones de cobre, especialmente en el agua potable.
- Se informa ictericia, insuficiencia hepática e insuficiencia renal en casos en los que las personas ingirieron altas dosis letales de sulfato de cobre.
- El cobre es un irritante respiratorio. Los trabajadores que utilizan polvos o aerosoles de cobre reportan daño pulmonar e irritación de la nariz y la garganta.
- Se informa decoloración de la piel e irritación de los ojos en trabajadores que tuvieron contacto dérmico con polvos de cobre.

- Los estudios de exposición oral de duración intermedia en animales informan alteraciones en los parámetros hematológicos, deficiencias neurológicas y daños en los órganos reproductores masculinos y femeninos.
- Las crías de animales expuestos oralmente al cobre durante el embarazo muestran un desarrollo retrasado o alterado.
- Los estudios in vivo sugieren que el sulfato de cobre es genotóxico para las líneas celulares de mamíferos.
- Ni el Departamento de Salud y Servicios Humanos (HHS), la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ni la EPA han clasificado el cobre con respecto a su carcinogenicidad.

### Salud Infantil

- Los niños expuestos al cobre en el agua potable pueden experimentar efectos similares a los que se esperan en los adultos. Se desconoce si se espera que los efectos en el desarrollo observados en animales se observen en humanos.

#### 5.2.3.4. Perfil de toxicidad del Cromo

### Fuentes de exposición

#### Poblaciones generales

- La población en general puede estar expuesta diariamente al cromo a través de los alimentos, el agua potable y el aire.
- La ruta predominante de exposición para la población general es la ingestión de cromo en la dieta.
- La exposición también puede ocurrir a través de la inhalación de aire contaminado y el consumo de agua contaminada.
- El cromo (III) es un nutriente esencial requerido para el metabolismo energético normal.
- El Instituto de Medicina de la Academia Nacional de Ciencias determinó una ingesta adecuada de cromo(III) de 20–45 µg/día para adolescentes y adultos.

#### Poblaciones ocupacionales

- Los trabajadores de aproximadamente 80 industrias pueden estar expuestos al cromo (VI).
- La exposición ocupacional al cromo ocurre principalmente a partir del cromato
- producción y soldadura de acero inoxidable, cromado, aleaciones de ferrocromo y producción de pigmentos de cromo.

- Los trabajadores de las industrias del curtido también están potencialmente expuestos al cromo.

## **Toxicocinética y niveles humanos normales**

### Toxicocinética

- La toxicocinética de un compuesto de cromo dado depende del estado de valencia del átomo de cromo y su solubilidad.
- El cromo se absorbe a través de los pulmones; los compuestos menos solubles en agua tienen un tiempo de retención más largo en el pulmón que las formas más solubles.
- Menos del 10% de una dosis de cromo ingerida se absorbe en el tracto gastrointestinal. Los compuestos más solubles tienen fracciones de absorción más altas.
- El cromo puede penetrar la piel humana hasta cierto punto, especialmente si la piel está dañada.
- El cromo absorbido se distribuye a casi todos los tejidos, y las concentraciones más altas se encuentran en los riñones y el hígado. El hueso también es un depósito importante y puede contribuir a la retención a largo plazo.
- El cromo (VI) se reduce a cromo (III) a través de las formas intermedias de cromo(V) y cromo(IV).
- El cromo absorbido se excreta predominantemente en la orina.

### Niveles humanos normales

- En la población general, los niveles medios de cromo en suero y orina son 0,10–0,16 y 0,22 µg/L, respectivamente.

## **Biomarcadores/Niveles Ambientales**

### Biomarcadores

- El cromo (III) es un elemento esencial y normalmente está presente en la sangre y la orina.
- La exposición a niveles de cromo más altos de lo normal puede resultar en un aumento de los niveles de cromo en la sangre, la orina, el aire espirado, el cabello y las uñas.
- Las elevaciones de cromo en la sangre y la orina se consideran los biomarcadores de exposición más fiables.

## **Niveles Ambientales**

Aire

- Las concentraciones medias en el aire ambiente son <20 ng/m<sup>3</sup>.
- El aire interior en áreas donde se fuma cigarrillos puede ser de 10 a 400 veces más alto que el aire exterior.

#### Sedimento y Suelo

- La concentración media de cromo en el suelo es de 37,0 mg/kg.

#### Agua

- La mayoría de los suministros de agua potable en los Estados Unidos contienen <5 µg/L de
- cromo.

#### Información química y física

- El cromo es un metal que se encuentra en las rocas, los animales, las plantas y el suelo, donde existe en combinación con otros elementos para formar varios compuestos.
- Las principales formas de cromo son: cromo(0), cromo(III), y cromo (VI).
- El cromo se usa ampliamente en los procesos de fabricación para hacer varias aleaciones de metales como el acero inoxidable.
- El cromo se puede encontrar en muchos productos de consumo como: madera
- tratado con bicromato de cobre, cuero curtido con sulfato de cromo, utensilios de cocina de acero inoxidable y reemplazos de cadera de metal sobre metal.

#### Rutas de exposición

- Inhalación: ruta predominante de exposición para las poblaciones ocupacionales.
- Oral: ruta predominante de exposición para la población en general.
- Dérmica: vía de exposición menor para la población en general.

#### Cromo en el Medio Ambiente

- El cromo se libera a la atmósfera por vía industrial, comercial, y la combustión residencial de combustibles de gas natural, petróleo y carbón y de las emisiones de las industrias metalúrgicas, como el cromado y la producción de acero.
- Se cree que aproximadamente 1/3 de las emisiones a la atmósfera son en forma de cromo (VI).
- Las industrias de galvanoplastia, curtido de cuero y textil liberan grandes cantidades de cromo a las aguas superficiales.
- El cromo se elimina principalmente de la atmósfera por la lluvia radiactiva y la

precipitación, se espera que el tiempo de residencia sea <10 días.

- La mayor parte del cromo liberado en el agua se depositará en los sedimentos.
- No se cree que el cromo se biomagnifique en la cadena alimentaria.

### **Importancia para la salud pública (efectos sobre la salud)**

#### Niveles Mínimos de Riesgo (LMR)

##### Inhalación

- No se derivaron LMR de inhalación de duración aguda ( $\leq 14$  días) para Cr(III) o Cr(VI).

Se obtuvieron LMR de inhalación de duración intermedia (15–364 días):

- $5 \times 10^{-6}$  mg Cr/m<sup>3</sup> para aerosoles y neblinas de Cr(VI)
- $3 \times 10^{-4}$  mg Cr/m<sup>3</sup> para partículas de Cr(VI)
- $5 \times 10^{-3}$  mg Cr/m<sup>3</sup> para partículas insolubles de Cr(III)
- $1 \times 10^{-4}$  mg Cr/m<sup>3</sup> para partículas solubles de Cr(III)

##### Oral

- No se derivó un LMR oral de duración aguda ( $\leq 14$  días) para Cr(VI).
- Se ha derivado un LMR de  $5 \times 10^{-3}$  mg Cr/kg/día para la exposición oral de duración intermedia a Cr(VI) (15–364 días).
- Se ha derivado un LMR de  $9 \times 10^{-4}$  mg Cr/kg/día para la exposición oral de duración crónica a Cr(VI) ( $\geq 1$  año).
- No se derivaron LMR orales de duración aguda, intermedia o crónica para Cr(III).

### **Efectos en la salud**

- En general, los compuestos de cromo (VI) son más tóxicos que los compuestos de cromo (III).
- Los objetivos más sensibles del cromo (VI) son el respiratorio (nasal e irritación pulmonar y alteración de la función pulmonar después de la exposición por inhalación), gastrointestinal (irritación, ulceración y lesiones en el estómago y el intestino delgado después de la exposición oral), hematológico (anemia microcítica, hipocrómica) y reproductivo (disminución del conteo de espermatozoides y daño epididimario).
- Los objetivos principales de los compuestos de cromo (III) son los sistemas respiratorio (después de la exposición por inhalación) e inmunológico. La dermatitis alérgica al cromo suele provocarse por contacto dérmico en personas sensibilizadas.

- DHHS, IARC y EPA han clasificado el cromo (VI) como carcinógeno humano. El cromo (VI) es un potente cancerígeno por la vía respiratoria, puede causar reacciones irritativas y alérgicas de la piel.
- La DRf oral es  $3E-03$  mg/kg-día, y la CRfinh =  $1E-04$  mg/m<sup>3</sup>. El FPC oral es  $5E-01$  mg/kg-día-1 y el FUR inh  $8,4E-02$  (µg/m<sup>3</sup>)-1.
- IARC ha clasificado el cromo (III) y el cromo metálico como no clasificables en cuanto a su carcinogenicidad para los humanos.

### Salud Infantil

- Se desconoce si los niños son más sensibles al envenenamiento por cromo que los adultos.

En animales de laboratorio, el cromo (VI) causa abortos espontáneos, bajo peso al nacer y cambios en el desarrollo del esqueleto y el sistema reproductivo. Estos efectos sobre el desarrollo pueden estar relacionados, en parte, con la toxicidad materna por cromo.

#### 5.2.3.5. *Perfil de toxicidad del Manganeso*

### Fuentes de exposición

#### Poblaciones generales

- La población en general puede estar expuesta al manganeso a través del consumo de alimentos y agua, la inhalación de aire y el contacto dérmico con el aire, el agua, el suelo y los productos de consumo que contienen manganeso.
- El manganeso es un nutriente esencial requerido como cofactor para una variedad de enzimas.
- La principal fuente de exposición al manganeso para la población general son los alimentos; las concentraciones más altas de manganeso se encuentran en granos, nueces, legumbres y frutas.

#### Poblaciones ocupacionales

- La exposición ocupacional es más probable que ocurra por inhalación de vapores de manganeso o polvos que contienen manganeso.
- Los trabajadores de las industrias de ferromanganeso, hierro y acero, baterías de celda seca y soldadura pueden estar expuestos al manganeso en el aire.

### Toxicocinética y niveles humanos normales

#### Toxicocinética

- En general, el grado de absorción del manganeso inhalado está en función del tamaño de las partículas. El manganeso de partículas más pequeñas que se depositan en las

vías respiratorias inferiores se absorbe principalmente en la sangre y los fluidos linfáticos. El manganeso de partículas más grandes o partículas nanométricas depositadas en la mucosa nasal puede transportarse directamente al cerebro a través de los nervios olfatorios o trigémino.

- La cantidad de manganeso absorbido a través del tracto gastrointestinal es variable, pero por lo general tiene un promedio de 3 a 5%. Los adultos mantienen niveles tisulares estables de manganeso a través de la regulación de la absorción gastrointestinal y la excreción hepatobiliar.
- El manganeso absorbido se distribuye ampliamente por todo el cuerpo, con
- los niveles más altos se encuentran en el hígado, el páncreas y los riñones.
- La principal ruta de eliminación es la eliminación fecal a través de la excreción hepatobiliar.

#### Niveles humanos normales

- La concentración media de manganeso en orina en personas de 6 a 88 años fue de 1,19 µg/L.

#### **Biomarcadores/Niveles Ambientales**

##### Biomarcadores

- El manganeso es un elemento esencial y normalmente está presente en la sangre y la orina.
- En los trabajadores, los niveles sanguíneos promedio del grupo parecen estar relacionados con la carga corporal de manganeso, mientras que los niveles de excreción urinaria promedio del grupo se consideraron más indicativos de exposiciones recientes.
- Los niveles en sangre y orina también pueden ser útiles para detectar grupos con una exposición actual al manganeso superior al promedio. Sin embargo, las mediciones en individuos solo pueden estar relacionadas con la dosis de exposición.

##### Niveles Ambientales

###### Aire

- El nivel medio de fondo en áreas urbanas es de 40 ng/m<sup>3</sup>.
- En áreas rurales, los niveles de manganeso son típicamente <10 ng/m<sup>3</sup>.

###### Sedimento y Suelo

- El nivel medio de fondo de manganeso en el suelo es de 330 mg/kg.

###### Agua

- El nivel medio en el agua potable es de 10 µg/L.

### **Información química y física**

- El manganeso es un metal que se encuentra principalmente como óxidos, carbonatos y silicatos.
- El manganeso se utiliza principalmente en la producción de acero para mejorar la dureza, la rigidez y la resistencia.
- Los compuestos inorgánicos de manganeso también se utilizan en la producción de pilas secas, vidrio y fuegos artificiales; en las industrias textiles del cuero; y como fertilizante. El pigmento inorgánico conocido como violeta de manganeso se encuentra en los cosméticos.
- El metilciclopentadienil manganeso tricarbonilo (MMT) es un
- compuesto de manganeso agregado a la gasolina para mejorar las propiedades antidetonantes del combustible.
- Otros compuestos orgánicos de manganeso se utilizan como fungicidas, aditivos de fuel-oil, inhibidores de humo y agentes de imágenes médicas.

### **Rutas de exposición**

- Inhalación: ruta predominante de exposición para las poblaciones ocupacionales; vía menor de exposición para la población en general.
- Oral: ruta predominante de exposición para la población en general.
- Dérmica: vía menor de exposición.

### Manganeso en el Medio Ambiente

- El manganeso se libera a la atmósfera por vía natural y fuentes antropogénicas.
- Las principales fuentes industriales de manganeso son las instalaciones de producción de hierro y acero, las centrales eléctricas y las emisiones de los hornos de coque.
- El manganeso tiene el potencial de bioconcentrarse, particularmente en los organismos inferiores de la cadena alimentaria.

### **Importancia para la salud pública (efectos sobre la salud)**

#### Niveles Mínimos de Riesgo (LMR)

##### Inhalación

- No se han derivado LMR de inhalación de duración aguda o intermedia para el manganeso inorgánico.

- Se ha derivado un LMR de 0,0003 mg Mn/m<sup>3</sup> para la exposición por inhalación de duración crónica al manganeso inorgánico ( $\geq 1$  año).
- No se han derivado MRL de inhalación de duración aguda, intermedia o crónica para MMT.

#### Oral

- No se han derivado LMR orales de duración aguda, intermedia o crónica para el manganeso inorgánico.
- No se han derivado LMR orales de duración aguda, intermedia o crónica para MMT.

#### Efectos en la salud

- El manganeso inhalado puede transportarse directamente al cerebro y puede provocar un trastorno neurológico permanente conocido como manganismo con síntomas que incluyen temblores, dificultad para caminar y espasmos musculares faciales.
- La exposición a altos niveles de polvo de manganeso puede resultar en inflamación pulmonar y deterioro de la función pulmonar.
- La exposición oral también puede resultar en efectos neurológicos adversos.
- No hay evidencia de que el manganeso cause cáncer en humanos y hay pocos datos que sugieran que el manganeso inorgánico es cancerígeno en animales.
- La EPA ha clasificado el manganeso como una sustancia química del grupo D, no clasificable en cuanto a carcinogenicidad humana.

#### Salud Infantil

- Efectos neurológicos, similares a los observados en adultos expuestos a altos niveles de manganeso, y efectos en el desarrollo neurológico, incluidos cambios en el comportamiento, la memoria y la capacidad de aprendizaje, se han observado en niños expuestos a niveles extremadamente altos de manganeso. Sin embargo, no se sabe si los niños son más sensibles que los adultos, pero los experimentos con animales de laboratorio indican que pueden ser más sensibles.

#### 5.2.3.6. Perfil de toxicidad del Molibdeno

#### Fuentes de exposición

##### Poblaciones generales

- La población en general está expuesta a niveles bajos de molibdeno por la ingestión de alimentos y agua potable y por la inhalación de polvo. La exposición dérmica también puede ocurrir a través del contacto de la piel con tierra, agua u otras sustancias que contengan molibdeno.

### Poblaciones ocupacionales

- La exposición ocupacional puede ocurrir en instalaciones que producen aleaciones de molibdeno o acero inoxidable.
- La exposición ocupacional también puede ocurrir en las operaciones mineras.
- La exposición ocupacional también puede ocurrir en otras instalaciones que usan molibdeno.

### **Toxicocinética y niveles humanos normales**

#### Toxicocinética

- El molibdeno se absorbe a través de los pulmones, aunque no se han identificado estimaciones cuantitativas.
- Se estima que la absorción en el tracto gastrointestinal es del 40 al 100 % según el compuesto específico, la dosis y si se consume con una comida.
- El molibdeno se absorbe poco a través de la piel (aproximadamente 0,2%).
- El molibdeno absorbido está ampliamente distribuido, con la mayor concentraciones en los riñones y el hígado.
- El molibdeno se excreta principalmente en la orina, con cantidades menores excretadas en las heces.

#### Niveles humanos normales

- La encuesta nacional de la población general de los EE. UU. realizada en 2015–2016 informó un nivel medio geométrico de molibdeno en orina de 32,0 µg/L.

### **Biomarcadores/Niveles Ambientales**

#### Biomarcadores

- El molibdeno se puede medir en sangre y orina.

#### Niveles Ambientales

##### Aire

- Los niveles de fondo en el aire ambiente van desde debajo del nivel de detección hasta 0,03 mg/m<sup>3</sup> con niveles más altos en áreas urbanas.

##### Sedimento y Suelo

- Los niveles de molibdeno en la mayoría de los suelos oscilan entre 0,6 y 3,5 mg/kg.
- Un estudio de suelos realizado por el Servicio Geológico de EE. UU. (USGS) mostró concentraciones que oscilaban entre <0,05 y 75,5 mg/kg con una mediana de 0,78

mg/kg.

#### Agua

- Los niveles medios de molibdeno en las aguas subterráneas son de 1,0 µg/L.
- Los niveles de molibdeno en las aguas superficiales son generalmente <1,0 µg/L.

#### Información química y física

- El molibdeno es un oligoelemento natural que se encuentra en los minerales, pero no como metal libre.
- Tiene seis estados de oxidación, los más comunes son Mo(VI) y Mo(IV).
- El molibdeno se usa principalmente en aplicaciones metalúrgicas, incluso como agente de aleación en hierro fundido y acero. La principal forma de molibdeno utilizada por la industria, particularmente en la producción de acero inoxidable, es el trióxido de molibdeno.
- Los usos no metalúrgicos del molibdeno incluyen catalizadores, lubricantes y pigmentos.

#### Rutas de exposición

- Inhalación: vía menor de exposición para la población en general. Vía predominante de exposición ocupacional.
- Oral: la ruta de exposición predominante para la población en general es a través de la ingestión de molibdeno en los alimentos y, en menor medida, a través del agua potable.
- Dérmica: no es probable que sea una vía de exposición preocupante para la población en general.

#### Molibdeno en el Medio Ambiente

- El molibdeno liberado al aire por procesos industriales estará sujeto a deposición atmosférica.
- El molibdeno es un constituyente natural del suelo; encontrado como el mineral molibdenita, powellita, wulfenita, ferrimolibdita e ilsemanita.
- Los compuestos de molibdeno en el agua se transforman rápidamente en iones de molibdato en condiciones ambientales.

#### **Importancia para la salud pública (efectos sobre la salud)**

#### Niveles Mínimos de Riesgo (LMR)

### Inhalación

- No se derivaron LMR de inhalación de duración aguda o intermedia para molibdeno.
- Se derivó un LMR de inhalación de duración crónica ( $\geq 365$  días) de 0,002 mg Mo/m<sup>3</sup> para el trióxido de molibdeno.

### Oral

- No se derivaron LMR orales de duración aguda o crónica para el molibdeno.
- Se calculó un LMR oral de duración intermedia (15–364 días) de 0,06 mg Mo/kg/día para el molibdeno.

### Efectos en la salud

- El molibdeno es un elemento esencial. Los cofactores de molibdeno están involucrados en la degradación de los aminoácidos que contienen azufre, la vía de degradación de las purinas y la oxidación de la hipoxantina y la xantina.
- Los estudios en animales de laboratorio proporcionan evidencia de que el estado del cobre, particularmente el contenido de cobre de la dieta, puede influir en la toxicocinética y la toxicidad del molibdeno.
- Se han observado lesiones nasales en animales expuestos al trióxido de molibdeno después de la exposición por inhalación.
- Efectos renales, incluidas alteraciones histológicas y disminuciones de la función, se han observado en animales después de la exposición oral.
- Los niveles más altos de molibdeno también pueden causar daño hepático en animales expuestos por vía oral.
- Existe evidencia inconsistente de toxicidad para la reproducción y el desarrollo.
- La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha determinado que el trióxido de molibdeno es posiblemente cancerígeno para los seres humanos (grupo 2B).

### Salud Infantil

- No se ha logrado determinar si los niños son más sensibles a la exposición al molibdeno que los adultos.

#### **5.2.3.7. Perfil de toxicidad del plomo**

### Fuentes de exposición

#### Poblaciones generales

- La fuente más probable de exposición es la ingestión de alimentos y agua potable contaminados. La exposición también puede ocurrir a través de la ingestión inadvertida

de suelo/polvo contaminado o pintura a base de plomo.

- El plomo puede filtrarse al agua potable desde las uniones soldadas con plomo o las tuberías con plomo en los sistemas de distribución de agua o en las casas individuales. El plomo también puede entrar en los alimentos si se colocan en platos de cerámica o cerámica mal vidriados.
- Otras posibles fuentes de exposición son los pasatiempos que usan plomo: lanzar municiones y pescar con pesas; soldadura con soldadura de plomo; hacer vidrieras; y el uso de campos de tiro. La gasolina con plomo todavía se usa en algunos autos de carrera, aviones y vehículos todo terreno.
- Algunos remedios caseros no occidentales pueden contener cantidades sustanciales de plomo. Algunos tipos de tintes para el cabello y cosméticos importados pueden contener compuestos de plomo.

#### Poblaciones ocupacionales

- Los niveles potencialmente altos de plomo pueden ocurrir en las siguientes industrias: industrias de fundición, minería y refinación de plomo, plantas de fabricación de baterías, operaciones de soldadura o corte de acero, construcción, campos de tiro, talleres de reparación de radiadores y otras industrias que requieren soldadura con llama de plomo. .

#### **Toxicocinética y niveles humanos normales**

##### Toxicocinética

- Después de la inhalación de plomo orgánico, aproximadamente el 60-80% del plomo depositado en las vías respiratorias es absorbido.
- La absorción gastrointestinal de plomo inorgánico está influenciada por el estado fisiológico del individuo expuesto y la especie del compuesto de plomo.
- La absorción gastrointestinal de plomo es mayor en niños (40 a 50 %) que en adultos (3 a 10 %). La presencia de alimentos en el tracto gastrointestinal disminuye la absorción.
- La absorción de plomo del suelo es menor que la del plomo disuelto, pero se reduce de manera similar con las comidas (26 % en ayunas; 2,5 % cuando se ingiere con una comida).
- En los adultos, aproximadamente el 94 % de la cantidad total de plomo en el cuerpo se encuentra en los huesos y los dientes, en comparación con aproximadamente el 73 % en los niños.
- El plomo permanece en los huesos durante décadas y en la sangre durante meses.
- Independientemente de la ruta de exposición, el plomo absorbido se excreta principalmente en la orina y las heces.

### Niveles de plomo en la sangre

- Niveles de plomo en la sangre en los Estados Unidos (media geométrica, Encuesta Nacional de Examen de Salud y Nutrición [NHANES] 2015–2016):
- 0,76 µg/dL para niños de 1 a 5 años 0,92 µg/dL para adultos >20 años
- El valor de referencia de los Centros para el Control y la Prevención de enfermedades (CDC) es de 3,5 µg/dL

### **Biomarcadores/Niveles Ambientales**

#### Biomarcadores

- El análisis de plomo en sangre total es el método más común y preciso para evaluar la exposición al plomo. El plomo en la sangre refleja una exposición reciente.
- Las mediciones de plomo en los huesos son un indicador de la exposición acumulativa.
- Se han utilizado mediciones de los niveles de plomo en la orina y el cabello para evaluar la exposición al plomo; sin embargo, no son tan confiables.

#### Niveles Ambientales

##### Aire

- Los niveles medios de plomo en el aire en muestras recolectadas en los Estados Unidos entre 2008 y 2010 fueron de 0,20 µg/m<sup>3</sup> para fuentes orientadas y 0,012 µg/m<sup>3</sup> para fuentes no orientadas.

##### Suelo

- El contenido natural de plomo del suelo suele oscilar entre 15 y 20 µg/g. Sin embargo, los niveles de plomo en las capas superiores del suelo varían ampliamente debido a la deposición y acumulación de partículas atmosféricas de fuentes antropogénicas.

##### Agua

- Los niveles de plomo en las aguas superficiales y subterráneas pueden ser muy variables. Se informó que las concentraciones medias recientes en aguas superficiales de EE. UU. eran de 4 µg/L.

### **Información química y física**

- El plomo es un metal natural que rara vez se encuentra en su forma elemental. Ocurre en la corteza terrestre principalmente como el mineral galena (PbS) y, en menor medida, como anglesita (PbSO<sub>4</sub>) y cerusita (PbCO<sub>3</sub>).
- El plomo no es un elemento particularmente abundante, pero sus yacimientos son fácilmente accesibles y están ampliamente distribuidos en todo el mundo. Debido a

sus propiedades, como resistencia a la corrosión, densidad y bajo punto de fusión, el plomo ha sido un metal comúnmente utilizado en tuberías, soldaduras, pesas y baterías de almacenamiento.

### **Rutas de exposición**

- Inhalación: ruta principal de exposición ocupacional. Las partículas más grandes (>2,5 µm) que se depositan en las vías respiratorias ciliadas (regiones nasofaríngea y traqueobronquial) pueden transferirse por transporte mucociliar al esófago y tragarse.
- Oral: vía principal de exposición para la población en general.
- Dérmico: los compuestos orgánicos de plomo se pueden absorber a través de la piel.

### Plomo en el Medio Ambiente

- El plomo se dispersa por todo el medio ambiente principalmente como resultado de actividades antropogénicas. En el aire, el plomo se encuentra en forma de partículas y se elimina mediante la lluvia o la sedimentación gravitatoria.
- El destino del plomo en el suelo se ve afectado por la adsorción en las interfases minerales, que dependen de las características físicas y químicas del suelo (p. ej., pH, tipo de suelo, tamaño de partícula, contenido orgánico).
- Las fuentes de plomo en el polvo y el suelo pueden incluir el plomo de la intemperie y desconchado de pintura a base de plomo de edificios, puentes y otras estructuras.

### **Efectos en la salud**

#### Niveles Mínimos de Riesgo (LMR)

- El plomo no tiene un criterio de toxicidad, sino que se evalúa mediante modelos toxicogénicos como por ejemplo el denominado PBTk (Physiologically-based toxicokinetic).
- Los niveles de plomo sanguíneo reflejan una combinación de exposición durante los últimos meses y durante los últimos años, ya que una vez que este contaminante está en el torrente sanguíneo, se distribuye acumulándose principalmente en tejidos blandos y los tejidos mineralizantes.
- Estudios epidemiológicos muestran que los efectos ocurren en los niveles más bajos de plomo en sangre estudiados ( $\leq 5$  µg/dL). Debido a que los niveles sanguíneos más bajos están asociados con efectos adversos graves (p. ej., disminución de la función cognitiva en los niños), no se han derivado LMR para el plomo.
- Numerosos estudios han evaluado los efectos del plomo en los trabajadores y la población en general. La exposición al plomo se asocia con toxicidad en todos los sistemas de órganos que se han estudiado. Los siguientes son los principales efectos del plomo y están asociados con niveles de plomo en la sangre  $\leq 10$  µg/dL.

- Neurológicos (niños): disminución de la función cognitiva, incluido un coeficiente intelectual más bajo; estado de ánimo y comportamientos alterados, incluidos déficit de atención, hiperactividad, comportamientos autistas, trastornos de conducta y delincuencia; alteración de la función neuromotora y neurosensorial.
- Neurológico (adultos): disminución de la función cognitiva, incluida la atención, la memoria y el aprendizaje; alteraciones en el estado de ánimo y el comportamiento; alteración de la función neuromotora y neurosensorial.
- Renal: disminución de la tasa de filtración glomerular; proteinuria.
- Cardiovascular: aumento de la presión arterial; mayor riesgo de hipertensión.
- Hematológico: disminución de la actividad de varias enzimas de biosíntesis de hemo; disminución de los niveles de hemoglobina.
- Reproductivo (machos): disminución del conteo, concentración, motilidad y viabilidad de los espermatozoides.
- Reproductivo (mujeres): aborto espontáneo; parto prematuro.
- De desarrollo: disminución del peso y tamaño al nacer; disminución de las medidas antropométricas en los niños; inicio tardío de la pubertad en hombres y mujeres.

### **Salud Infantil**

- Los niños son más vulnerables a los efectos del plomo que los adultos.
- La fuente más común de exposición al plomo para los niños es la pintura a base de plomo.
- Las exposiciones al plomo ya sea durante la gestación, la infancia o la niñez pueden provocar retrasos o deterioro del desarrollo neurológico, déficits neuroconductuales, bajo peso al nacer, retraso en el crecimiento y retraso en la maduración sexual en las niñas.
- Garantizar una dieta nutricionalmente adecuada en calcio y hierro puede disminuir la dosis absorbida de plomo.

#### **5.2.3.8. Perfil de toxicidad del Zinc**

### **Fuentes de exposición**

#### Poblaciones generales

- La población en general puede estar expuesta al zinc en el aire ambiente, los alimentos y el agua.
- Las fuentes de exposición al zinc incluyen la ingestión de alimentos, agua potable, aire contaminado y productos de tabaco.
- El zinc es un elemento esencial que necesita el organismo en pequeñas cantidades.

### Poblaciones ocupacionales

- La exposición ocupacional al zinc puede ocurrir por inhalación de aerosoles, polvos, humos o neblinas que contienen zinc.
- La exposición ocupacional al zinc puede ocurrir en instalaciones involucradas en la producción de productos metálicos fabricados.
- La exposición a compuestos de zinc puede ocurrir en trabajadores involucrados en industrias de metales primarios y en la producción de productos de piedra, arcilla y vidrio.

### **Toxicocinética y niveles humanos normales**

#### Toxicocinética

- El zinc se absorbe a través de los pulmones y la piel; sin embargo, las eficiencias de absorción para estas rutas no han sido cuantificadas en humanos o animales.
- La absorción de zinc a través del tracto gastrointestinal está controlada homeostáticamente; en condiciones normales se absorbe del 20 al 30%.
- Una vez absorbido, el zinc se distribuye por todo el cuerpo, y la mayor parte (90 %) se encuentra en los músculos y los huesos.
- El zinc no se metaboliza y el zinc absorbido se elimina a través de las heces y la orina.

#### Niveles humanos normales

- Los niveles de zinc en adultos sanos son de aproximadamente 1 µg/mL en suero y 0,5 mg/g de creatinina en orina.

### **Biomarcadores/Niveles Ambientales**

#### Biomarcadores

- El nivel sérico de zinc es el biomarcador más útil de la exposición al zinc.
- Altos niveles de zinc en heces u orina pueden ser indicativos de exposición reciente.

#### Niveles Ambientales

##### Aire

- La concentración promedio en el aire ambiente en los EE. UU. es de 0,02 a 0,16 µg/m<sup>3</sup> para áreas urbanas y de 0,01 a 0,05 µg/m<sup>3</sup> para áreas rurales.

##### Sedimento y Suelo

- Las concentraciones de zinc en muestras de suelo de los EE. UU. contiguos oscilan

entre <5 y 2900 mg/kg con una media de 60 mg/kg.

#### Agua

- Los niveles de zinc en aguas superficiales oscilaron entre 0,002 y 1,2 mg/L
- Los niveles de zinc en el agua potable oscilaron entre 0,003 y 2,0 mg/L.

#### Información química y física

- El zinc es un metal lustroso de color blanco azulado.
- Debido a su reactividad, el zinc metálico no se encuentra como elemento libre en la naturaleza.
- El zinc metálico se utiliza como recubrimiento protector de otros metales, como el hierro y el acero.
- Las aleaciones de zinc se utilizan para la fundición a presión y se pueden encontrar en componentes eléctricos de artículos para el hogar. Las aleaciones que contienen zinc y cobre se utilizan para fabricar monedas de un centavo de EE. UU.

#### Rutas de exposición

- Inhalación (respiración): ruta menor de exposición para la población en general. Vía predominante de exposición para los trabajadores del zinc.
- Oral (boca): la ruta predominante de exposición al zinc es a través de la ingestión de alimentos. La población general también puede estar expuesta al zinc en el agua potable.
- Dérmica: vía menor de exposición al zinc.

#### Zinc en el Medio Ambiente

- El zinc en la atmósfera es transportado por deposición seca y húmeda.
- La adsorción de zinc en partículas suspendidas en el agua es uno de los principales mecanismos de eliminación de zinc de la columna de agua. Una pequeña porción de zinc en agua existirá en la fase acuosa.
- El zinc es fuertemente adsorbido por el suelo.
- Es poco probable que el zinc esté significativamente bioconcentrado.

#### Importancia para la salud pública (efectos sobre la salud)

#### Niveles Mínimos de Riesgo (LMR)

##### Inhalación

- No se derivaron LMR de inhalación para el zinc.

## Oral

- No se derivó un LMR oral de duración aguda para el zinc ( $\leq 14$  días).
- Se ha derivado un LMR de 0,3 mg Zn/kg/día para la exposición oral de duración intermedia (15–364 días).
- Se ha derivado un LMR de 0,3 mg Zn/kg/día para la exposición oral de duración crónica ( $\geq 1$  año).

## Efectos en la salud

- El zinc es un nutriente esencial para humanos y animales que es necesario para el funcionamiento de un gran número de metaloenzimas.
- Los efectos de la exposición por inhalación de zinc y compuestos de zinc varían un poco según la forma química del compuesto de zinc, pero la mayoría de los efectos ocurren dentro del tracto respiratorio.
- La exposición a dosis orales altas puede provocar síntomas y signos de irritación gastrointestinal (calambres abdominales, vómitos y diarrea) en humanos.
- La exposición oral a largo plazo a los compuestos de zinc puede tener efectos asociados con síntomas tempranos de deficiencia de cobre, como disminución del número de eritrocitos y disminución de los niveles de hematocrito. La deficiencia de cobre se debe a la interacción entre el zinc y el cobre.

## Salud Infantil

- No se ha logrado determinar si los niños son más susceptibles al envenenamiento por zinc que los adultos.

### 5.2.4. Criterios de toxicidad de los contaminantes de riesgo potencial

Los valores de Dosis de Referencia (RfD) y Factor de Potencia Cancerígena (CSF) considerados como criterios de toxicidad para la evaluación de riesgo por efectos no cancerígenos y cancerígenos, para cada uno de los contaminantes en estudio, se resumen en la **Tabla nº 14**, a continuación:

**Tabla nº 14: Dosis de Referencia (RfD) en (mg/kg-day) y Cancer Slope Factors (CSF) de los distintos contaminantes.**

Elemento	RfD Oral	RfD Piel	RfD Inhalatoria (mg/m <sup>3</sup> )	CSF Oral	CSF Piel	CSF inhalatoria	Referencia
<b>Cd</b>	5,00E-04	5,00E-04	5,70E-05	-	-	6,30E+00	(DEA,2016; USEPA, 1991)
<b>Cr (VI)</b>	3,00E-03	-	3,00E-05	5,00E-01	-	4,10E+01	(DEA,2016; USEPA, 2007)
<b>Cu</b>	3,70E-02	2,40E-02	-	-	-	-	(DEA,2016; USEPA, 2007)
<b>Mn</b>	1,40E-01	-	5,00E-05	-	-	-	(IRIS, 1995; USEPA, 2007)
<b>Mo</b>	5,00E-03	-	-	-	-	-	(IRIS, 1992; USEPA, 2007)
<b>Zn</b>	3,00E-01	7,50E-02	-	-	-	-	(DEA,2016; USEPA, 2007)
<b>As</b>	3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	1,50E+00	1,50E+00	1,50E+01	(DEA,2016; USEPA, 1991)
<b>Pb</b>	3,60E-03	-	-	8,50E-03	-	4,20E-02	(DEA,2016; Luo, 2012)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos disponibles por la Administración de Control de Drogas y por el Sistema Integrado de Información del Riesgo, ambos de Estados Unidos.

### 5.3. Caracterizar el riesgo por efectos cancerígenos y no cancerígenos según escenario de exposición propuesto

En esta etapa se integran los resultados de la identificación del peligro, la evaluación de la exposición, y la evaluación de la relación dosis-respuesta, con el fin de estimar la probabilidad de efectos negativos crónicos o cancerígenos.

#### 5.3.1. Selección de Factores de Exposición

Los factores de exposición humanos utilizados son valores centrales y seleccionados como mediana de cada distribución (percentil 50) de manera que reflejan valores típicos más probables para los receptores hipotéticos considerados. Para el presente estudio, todos estos valores fueron obtenidos a través del Exposure Factors Handbook: 2011 Edition de la USEPA.

**Tabla nº 15: Factores de exposición asociados con los escenarios de exposición.**

Factor de exposición	Unidad	Niños (1-8 años)	Adolescentes (9-17 años)	Adultos (>18 años)
Frecuencia de Exposición Efectivo (FE)	días/año	365	365	365
Duración de la exposición (DE)	años	8	9	30
Peso Corporal (PCx)	Kg	16	48	70
Tiempo Ponderado para efectos no cancerígenos (TPnc)	Días	2920	3285	10950
Tiempo Ponderado para efectos cancerígenos (TPc)	Días	25550	25550	25550
Tasa de Ingestión de Partículas (Tx)	mg/día	200	100	100

Fuente: Exposure Factors Handbook: 2011 Edition

### 5.3.2. Cálculo de las Dosis de Exposición

Las Dosis de Ingestión y concentraciones de inhalación por exposición a cada contaminante, en niños y adultos, para el escenario residencial del Sector Población Rosario, se presenta en la **Tabla nº 16**.

**Tabla nº 16: Dosis y concentraciones según escenarios, en sector Población Rosario.**

DOSIS mg (Kg-día)-1/ CONCENTRACION mg (m3)-1	Vía de Ingreso	Receptor	Cd	Cr	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn	As
DDPA	Oral	Adultos	3,07E-08	1,17E-06	1,54E-03	7,81E-05	5,00E-08	2,17E-04	1,53E-05	9,21E-05
DDPV	Oral	Adultos	1,32E-08	5,00E-07	6,60E-04	3,35E-05	2,14E-08	9,29E-05	6,55E-06	3,95E-05
DDPA	Oral	Adolescentes	4,48E-08	1,70E-06	2,25E-03	1,14E-04	7,29E-08	3,16E-04	2,23E-05	1,34E-04
DDPV	Oral	Adolescentes	5,76E-09	2,19E-07	2,89E-04	1,46E-05	9,38E-09	4,06E-05	2,87E-06	1,73E-05
DDPA	Oral	Niños	2,69E-07	1,02E-05	1,35E-02	6,84E-04	4,38E-07	1,90E-03	1,34E-04	8,06E-04
DDPV	Oral	Niños	3,07E-08	1,17E-06	1,54E-03	1,96E-05	5,00E-08	2,17E-04	1,53E-05	9,21E-05
CDPA	Inh.	Adultos	1,13E-12	8,57E-11	2,83E-09	3,59E-09	9,19E-14	3,98E-10	7,02E-10	1,69E-10
CDPV	Inh.	Adultos	4,84E-13	3,67E-11	1,21E-09	1,54E-09	3,94E-14	1,71E-10	3,01E-10	7,26E-11
CDPA	Inh.	Adolescentes	1,65E-12	1,25E-10	4,13E-09	5,24E-09	1,34E-13	5,81E-10	1,02E-09	2,47E-10
CDPV	Inh.	Adolescentes	2,12E-13	1,61E-11	5,31E-10	6,73E-10	1,72E-14	7,47E-11	1,32E-10	3,18E-11
CDPA	Inh.	Niños	4,94E-12	3,75E-10	1,24E-08	1,57E-08	4,02E-13	1,74E-09	3,07E-09	7,41E-10
CDPV	Inh.	Niños	5,65E-13	4,29E-11	1,42E-09	1,79E-09	4,60E-14	1,99E-10	3,51E-10	8,47E-11

Las Dosis de Ingestión y concentraciones de inhalación por exposición a cada contaminante, en niños y adultos, para el escenario residencial del Sector El Palomar, se presenta en la **Tabla nº 17**.

**Tabla nº 17: Dosis y concentraciones según escenarios, en sector El Palomar.**

DOSIS mg (Kg-día)-1/ CONCENTRACION mg (m3)-1	Vía de Ingreso	Receptor	Cd	Cr	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn	As
DDPA	Oral	Adultos	9,643E-09	1,500E-06	7,721E-04	4,563E-05	5,000E-08	3,661E-05	1,623E-05	6,243E-05
DDPV	Oral	Adultos	4,133E-09	6,429E-07	3,309E-04	1,956E-05	2,143E-08	1,569E-05	6,958E-06	2,676E-05
DDPA	Oral	Adolescentes	1,41E-08	2,19E-06	1,13E-03	6,65E-05	7,29E-08	5,34E-05	2,37E-05	9,10E-05
DDPV	Oral	Adolescentes	1,81E-09	2,81E-07	1,45E-04	8,56E-06	9,38E-09	6,87E-06	3,04E-06	1,17E-05
DDPA	Oral	Niños	8,438E-08	1,500E-06	6,756E-03	3,993E-04	4,375E-07	3,204E-04	1,421E-04	5,463E-04
DDPV	Oral	Niños	9,643E-09	1,500E-06	7,721E-04	4,563E-05	5,000E-08	3,661E-05	1,623E-05	6,243E-05
CDPA	Inh.	Adultos	3,545E-13	1,103E-10	1,419E-09	2,097E-09	9,191E-14	6,731E-11	7,461E-10	1,148E-10
CDPV	Inh.	Adultos	1,519E-13	4,727E-11	6,083E-10	8,987E-10	3,939E-14	2,885E-11	3,197E-10	4,918E-11
CDPA	Inh.	Adolescentes	5,17E-13	1,61E-10	2,07E-09	3,06E-09	1,34E-13	9,82E-11	1,09E-09	1,67E-10

CDPV	Inh.	Adolescentes	6,65E-14	2,07E-11	2,66E-10	3,93E-10	1,72E-14	1,26E-11	1,40E-10	2,15E-11
CDPA	Inh.	Niños	1,551E-12	4,825E-10	6,210E-09	9,174E-09	4,021E-13	2,945E-10	3,264E-09	5,021E-10
CDPV	Inh.	Niños	1,773E-13	5,515E-11	7,097E-10	1,048E-09	4,596E-14	3,365E-11	3,730E-10	5,738E-11

Las Dosis de Ingestión y concentraciones de inhalación por exposición a cada contaminante, en niños y adultos, para el escenario residencial del Sector La Viñita, se presenta en la **Tabla nº 18:**

**Tabla nº 18: Dosis y concentraciones según escenarios, en sector La Viñita.**

DOSIS mg (Kg-día)-1/ CONCENTRACION mg (m3)-1	Vía de Ingreso	Receptor	Cd	Cr	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn	As
DDPA	Oral	Adultos	2,629E-08	1,464E-06	6,400E-03	1,103E-04	5,000E-08	1,047E-04	2,853E-05	9,929E-05
DDPV	Oral	Adultos	1,127E-08	6,276E-07	2,743E-03	4,727E-05	2,143E-08	4,488E-05	1,223E-05	4,255E-05
DDPA	Oral	Adolescentes	3,83E-08	2,14E-06	9,33E-03	1,61E-04	7,29E-08	1,53E-04	4,16E-05	1,45E-04
DDPV	Oral	Adolescentes	4,93E-09	2,75E-07	1,20E-03	2,07E-05	9,38E-09	1,96E-05	5,35E-06	1,86E-05
DDPA	Oral	Niños	2,300E-07	1,281E-05	5,600E-02	9,650E-04	4,375E-07	9,163E-04	2,496E-04	8,688E-04
DDPV	Oral	Niños	2,629E-08	1,464E-06	6,400E-03	1,103E-04	5,000E-08	1,047E-04	2,853E-05	9,929E-05
CDPA	Inh.	Adultos	9,664E-13	1,077E-10	1,176E-08	5,068E-09	9,191E-14	1,925E-10	1,311E-09	1,825E-10
CDPV	Inh.	Adultos	4,142E-13	4,614E-11	5,042E-09	2,172E-09	3,939E-14	8,250E-11	5,618E-10	7,822E-11
CDPA	Inh.	Adolescentes	1,41E-12	1,57E-10	1,72E-08	7,39E-09	1,34E-13	2,81E-10	1,91E-09	2,66E-10
CDPV	Inh.	Adolescentes	1,81E-13	2,02E-11	2,21E-09	9,50E-10	1,72E-14	3,61E-11	2,46E-10	3,42E-11
CDPA	Inh.	Niños	4,228E-12	4,710E-10	5,147E-08	2,217E-08	4,021E-13	8,421E-10	5,735E-09	7,985E-10
CDPV	Inh.	Niños	4,832E-13	5,383E-11	5,882E-09	2,534E-09	4,596E-14	9,624E-11	6,555E-10	9,126E-11

Las Dosis de Ingestión y concentraciones de inhalación por exposición a cada contaminante, en niños y adultos, para el escenario residencial del Sector Paipote, se presenta en la **Tabla nº 19:**

**Tabla nº 19: Dosis y concentraciones según escenarios, en sector Paipote.**

DOSIS mg (Kg-día)-1/ CONCENTRACION mg (m3)-1	Vía de Ingreso	Receptor	Cd	Cr	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn	As
DDPA	Oral	Adultos	7,157E-08	1,655E-06	3,574E-03	5,089E-05	3,411E-06	1,436E-04	2,671E-05	1,179E-04
DDPV	Oral	Adultos	3,067E-08	7,094E-07	1,532E-03	2,181E-05	1,462E-06	6,153E-05	1,145E-05	5,052E-05
DDPA	Oral	Adolescentes	1,04E-07	2,41E-06	5,21E-03	7,42E-05	4,98E-06	2,09E-04	3,90E-05	1,72E-04
DDPV	Oral	Adolescentes	1,34E-08	3,10E-07	6,70E-04	9,54E-06	6,40E-07	2,69E-05	5,01E-06	2,21E-05
DDPA	Oral	Niños	6,263E-07	1,448E-05	3,128E-02	4,453E-04	2,985E-05	1,256E-03	2,337E-04	1,032E-03
DDPV	Oral	Niños	7,157E-08	1,655E-06	3,574E-03	5,089E-05	3,411E-06	1,436E-04	2,671E-05	1,179E-04
CDPA	Inh.	Adultos	2,631E-12	1,217E-10	6,570E-09	2,339E-09	6,271E-12	2,639E-10	1,227E-09	2,167E-10
CDPV	Inh.	Adultos	1,128E-12	5,216E-11	2,816E-09	1,002E-09	2,688E-12	1,131E-10	5,260E-10	9,287E-11

CDPA	Inh.	Adolescentes	3,84E-12	1,78E-10	9,58E-09	3,41E-09	9,15E-12	3,85E-10	1,79E-09	3,16E-10
CDPV	Inh.	Adolescentes	4,93E-13	2,28E-11	1,23E-09	4,39E-10	1,18E-12	4,95E-11	2,30E-10	4,06E-11
CDPA	Inh.	Niños	1,151E-11	5,325E-10	2,875E-08	1,023E-08	2,744E-11	1,155E-09	5,370E-09	9,481E-10
CDPV	Inh.	Niños	1,316E-12	6,086E-11	3,285E-09	1,169E-09	3,136E-12	1,320E-10	6,137E-10	1,084E-10

Las Dosis de Ingestión y concentraciones de inhalación por exposición a cada contaminante, en niños y adultos, para el escenario residencial del Sector Tierra Amarilla, se presenta en la Tabla nº 20:

**Tabla nº 20: Dosis y concentraciones según escenarios, en sector Tierra Amarilla.**

DOSIS mg (Kg-día)-1/ CONCENTRACION mg (m3)-1	Vía de Ingreso	Receptor	Cd	Cr	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn	As
DDPA	Oral	Adultos	7,971E-08	1,497E-06	6,463E-03	5,356E-05	3,757E-06	1,310E-04	3,279E-05	2,436E-04
DDPV	Oral	Adultos	3,416E-08	6,415E-07	2,770E-03	2,295E-05	1,610E-06	5,614E-05	1,405E-05	1,044E-04
DDPA	Oral	Adolescentes	1,16E-07	2,18E-06	9,43E-03	7,81E-05	5,48E-06	1,91E-04	4,78E-05	3,55E-04
DDPV	Oral	Adolescentes	1,49E-08	2,81E-07	1,21E-03	1,00E-05	7,04E-07	2,46E-05	6,15E-06	4,57E-05
DDPA	Oral	Niños	6,975E-07	1,310E-05	5,655E-02	4,687E-04	3,288E-05	1,146E-03	2,870E-04	2,131E-03
DDPV	Oral	Niños	7,971E-08	1,497E-06	6,463E-03	5,356E-05	3,757E-06	1,310E-04	3,279E-05	2,436E-04
CDPA	Inh.	Adultos	2,931E-12	1,101E-10	1,188E-08	2,461E-09	6,907E-12	2,408E-10	1,507E-09	4,477E-10
CDPV	Inh.	Adultos	1,256E-12	4,717E-11	5,092E-09	1,055E-09	2,960E-12	1,032E-10	6,459E-10	1,919E-10
CDPA	Inh.	Adolescentes	4,27E-12	1,61E-10	1,73E-08	3,59E-09	1,01E-11	3,51E-10	2,20E-09	6,53E-10
CDPV	Inh.	Adolescentes	5,50E-13	2,06E-11	2,23E-09	4,62E-10	1,29E-12	4,52E-11	2,83E-10	8,40E-11
CDPA	Inh.	Niños	1,282E-11	4,815E-10	5,198E-08	1,077E-08	3,022E-11	1,054E-09	6,594E-09	1,959E-09
CDPV	Inh.	Niños	1,465E-12	5,503E-11	5,940E-09	1,231E-09	3,453E-12	1,204E-10	7,535E-10	2,239E-10

### 5.3.3. Riesgos por exposición a plomo

En la aplicación del modelo IEUBKwin se ingresó como concentración de plomo en el suelo los valores equivalentes al P95 de cada uno de los distintos sectores muestreados por separado.

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

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

Donde:

CPb: Concentración de Pb P95.

PEF: Factor de emisión de partículas (US.EPA).

### 5.3.3.1. Riesgo por exposición a Plomo en sector Población Rosario

La concentración de Pb en aire ingresada en el modelo IEUBK para el sector Población Rosario fue el siguiente:

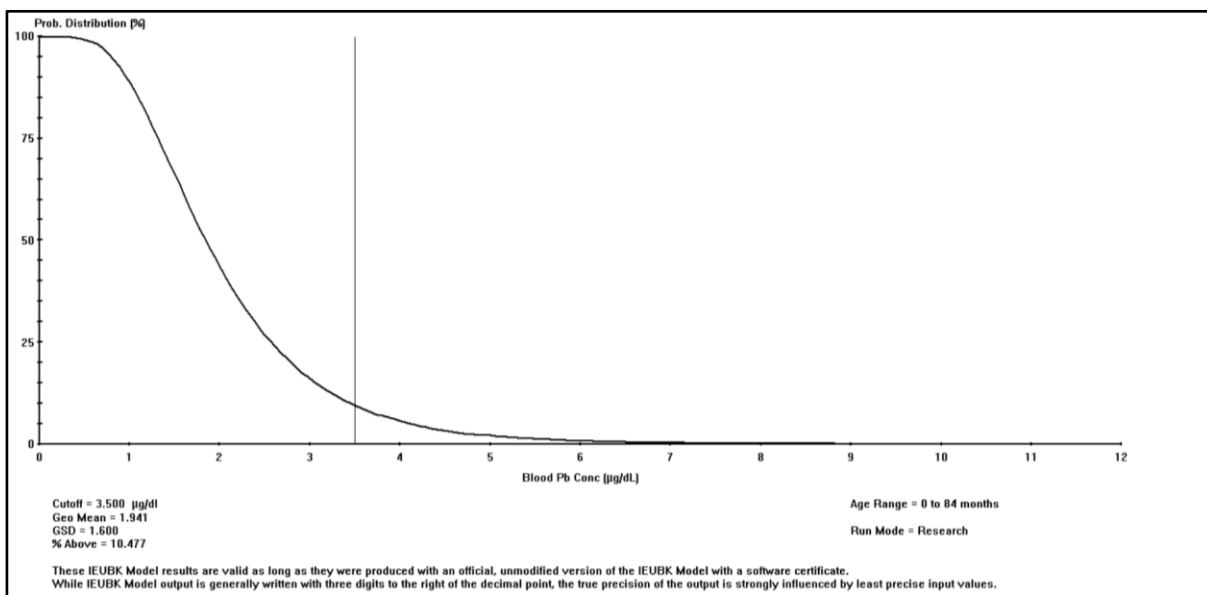
$$\text{Concentración Pb en el aire} = \text{CPb} \times (1/\text{PEF})$$

$$= 151,7 \text{ mg/kg} \times (1/1,36 \cdot 10^9)$$

$$\text{CPb} = 1,12 \cdot 10^{-4} \text{ } \mu\text{g/m}^3$$

Luego, la curva de distribución de los valores de plomo en sangre de acuerdo al modelo IEUBK en el escenario de niños expuestos a la concentración representativa de Pb en sector Población Rosario se puede apreciar en el **Gráfico n° 4**.

**Gráfico n° 4: Curva de distribución de los valores de plomo en sangre de acuerdo al modelo IEUBK en el escenario de niños expuestos a la concentración representativa de Pb en sector Población Rosario.**



Fuente: Elaboración propia IEUBKwin

De acuerdo a lo obtenido en el modelo, los niveles de plomo estimados en un escenario de niños entre 0 y 7 años de edad expuestos a la fuente contaminante se distribuyen de tal manera que el 10,477% de los niños excederían el nivel de referencia de 3,5 µg/dL. establecido por el Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC), de Estados Unidos.

### 5.3.3.2. Riesgo por exposición a Plomo en sector El Palomar

La concentración de Pb en aire ingresada en el modelo IEUBK para el sector El Palomar fue el siguiente:

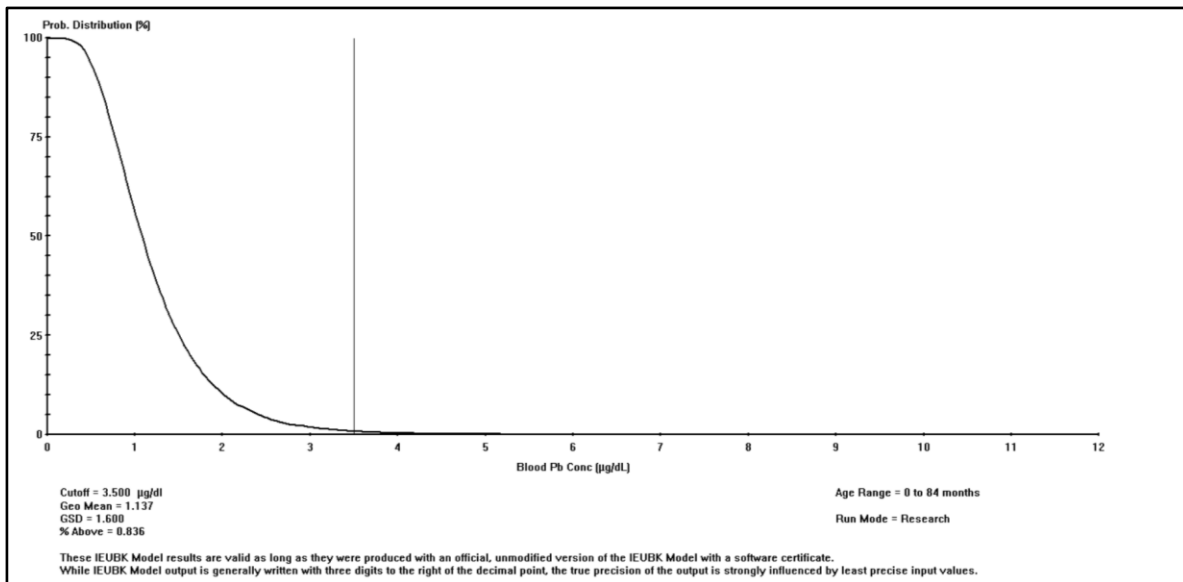
Concentración Pb en el aire =  $C_{Pb} \times (1/PEF)$

=  $25,63 \text{ mg/kg} \times (1/1,36 \cdot 10^9)$

$C_{Pb} = 1,88 \cdot 10^{-5} \mu\text{g/m}^3$

Luego, la curva de distribución de los valores de plomo en sangre de acuerdo con el modelo IEUBK en el escenario de niños expuestos a la concentración representativa de Pb en sector El Palomar se puede apreciar en la ilustración a continuación.

**Gráfico nº 5: Curva de distribución de los valores de plomo en sangre de acuerdo al modelo IEUBK en el escenario de niños expuestos a la concentración representativa de Pb en sector El Palomar.**



Fuente: Elaboración propia IEUBKwin

De acuerdo a lo obtenido en el modelo, los niveles de plomo estimados en un escenario de niños entre 0 y 7 años de edad expuestos a la fuente contaminante se distribuyen de tal manera que el 0,836 % de los niños excederían el nivel de referencia de 3,5 µg/dL establecido por el Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC), de Estados Unidos.

### 5.3.3.3. Riesgo por exposición a Plomo en sector La Viñita

La concentración de Pb en aire ingresada en el modelo IEUBK para el sector La Viñita fue el siguiente:

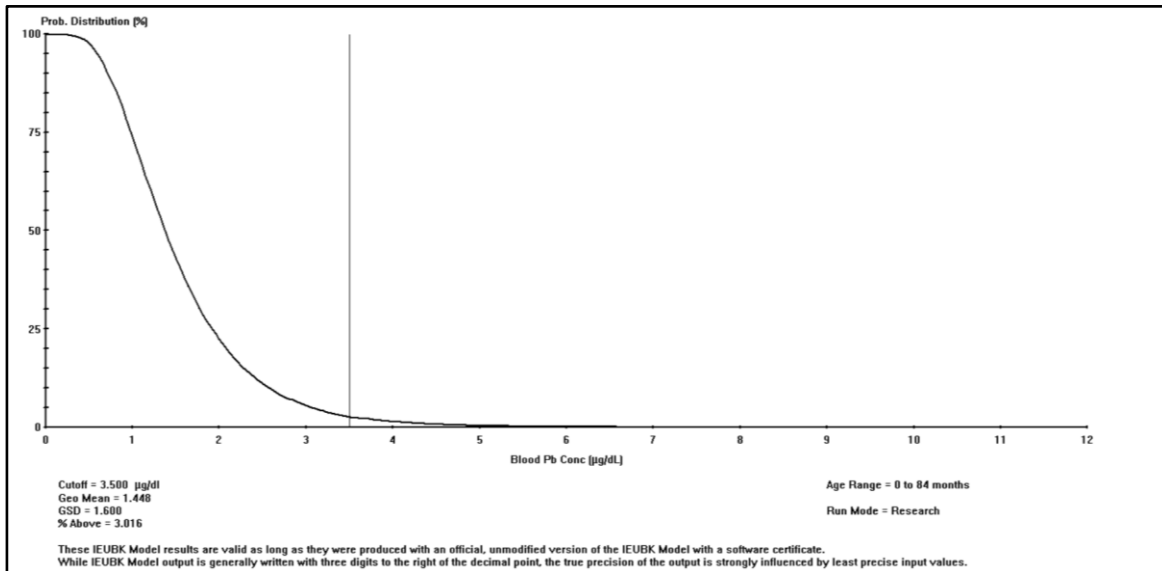
Concentración Pb en el aire =  $C_{Pb} \times (1/PEF)$

=  $73,30 \text{ mg/kg} \times (1/1,36 \cdot 10^9)$

$$CPb = 5,39 \cdot 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Luego, la curva de distribución de los valores de plomo en sangre de acuerdo al modelo IEUBK en el escenario de niños expuestos a la concentración representativa de Pb en sector La Viñita se puede apreciar en la ilustración a continuación.

**Gráfico nº 6: Curva de distribución de los valores de plomo en sangre de acuerdo al modelo IEUBK en el escenario de niños expuestos a la concentración representativa de Pb en sector La Viñita.**



Fuente: Elaboración propia IEUBKwin

De acuerdo a lo obtenido en el modelo, los niveles de plomo estimados en un escenario de niños entre 0 y 7 años de edad expuestos a la fuente contaminante se distribuyen de tal manera que el 3,016 % de los niños excederían el nivel de referencia de 3,5 µg/dL establecido por el Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC), de Estados Unidos.

#### 5.3.3.4. Riesgo por exposición a Plomo en sector Paipote

La concentración de Pb en aire ingresada en el modelo IEUBK para el sector Paipote fue el siguiente:

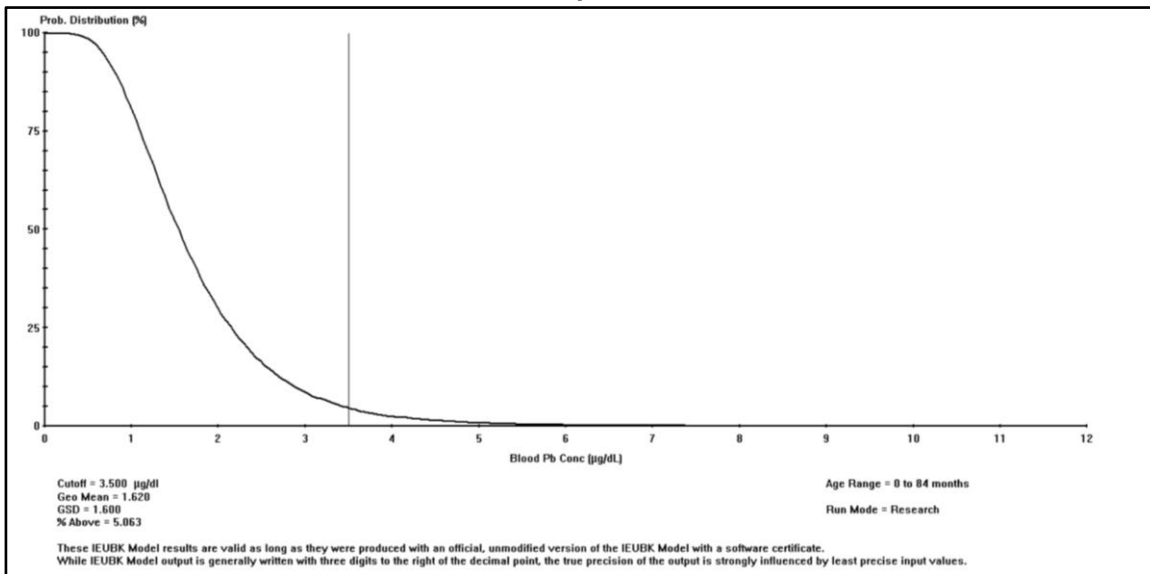
$$\text{Concentración Pb en el aire} = CPb \times (1/PEF)$$

$$= 100,5 \text{ mg}/\text{kg} \times (1/1,36 \cdot 10^9)$$

$$CPb = 7,39 \cdot 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Luego, la curva de distribución de los valores de plomo en sangre de acuerdo al modelo IEUBK en el escenario de niños expuestos a la concentración representativa de Pb en sector Paipote se puede apreciar en la ilustración a continuación.

**Gráfico nº 7: Curva de distribución de los valores de plomo en sangre de acuerdo al modelo IEUBK en el escenario de niños expuestos a la concentración representativa de Pb en sector Paipote.**



Fuente: Elaboración propia IEUBKwin

De acuerdo a lo obtenido en el modelo, los niveles de plomo estimados en un escenario de niños entre 0 y 7 años de edad expuestos a la fuente contaminante se distribuyen de tal manera que el 5,063 % de los niños excederían el nivel de referencia de 3,5 µg/dL establecido por el Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC), de Estados Unidos.

### 5.3.3.5. Riesgo por exposición a Plomo en sector Tierra Amarilla

La concentración de Pb en aire ingresada en el modelo IEUBK para el sector Tierra Amarilla fue el siguiente:

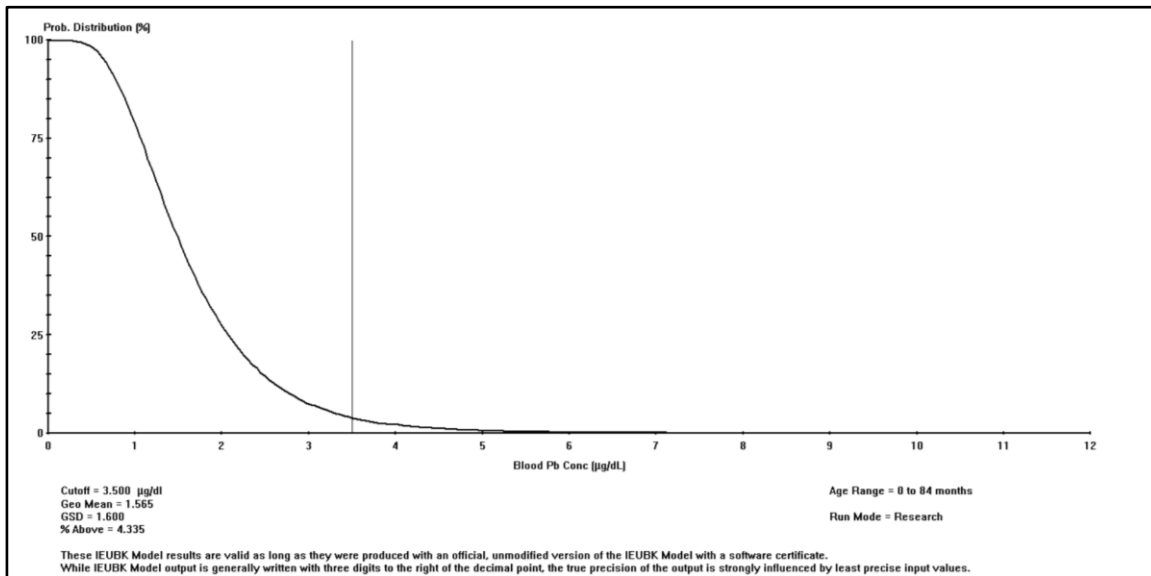
$$\text{Concentración Pb en el aire} = C_{\text{Pb}} \times (1/\text{PEF})$$

$$= 91,7 \text{ mg/kg} \times (1/1,36 \cdot 10^9)$$

$$C_{\text{Pb}} = 6,74 \cdot 10^{-5} \text{ µg/m}^3$$

Luego, la curva de distribución de los valores de plomo en sangre de acuerdo al modelo IEUBK en el escenario de niños expuestos a la concentración representativa de Pb en sector Tierra Amarilla se puede apreciar en la ilustración a continuación.

**Gráfico n° 8: Curva de distribución de los valores de plomo en sangre de acuerdo al modelo IEUBK en el escenario de niños expuestos a la concentración representativa de Pb en sector Tierra Amarilla.**



Fuente: Elaboración propia IEUBKwin

De acuerdo a lo obtenido en el modelo, los niveles de plomo estimados en un escenario de niños entre 0 y 7 años de edad expuestos a la fuente contaminante se distribuyen de tal manera que el 4,335 % de los niños excederían el nivel de referencia de 3,5 µg/dL establecido por el Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC), de Estados Unidos.

En la **Tabla n° 21: Concentración de Pb y porcentaje de niños sobre el nivel de referencia por sector.** se resumen los resultados obtenidos en la aplicación del modelo IEUBK.

**Tabla n° 21: Concentración de Pb y porcentaje de niños sobre el nivel de referencia por sector.**

Sectores	Valores por sector				
	PR	EP	LV	Pa	TA
CPb suelo P95 (mg/kg)	151,7	25,63	73,3	100,5	91,7
CPb aire (ug/m3)	1,12E-04	1,88E-05	5,39E-05	7,39E-05	6,74E-05
% de niños sobre el nivel de referencia (3,5 ug/dL)	10,477	0,836	3,016	5,063	4,335

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.4. Determinación de los Índices de Peligro por efectos no cancerígenos

En los siguientes apartados, se presentan los Índices de Peligro Total calculados para los grupos etarios definidos en el escenario de exposición por cada uno de los sectores en estudio.

### 5.3.4.1. Índices de Peligro Total en Sector Población Rosario

En la **Tabla nº 22** se observa que el Índice de Peligrosidad Total (IPT) para infantes (0 a 8 años de edad) es mayor que uno (IPT<sub>Total</sub> = 3,50), lo que se debe principalmente a la contribución del arsénico (76,73%), que es el único contaminante potencial cuyo IP es mayor a 1, siendo la vía de ingestión la principal contribuyente con un 99,99%.

**Tabla nº 22: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en infantes del sector Población Rosario.**

Fuente de contaminantes	Receptor	Contaminante potencial	Concentración (mg/kg)	IP Ingestión	IP Inhalación	Suma de la contribución de cada contaminante	Porcentaje contribución del contaminante
Suelo Superficial	Infantes	Cd	0,43	2,7E-04	4,9E-07	2,7E-04	0,01
Suelo Superficial	Infantes	Cr	32,65	3,4E-03	3,8E-06	3,4E-03	0,10
Suelo Superficial	Infantes	Cu	1078	3,4E-01	1,2E-08	3,4E-01	9,62
Suelo Superficial	Infantes	Mn	1367	2,8E-02	3,1E-04	2,9E-02	0,82
Suelo Superficial	Infantes	Mo	0,035	8,8E-05	2,0E-10	8,8E-05	0,00
Suelo Superficial	Infantes	Zn	267,5	4,5E-01	3,1E-09	4,5E-01	12,73
Suelo Superficial	Infantes	As	64,5	2,7E+00	4,9E-05	2,7E+00	76,73
Suma de la Contribución de cada ruta (IP)				3,5E+00	3,7E-04	<b>3,50</b>	
Porcentaje ruta				99,99	0,01	<b>IP Total</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la **Tabla nº 23** corresponden al escenario de adolescentes (entre 9 y 18 años), que viven y han estado la mayor parte de su tiempo en contacto con el material particulado del sector. El Índice de Peligrosidad Total (IPT) es inferior a la unidad (IPT<sub>Total</sub> = 0,58), con una contribución por vía de ingestión de 99,98% del total.

**Tabla nº 23: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adolescentes del sector Población Rosario.**

Fuente de contaminantes	Receptor	Contaminante potencial	Concentración (mg/kg)	IP Ingestión	IP Inhalación	Suma de la contribución de cada contaminante	Porcentaje contribución del contaminante
Suelo Superficial	Adolescentes	Cd	0,43	4,48E-05	1,65E-07	4,50E-05	0,01
Suelo Superficial	Adolescentes	Cr	32,65	5,67E-04	1,25E-06	5,68E-04	0,10
Suelo Superficial	Adolescentes	Cu	1078	5,61E-02	4,13E-09	5,61E-02	9,62
Suelo Superficial	Adolescentes	Mn	1367	4,75E-03	1,05E-04	4,85E-03	0,83
Suelo Superficial	Adolescentes	Mo	0,035	1,46E-05	6,70E-11	1,46E-05	0,00
Suelo Superficial	Adolescentes	Zn	267,5	7,43E-02	1,02E-09	7,43E-02	12,73
Suelo Superficial	Adolescentes	As	64,5	4,48E-01	1,65E-05	4,48E-01	76,72
Suma de la Contribución de cada ruta (IP)				5,84E-01	1,23E-04	<b>0,58</b>	
Porcentaje ruta				99,98	0,02	<b>IP Total</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la **Tabla nº 24** corresponden al escenario de adultos (mayores de 18 años), que viven y/o han estado la mayor parte de su tiempo en contacto con el material particulado del sector. El Índice de Peligrosidad Total (IPT) es inferior a la unidad (IPTotal = 0,40), con una contribución por vía de ingestión de 99,98% del total.

**Tabla nº 24: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adultos del sector Población Rosario.**

Fuente de contaminantes	Receptor	Contaminante potencial	Concentración (mg/kg)	IP Ingestión	IP Inhalación	Suma de la contribución de cada contaminante	Porcentaje contribución del contaminante
Suelo Superficial	Adultos	Cd	0,43	3,07E-05	1,13E-07	3,08E-05	0,01
Suelo Superficial	Adultos	Cr	32,65	3,89E-04	8,57E-07	3,90E-04	0,10
Suelo Superficial	Adultos	Cu	1078	3,85E-02	2,83E-09	3,85E-02	9,62
Suelo Superficial	Adultos	Mn	1367	3,25E-03	7,18E-05	3,33E-03	0,83
Suelo Superficial	Adultos	Mo	0,035	1,00E-05	4,60E-11	1,00E-05	0,00
Suelo Superficial	Adultos	Zn	267,5	5,10E-02	7,02E-10	5,10E-02	12,73
Suelo Superficial	Adultos	As	64,5	3,07E-01	1,13E-05	3,07E-01	76,72
Suma de la Contribución de cada ruta (IP)				4,00E-01	8,41E-05	<b>0,40</b>	
Porcentaje ruta				99,98	0,02	<b>IP Total</b>	

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.4.2. Índices de Peligro Total en Sector El Palomar

En la **Tabla nº 25** se observa que el Índice de Peligrosidad Total (IPT) para infantes (0 a 8 años) es mayor que uno (IPTotal = 2,48), lo que se debe principalmente a la contribución del arsénico (73,40%), que es el único contaminante potencial cuyo IP es mayor a 1, siendo la vía de ingestión la principal contribuyente con un 99,99%.

**Tabla nº 25: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en infantes del sector El Palomar.**

Fuente de contaminantes	Receptor	Contaminante potencial	Concentración (mg/kg)	IP Ingestión	IP Inhalación	Suma de la contribución de cada contaminante	Porcentaje contribución del contaminante
Suelo Superficial	infantes	Cd	0,135	8,4E-05	1,6E-07	8,5E-05	0,00
Suelo Superficial	infantes	Cr	42	5,0E-04	4,8E-06	5,0E-04	0,02
Suelo Superficial	infantes	Cu	540,5	1,7E-01	6,2E-09	1,7E-01	6,81
Suelo Superficial	infantes	Mn	798,5	1,7E-02	1,8E-04	1,7E-02	0,68
Suelo Superficial	infantes	Mo	0,035	8,8E-05	2,0E-10	8,8E-05	0,00
Suelo Superficial	infantes	Zn	284,1	4,7E-01	3,3E-09	4,7E-01	19,09

Suelo Superficial	infantes	As	43,7	1,8E+00	3,3E-05	1,8E+00	73,40
Suma de la Contribución de cada ruta (IP)				2,5E+00	2,2E-04	<b>2,48</b>	
Porcentaje ruta				99,99	0,01	<b>IP Total</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la **Tabla nº 26** corresponden al escenario de adolescentes (entre 9 y 18 años), que viven y han estado la mayor parte de su tiempo en contacto con el material particulado del sector. El Índice de Peligrosidad Total (IPT) es inferior a la unidad (IPTotal = 0,41), con una contribución por vía de ingestión de 99,98% del total.

**Tabla nº 26: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adolescentes del sector El Palomar.**

Fuente de contaminantes	Receptor	Contaminante potencial	Concentración (mg/kg)	IP Ingestión	IP Inhalación	Suma de la contribución de cada contaminante	Porcentaje contribución del contaminante
Suelo Superficial	Adolescentes	Cd	0,135	1,41E-05	5,17E-08	1,41E-05	0,00
Suelo Superficial	Adolescentes	Cr	42	7,29E-04	1,61E-06	7,31E-04	0,18
Suelo Superficial	Adolescentes	Cu	540,5	2,82E-02	2,07E-09	2,82E-02	6,80
Suelo Superficial	Adolescentes	Mn	798,5	2,77E-03	6,12E-05	2,83E-03	0,68
Suelo Superficial	Adolescentes	Mo	0,035	1,46E-05	6,70E-11	1,46E-05	0,00
Suelo Superficial	Adolescentes	Zn	284,1	7,89E-02	1,09E-09	7,89E-02	19,06
Suelo Superficial	Adolescentes	As	43,7	3,03E-01	1,12E-05	3,03E-01	73,28
Suma de la Contribución de cada ruta (IP)				4,14E-01	7,40E-05	<b>0,41</b>	
Porcentaje ruta				99,98	0,02	<b>IP Total</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la **Tabla nº 27** corresponden al escenario de adultos (mayores de 18 años), que viven y/o han estado la mayor parte de su tiempo en contacto con el material particulado del sector. El Índice de Peligrosidad Total (IPT) es inferior a la unidad (IPTotal = 0,28), con una contribución por vía de ingestión de 99,98% del total.

**Tabla nº 27: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adultos del sector El Palomar.**

Fuente de contaminantes	Receptor	Contaminante potencial	Concentración (mg/kg)	IP Ingestión	IP Inhalación	Suma de la contribución de cada contaminante	Porcentaje contribución del contaminante
Suelo Superficial	Adultos	Cd	0,135	9,64E-06	3,55E-08	9,68E-06	0,00
Suelo Superficial	Adultos	Cr	42	5,00E-04	1,10E-06	5,01E-04	0,18
Suelo Superficial	Adultos	Cu	540,5	1,93E-02	1,42E-09	1,93E-02	6,80
Suelo Superficial	Adultos	Mn	798,5	1,90E-03	4,19E-05	1,94E-03	0,68
Suelo Superficial	Adultos	Mo	0,035	1,00E-05	4,60E-11	1,00E-05	0,00

Suelo Superficial	Adultos	Zn	284,1	5,41E-02	7,46E-10	5,41E-02	19,06
Suelo Superficial	Adultos	As	43,7	2,08E-01	7,65E-06	2,08E-01	73,28
Suma de la Contribución de cada ruta (IP)				2,84E-01	5,07E-05	<b>0,28</b>	
Porcentaje ruta				99,98	0,02	<b>IP Total</b>	

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.4.3. Índices de Peligro Total en Sector La Viñita

En la **Tabla nº 28** se observa que el Índice de Peligrosidad Total (IPT) para infantes (0 a 8 años) es mayor que uno (IPTotal = 5,17), lo que se debe principalmente a la contribución de arsénico y cobre con un 55,98% y 27,06% respectivamente, siendo los únicos contaminantes cuyo IP es mayor a 1, siendo la vía de ingestión la principal contribuyente con un 99,99%.

**Tabla nº 28: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en infantes del sector La Viñita**

Fuente de contaminantes	Receptor	Contaminante potencial	Concentración (mg/kg) <sup>41</sup>	IP Ingestión	IP Inhalación	Suma de la contribución de cada contaminante	Porcentaje contribución del contaminante
Suelo Superficial	infantes	Cd	0,368	2,3E-04	4,2E-07	2,3E-04	0,00
Suelo Superficial	infantes	Cr	41	4,3E-03	4,7E-06	4,3E-03	0,08
Suelo Superficial	infantes	Cu	4480	1,4E+00	5,1E-08	1,4E+00	27,06
Suelo Superficial	infantes	Mn	1930	4,0E-02	4,4E-04	4,1E-02	0,79
Suelo Superficial	infantes	Mo	0,035	8,8E-05	2,0E-10	8,8E-05	0,00
Suelo Superficial	infantes	Zn	499,2	8,3E-01	5,7E-09	8,3E-01	16,08
Suelo Superficial	infantes	As	69,5	2,9E+00	5,3E-05	2,9E+00	55,98
Suma de la Contribución de cada ruta (IP)				5,2E+00	5,0E-04	<b>5,17</b>	
Porcentaje ruta				99,99	0,01	<b>IP Total</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la **Tabla nº 29** corresponden al escenario de adolescentes (entre 9 y 18 años), que viven y han estado la mayor parte de su tiempo en contacto con el material particulado del sector. El Índice de Peligrosidad Total (IPT) es inferior a la unidad (IPTotal = 0,86), con una contribución por vía de ingestión de 99,98% del total.

**Tabla nº 29: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adolescentes del sector La Viñita.**

Fuente de contaminantes	Receptor	Contaminante potencial	Concentración (mg/kg)	IP Ingestión	IP Inhalación	Suma de la contribución de cada contaminante	Porcentaje contribución del contaminante
Suelo Superficial	Adolescentes	Cd	0,368	3,83E-05	1,41E-07	3,85E-05	0,00
Suelo Superficial	Adolescentes	Cr	41	7,12E-04	1,57E-06	7,13E-04	0,08

Suelo Superficial	Adolescentes	Cu	4480	2,33E-01	1,72E-08	2,33E-01	27,06
Suelo Superficial	Adolescentes	Mn	1930	6,70E-03	1,48E-04	6,85E-03	0,79
Suelo Superficial	Adolescentes	Mo	0,035	1,46E-05	6,70E-11	1,46E-05	0,00
Suelo Superficial	Adolescentes	Zn	499,2	1,39E-01	1,91E-09	1,39E-01	16,08
Suelo Superficial	Adolescentes	As	69,5	4,83E-01	1,77E-05	4,83E-01	55,97
Suma de la Contribución de cada ruta (IP)				8,62E-01	1,67E-04	<b>0,86</b>	
Porcentaje ruta				99,98	0,02	<b>IP Total</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la **Tabla nº 30** corresponden al escenario de adultos (mayores de 18 años), que viven y/o han estado la mayor parte de su tiempo en contacto con el material particulado del sector. El Índice de Peligrosidad Total (IPT) es inferior a la unidad (IPTotal = 0,59), con una contribución por vía de ingestión de 99,98% del total.

**Tabla nº 30: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adultos del sector La Viñita.**

Fuente de contaminantes	Receptor	Contaminante potencial	Concentración (mg/kg)	IP Ingestión	IP Inhalación	Suma de la contribución de cada contaminante	Porcentaje contribución del contaminante
Suelo Superficial	Adultos	Cd	0,368	2,63E-05	9,66E-08	2,64E-05	0,00
Suelo Superficial	Adultos	Cr	41	4,88E-04	1,08E-06	4,89E-04	0,08
Suelo Superficial	Adultos	Cu	4480	1,60E-01	1,18E-08	1,60E-01	27,06
Suelo Superficial	Adultos	Mn	1930	4,60E-03	1,01E-04	4,70E-03	0,79
Suelo Superficial	Adultos	Mo	0,035	1,00E-05	4,60E-11	1,00E-05	0,00
Suelo Superficial	Adultos	Zn	499,2	9,51E-02	1,31E-09	9,51E-02	16,08
Suelo Superficial	Adultos	As	69,5	3,31E-01	1,22E-05	3,31E-01	55,97
Suma de la Contribución de cada ruta (IP)				5,91E-01	1,15E-04	<b>0,59</b>	
Porcentaje ruta				99,98	0,02	<b>IP Total</b>	

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.3.4.4. Índices de Peligro Total en Sector Paipote

En la **Tabla nº 31** se observa que el Índice de Peligrosidad Total (IPT) para infantes (0 a 8 años) es mayor que uno (IPTotal = 5,03), lo que se debe principalmente a la contribución del arsénico (68,37%), que es el único contaminante potencial cuyo IP es mayor a 1, siendo la vía de ingestión la principal contribuyente con un 99,99%.

**Tabla nº 31: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en infantes del sector Paipote.**

Fuente de contaminantes	Receptor	Contaminante potencial	Concentración (mg/kg) <sup>41</sup>	IP Ingestión	IP Inhalación	Suma de la contribución de cada contaminante	Porcentaje contribución del contaminante
Suelo Superficial	Infantes	Cd	1,002	6,3E-04	1,2E-06	6,3E-04	0,01
Suelo Superficial	Infantes	Cr	46,35	4,8E-03	5,3E-06	4,8E-03	0,10
Suelo Superficial	Infantes	Cu	2502	7,8E-01	2,9E-08	7,8E-01	15,55
Suelo Superficial	Infantes	Mn	890,6	1,9E-02	2,0E-04	1,9E-02	0,37
Suelo Superficial	Infantes	Mo	2,388	6,0E-03	1,4E-08	6,0E-03	0,12
Suelo Superficial	Infantes	Zn	467,4	7,8E-01	5,4E-09	7,8E-01	15,49
Suelo Superficial	Infantes	As	82,52	3,4E+00	6,3E-05	3,4E+00	68,37
Suma de la Contribución de cada ruta (IP)				5,0E+00	2,7E-04	<b>5,03</b>	
Porcentaje ruta				99,99	0,01	<b>IP Total</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la **Tabla nº 32** corresponden al escenario de adolescentes (entre 9 y 18 años), que viven y han estado la mayor parte de su tiempo en contacto con el material particulado del sector. El Índice de Peligrosidad Total (IPT) es ligeramente inferior a la unidad (IPTotal = 0,84), con una contribución por vía de ingestión de 99,99% del total.

**Tabla nº 32: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adolescentes del sector Paipote.**

Fuente de contaminantes	Receptor	Contaminante potencial	Concentración (mg/kg)	IP Ingestión	IP Inhalación	Suma de la contribución de cada contaminante	Porcentaje contribución del contaminante
Suelo Superficial	Adolescentes	Cd	1,002	1,04E-04	3,84E-07	1,05E-04	0,01
Suelo Superficial	Adolescentes	Cr	46,35	8,05E-04	1,78E-06	8,06E-04	0,10
Suelo Superficial	Adolescentes	Cu	2502	1,30E-01	9,58E-09	1,30E-01	15,55
Suelo Superficial	Adolescentes	Mn	890,6	3,09E-03	6,82E-05	3,16E-03	0,38
Suelo Superficial	Adolescentes	Mo	2,388	9,95E-04	4,57E-09	9,95E-04	0,12
Suelo Superficial	Adolescentes	Zn	467,4	1,30E-01	1,79E-09	1,30E-01	15,49
Suelo Superficial	Adolescentes	As	82,52	5,73E-01	2,11E-05	5,73E-01	68,36
Suma de la Contribución de cada ruta (IP)				8,38E-01	9,15E-05	<b>0,84</b>	
Porcentaje ruta				99,99	0,01	<b>IP Total</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la **Tabla nº 33** corresponden al escenario de adultos (mayores de 18 años), que viven y/o han estado la mayor parte de su tiempo en contacto con el material particulado del sector. El Índice de Peligrosidad Total (IPT) es inferior a la unidad (IPTotal = 0,57), con una contribución por vía de ingestión de 99,99% del total.

**Tabla nº 33: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adultos del sector Paipote.**

Fuente de contaminantes	Receptor	Contaminante potencial	Concentración (mg/kg)	IP Ingestión	IP Inhalación	Suma de la contribución de cada contaminante	Porcentaje contribución del contaminante
Suelo Superficial	Adultos	Cd	1,002	7,16E-05	2,63E-07	7,18E-05	0,01
Suelo Superficial	Adultos	Cr	46,35	5,52E-04	1,22E-06	5,53E-04	0,10
Suelo Superficial	Adultos	Cu	2502	8,94E-02	6,57E-09	8,94E-02	15,55
Suelo Superficial	Adultos	Mn	890,6	2,12E-03	4,68E-05	2,17E-03	0,38
Suelo Superficial	Adultos	Mo	2,388	6,82E-04	3,14E-09	6,82E-04	0,12
Suelo Superficial	Adultos	Zn	467,4	8,90E-02	1,23E-09	8,90E-02	15,49
Suelo Superficial	Adultos	As	82,52	3,93E-01	1,44E-05	3,93E-01	68,36
Suma de la Contribución de cada ruta (IP)				5,75E-01	6,27E-05	<b>0,57</b>	
Porcentaje ruta				99,99	0,01	<b>IP Total</b>	

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.3.4.5. Índices de Peligro Total en Sector Tierra Amarilla

En la Tabla X se observa que el Índice de Peligrosidad Total (IPT) para infantes (0 a 8 años) es mayor que uno (IPTotal = 9,51), lo que se debe principalmente a la contribución de arsénico y cobre con un 74,74% y 14,87% respectivamente. Estos son los únicos contaminantes cuyo IP es mayor a 1, siendo la vía de ingestión la principal contribuyente con casi un 100% del aporte total.

**Tabla nº 34: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en infantes del sector Tierra Amarilla.**

Fuente de contaminantes	Receptor	Contaminante potencial	Concentración (mg/kg) <sup>41</sup>	IP Ingestión	IP Inhalación	Suma de la contribución de cada contaminante	Porcentaje contribución del contaminante
Suelo Superficial	infantes	Cd	1,116	7,0E-04	1,3E-06	7,0E-04	0,01
Suelo Superficial	infantes	Cr	41,91	4,4E-03	4,8E-06	4,4E-03	0,05
Suelo Superficial	infantes	Cu	4524	1,4E+00	5,2E-08	1,4E+00	14,87
Suelo Superficial	infantes	Mn	937,3	2,0E-02	2,2E-04	2,0E-02	0,21
Suelo Superficial	infantes	Mo	2,63	6,6E-03	1,5E-08	6,6E-03	0,07
Suelo Superficial	infantes	Zn	573,9	9,6E-01	6,6E-09	9,6E-01	10,06
Suelo Superficial	infantes	As	170,5	7,1E+00	1,3E-04	7,1E+00	74,74
Suma de la Contribución de cada ruta (IP)				9,5E+00	3,5E-04	<b>9,51</b>	
Porcentaje ruta				100,00	0,00	<b>IP Total</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la **Tabla nº 35** corresponden al escenario de adolescentes (entre 9 y 18 años de edad), que viven y han estado la mayor parte de su tiempo en contacto con el material particulado del sector. El Índice de Peligrosidad Total (IPT) es superior a la unidad (IPTotal = 1,58), con una contribución por vía de ingestión de 99,99% del total.

**Tabla nº 35: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adolescentes del sector Tierra Amarilla.**

Fuente de contaminantes	Receptor	Contaminante potencial	Concentración (mg/kg)	IP Ingestión	IP Inhalación	Suma de la contribución de cada contaminante	Porcentaje contribución del contaminante
Suelo Superficial	Adolescentes	Cd	1,116	1,16E-04	4,27E-07	1,17E-04	0,01
Suelo Superficial	Adolescentes	Cr	41,91	7,28E-04	1,61E-06	7,29E-04	0,05
Suelo Superficial	Adolescentes	Cu	4524	2,36E-01	1,73E-08	2,36E-01	14,87
Suelo Superficial	Adolescentes	Mn	937,3	3,25E-03	7,18E-05	3,33E-03	0,21
Suelo Superficial	Adolescentes	Mo	2,63	1,10E-03	5,04E-09	1,10E-03	0,07
Suelo Superficial	Adolescentes	Zn	573,9	1,59E-01	2,20E-09	1,59E-01	10,06
Suelo Superficial	Adolescentes	As	170,5	1,18E+00	4,35E-05	1,18E+00	74,73
Suma de la Contribución de cada ruta (IP)				1,58E+00	1,17E-04	<b>1,58</b>	
Porcentaje ruta				99,99	0,01	<b>IP Total</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la **Tabla nº 36** corresponden al escenario de adultos (mayores de 18 años de edad), que viven y/o han estado la mayor parte de su tiempo en contacto con el material particulado del sector. El Índice de Peligrosidad Total (IPT) es ligeramente superior a la unidad (IPTotal = 1,09), con una contribución por vía de ingestión de 99,99% del total.

**Tabla nº 36: Cálculo de Índice de Peligro para efectos no cancerígenos, en adultos del sector Tierra Amarilla.**

Fuente de contaminantes	Receptor	Contaminante potencial	Concentración (mg/kg)	IP Ingestión	IP Inhalación	Suma de la contribución de cada contaminante	Porcentaje contribución del contaminante
Suelo Superficial	Adultos	Cd	1,116	7,97E-05	2,93E-07	8,00E-05	0,01
Suelo Superficial	Adultos	Cr	41,91	4,99E-04	1,10E-06	5,00E-04	0,05
Suelo Superficial	Adultos	Cu	4524	1,62E-01	1,19E-08	1,62E-01	14,87
Suelo Superficial	Adultos	Mn	937,3	2,23E-03	4,92E-05	2,28E-03	0,21
Suelo Superficial	Adultos	Mo	2,63	7,51E-04	3,45E-09	7,51E-04	0,07
Suelo Superficial	Adultos	Zn	573,9	1,09E-01	1,51E-09	1,09E-01	10,06
Suelo Superficial	Adultos	As	170,5	8,12E-01	2,98E-05	8,12E-01	74,73
Suma de la Contribución de cada ruta (IP)				1,09E+00	8,05E-05	<b>1,09</b>	
Porcentaje ruta				99,99	0,01	<b>IP Total</b>	

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.5. Determinación del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV)

Los resultados para los grupos etarios de cada sector se presentan en las siguientes tablas, con los cálculos del riesgo extra de cáncer de por vida para As, Cr (VI) y Cd (contaminantes con evidencia carcinogénica detectados en las muestras) por cada vía de exposición, para cada receptor del escenario de exposición.

**Tabla nº 37: Cálculo del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) para receptores del sector Población Rosario.**

Contaminante	Receptor	RECV oral	RECV inhalatorio	RECV Total	RECV TOTAL
Cd	Adultos	Sin SF	8,711E-16	8,7E-16	<b>5,9E-05</b>
Cr VI	Adultos	2,49872E-07	3,087E-12	2,5E-07	
As	Adultos	5,923E-05	3,121E-13	5,9E-05	
Cd	Adolescentes	Sin SF	3,811E-16	3,8E-16	<b>2,6E-05</b>
Cr VI	Adolescentes	1,09E-07	1,350E-12	1,1E-07	
As	Adolescentes	2,592E-05	1,366E-13	2,6E-05	
Cd	infantes	Sin SF	1,016E-15	1,0E-15	<b>1,4E-04</b>
Cr VI	infantes	5,830E-07	3,601E-12	5,8E-07	
As	infantes	1,382E-04	3,642E-13	1,4E-04	

**Tabla nº 38: Cálculo del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) para receptores del sector El Palomar.**

Contaminante	Receptor	RECV oral	RECV inhalatorio	RECV Total	RECV TOTAL
Cd	Adultos	Sin SF	2,735E-16	2,7E-16	<b>4,0E-05</b>
Cr VI	Adultos	3,2143E-07	3,971E-12	3,2E-07	
As	Adultos	4,013E-05	2,115E-13	4,0E-05	
Cd	Adolescentes	Sin SF	5,584E-15	5,6E-15	<b>1,8E-05</b>
Cr VI	Adolescentes	1,406E-07	3,722E-14	1,4E-07	
As	Adolescentes	1,756E-05	9,252E-14	1,8E-05	
Cd	infantes	Sin SF	3,191E-16	3,2E-16	<b>9,4E-05</b>
Cr VI	infantes	7,500E-07	4,632E-12	7,5E-07	
As	infantes	9,364E-05	2,467E-13	9,4E-05	

**Tabla nº 39: Cálculo del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) para receptores del sector La Viñita.**

Contaminante	Receptor	RECV oral	RECV inhalatorio	RECV Total	RECV TOTAL
Cd	Adultos	Sin SF	7,455E-16	7,5E-16	<b>6,4E-05</b>

Cr VI	Adultos	3,1378E-07	3,876E-12	3,1E-07	
As	Adultos	6,383E-05	3,363E-13	6,4E-05	
Cd	Adolescentes	Sin SF	1,522E-14	1,5E-14	
Cr VI	Adolescentes	1,373E-07	3,634E-14	1,4E-07	<b>2,8E-05</b>
As	Adolescentes	2,792E-05	1,471E-13	2,8E-05	
Cd	infantes	Sin SF	8,697E-16	8,7E-16	<b>1,5E-04</b>
Cr VI	infantes	7,321E-07	4,522E-12	7,3E-07	
As	infantes	1,489E-04	3,924E-13	1,5E-04	

**Tabla nº 40: Cálculo del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) para receptores del sector Paipote.**

Contaminante	Receptor	RECV oral	RECV inhalatorio	RECV Total	RECV TOTAL
Cd	Adultos	Sin SF	2,030E-15	2,0E-15	<b>7,6E-05</b>
Cr VI	Adultos	3,5472E-07	4,382E-12	3,5E-07	
As	Adultos	7,578E-05	3,994E-13	7,6E-05	
Cd	Adolescentes	Sin SF	4,144E-14	4,1E-14	<b>3,3E-05</b>
Cr VI	Adolescentes	1,552E-07	4,108E-14	1,6E-07	
As	Adolescentes	3,316E-05	1,747E-13	3,3E-05	
Cd	infantes	Sin SF	2,368E-15	2,4E-15	<b>1,8E-04</b>
Cr VI	infantes	8,277E-07	5,112E-12	8,3E-07	
As	infantes	1,768E-04	4,659E-13	1,8E-04	

**Tabla nº 41: Cálculo del Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) para receptores del sector Tierra Amarilla.**

Contaminante	Receptor	RECV oral	RECV inhalatorio	RECV Total por Vía	RECV TOTAL
Cd	Adultos	Sin SF	2,261E-15	2,261E-15	<b>1,6E-04</b>
Cr VI	Adultos	3,207E-07	3,962E-12	3,207E-07	
As	Adultos	1,566E-04	8,251E-13	1,566E-04	
Cd	Adolescentes	Sin SF	4,616E-14	4,6E-14	<b>6,9E-05</b>
Cr VI	Adolescentes	1,403E-07	3,714E-14	1,4E-07	
As	Adolescentes	6,850E-05	3,610E-13	6,9E-05	
Cd	infantes	Sin SF	2,638E-15	2,638E-15	<b>3,7E-04</b>
Cr VI	infantes	7,484E-07	4,622E-12	7,484E-07	
As	infantes	3,654E-04	9,626E-13	3,654E-04	

## 6. Discusión

### 6.1. Elaboración del modelo conceptual

Las vías de exposición determinadas en el modelo conceptual de exposición se pueden designar como completa, potencial o eliminada dependiendo de la existencia o no de los cinco elementos (fuente, transporte por compartimento ambiental, punto de exposición, ruta de exposición humana y un receptor). En una vía de exposición “completa” se presentan los cinco elementos y en una vía de exposición “potencial” al menos uno de los cinco elementos no ha sido confirmado, pero puede existir. A su vez, una vía de exposición puede ser eliminada si al menos uno de los cinco elementos nunca estará presente. La vía completa podrá, además, ser actual o pasada. Por lo anterior, al tener presente los cinco elementos podemos considerar que es una vía completa apropiada para la identificación de la hipótesis de exposición (EPA, 2011a).

La utilización de los factores dispuestos por la USEPA en el modelo aplicado a la población de nuestro país conlleva un nivel de incertidumbre producto de las diferencias físicas existentes. En futuros casos, para disminuir el nivel de incertidumbre se hace necesario disponer de estos factores de manera local, los que debieran capturar los parámetros más relevantes para estimar exposición, al menos en los grupos más vulnerables.

En base al alcance de este estudio, no se ha encontrado evidencia de que los metales presentes en los sectores considerados hayan migrado hacia vías (agua-suelo-alimentos) por lo que no se ha demostrado que existan rutas de exposición efectivas y alternativas para los receptores, sino sólo inhalación e ingestión involuntaria. Esto puede ser, porque no existan tales rutas o porque las capacidades analíticas no han permitido detectarlas. En el caso estudio, no se consideró la ingesta oral voluntaria por consumo de alimentos y agua, ya que, no se dispone de los valores de concentración para estos elementos traza en el tejido de los vegetales que se consumen en el sector, y se desconoce la procedencia de estos y del agua potable.

### 6.2. Identificación de los contaminantes

El método para la recolección fue un muestreo de tipo aleatorio simple, en donde cada ejemplar posible tuvo la misma probabilidad de ser seleccionado y las unidades de muestreo se extrajeron independientemente (Steel & Torrie, 1993). Además, el diseño del mismo se realizó considerando los criterios de Puga *et al.*, 2006, quienes establecen que las mayores concentraciones de elementos se darán en sitios cercanos a la fuente, disminuyendo la concentración a medida que se alejan de ella, por lo que, se eligieron suelos residenciales que se encontraban cercanos a relaves abandonados (<2 km). Según fue el caso y las posibilidades, se recogieron muestras de patios interiores y exteriores de casas, colegios y plazas. Se consideró 1 kg de porción de suelo como cantidad suficiente de muestra, siendo

esta tomada con palas y escobillas de muestreo, para luego ser selladas herméticamente en bolsas plásticas aislantes y transportadas hacia el laboratorio.

Es importante señalar que las escorias y/o relaves que se encuentran cercanos a los puntos de muestreo y posiblemente contribuyentes principales de la variedad y niveles de contaminantes presentes en las muestras, son en algunos casos materiales vítreos, los que se caracterizan por ser de alta estabilidad química y poco soluble. Es por esta razón que, para obtener datos más precisos de las dosis, lo correcto sería realizar digestiones de las muestras obtenidas, simulando los escenarios de exposición relevantes de ingestión accidental de suelo y de contacto dérmico, con el objetivo de determinar los factores de absorción de los metales de interés en futuros estudios.

En consecuencia, debido a la ausencia de normas de calidad ambiental, el reglamento del SEIA en su artículo n°11 establece las normas extranjeras de referencia que se utilizarán para evaluar si existe o no el riesgo indicado en las letras a) y b) del Art n°11 de la Ley n°19.300 de Bases Generales del Medioambiente, asociado al impacto en los recursos naturales. En este sentido, las normas de calidad ambiental vigentes serán aquellas provenientes de los siguientes países: Alemania, Argentina, Australia, Brasil, Canadá, España, México, Estados Unidos de América, Nueva Zelanda, Países Bajos, Italia, Japón, Suecia y Confederación Suiza. Sin embargo, no se debe perder de vista que el objetivo del reglamento del SEIA es utilizar la normativa de estos países como antecedentes para establecer si un determinado proyecto debe ser sometido a una evaluación de impacto ambiental y no como una norma de calidad ambiental. A continuación, se describen los estándares extranjeros a utilizar en este estudio para la comparación de los resultados obtenidos.

### 6.2.1. Directivas de Kelley

La Unión Europea ha propuesto las directivas de Kelley para algunos elementos, con el fin de clasificar los suelos según grado de contaminación (**Tabla n° 42**) estableciendo cinco categorías: (1) no contaminado, (2) contaminación ligera, (3) contaminación, (4) contaminación alta y (5) contaminación inusualmente alta (SAG, 2005).

**Tabla n° 42: Directivas de Kelley para la clasificación de suelos secos contaminados (mg/kg).**

Parámetro (mg/kg)	Valores típicos para suelos no contaminados	Contaminación ligera	Contaminación	Contaminación alta	Contaminación inusualmente alta
pH (ácido)*	6 - 7	5 - 6	4 - 5	2 - 4	< 2

pH (alcalino) *	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 12	> 12
As	0 - 30	30 - 50	50 - 100	100 - 500	> 500
Cd	0 - 1	1 - 3	3 - 10	10 - 50	> 50
Cr	0 - 100	100 - 200	200 - 500	500 - 2500	> 2500
Pb	0 - 500	500 - 1000	1000 - 2000	2000 - 1,0%	> 1%
Mn	0 - 500	500 - 1000	1000 - 2000	2000 - 1,0%	> 1%

\*Valores corresponden a escala de pH. Fuente: SAG, 2005. \*\*Con el objetivo de hacer la referencia en los resultados, a cada nivel de contaminación se le asignó un número de 1 a 4 junto con la letra K.

De forma complementaria, con el objetivo de contar con una mayor diversidad de referencias en cuanto a normativas extranjeras, se presentan también los estándares de los siguientes países: Canadá, Brasil (Sao Paulo), España (País Vasco), y México.

### 6.2.2. Canadá. Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health

Los criterios canadienses de estándares para la calidad del suelo (CCME, 1999; CCME, 2007) (Tabla nº 43) incorporan otros elementos de interés y establecen categorías de evaluación a partir del uso del recurso. Así, la información de concentración de diversos parámetros de referencia es entregada según el uso del suelo (Agrícola, Residencial/Recreacional, Comercial, e Industrial) y de acuerdo con dos criterios: Salud Humana y Calidad Ambiental.

**Tabla nº 43: Límites máximos permitidos en los criterios canadienses para la calidad del suelo**  
**Uso del Suelo**

Metal (mg/kg)	Uso agrícola	Uso residencial/parques	Uso comercial	Uso industrial
Cd	1,4	1,4	22	22
Zn	200	200	360	360
Cr	64	64	87	87
As	12	12	12	12
Cu	63	63	91	91
Ni	50	50	50	50
Pb	70	140	260	600
Mo	5	10	40	40

**6.2.3. Sao Paulo (Brasil). Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB).  
Decisão de diretoria Nº195-2005- E, de 23 de novembro de 2005**

La Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental (CETESB) de Sao Paulo, Brasil, mediante su Directriz Nº195/2005 estableció las disposiciones sobre la aprobación de valores orientadores para suelos y aguas subterráneas en el Estado de Sao Paulo (**Tabla nº 44**). Los valores de referencia que se indican corresponden a concentraciones que definen a un suelo como limpio o de calidad natural a partir de una información estadística de análisis realizados en dicho Estado. Además, se presentan también valores de prevención, los cuales corresponden a una concentración de una determinada sustancia por encima de la cual pueden ocurrir alteraciones perjudiciales a la calidad del suelo. Por último, los valores de intervención para cada uso de suelo que se indican se refieren a la concentración de una sustancia en suelo por encima de la cual existen riesgos potenciales directos e indirectos a la salud humana considerando un escenario de exposición genérico (Para mayor información referirse a CETESB, 2005).

**Tabla nº 44; Valores orientadores para elementos en suelos en el Estado de Sao Paulo, Brasil.**

<b>Indicadores por uso de suelo</b>					
<b>Metal (mg/kg)</b>	<b>Valor base de referencia</b>	<b>Valor de prevención</b>	<b>Valor de intervención/ Uso agrícola</b>	<b>Valor de intervención/ Uso residencial</b>	<b>Valor de intervención/ Uso industrial</b>
Cd	<0,5	1,3	3	8	20
Zn	60	300	450	1000	2000
Cr	40	75	150	300	400
As	3,5	15	35	55	150
Cu	35	60	200	400	600
Pb	17	72	180	300	900
Mo	<4	30	50	100	120

**6.2.4. País Vasco (España) LEY 1/2005, de 4 de febrero, para la prevención y corrección de la contaminación del suelo.**

La referida ley establece los principios de la política de suelos contaminados de la Comunidad Autónoma del País Vasco y las obligaciones derivadas de la declaración de un suelo como contaminado, introduciendo la vía convencional para posibilitar su recuperación. La ley tiene por objeto la protección del suelo de la Comunidad y la prevención de su contaminación derivada de acciones antrópicas, estableciendo el régimen aplicable a los suelos contaminados y alterados (para más información referirse a LEY 1/2005). La **Tabla nº 45** presenta los criterios establecidos en dicho territorio según el uso que se le asigna al suelo.

**Tabla nº 45: Valores indicativos para la evaluación de la calidad del suelo en la Comunidad Autónoma del País Vasco, España**

Uso del suelo					
Metal (mg/kg)	Uso industrial	Uso como parque público	Uso urbano	Uso en área de juego infantil	Otros usos
Cd	50	25	8	5	5
Cr	550	400	200	90	200
As	200	30	30	30	30
Pb	1000	450	150	120	120
Mo	750	250	75	75	75

**6.2.5. México. Norma Oficial Mexicana para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004)**

La presente norma de 2004, establece criterios para la caracterización y determinación de concentraciones de remediación de suelos contaminados por los siguientes elementos: As, Ba, Be, Cd, CrVI, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, T, V y sus compuestos inorgánicos; así como los criterios de remediación. Se utiliza el término Concentración de Referencia Total (CRT), la cual corresponde a la masa del elemento químico, expresada en mg/kg y en base seca, por encima de la cual se considera que existe riesgo de que se generen efectos adversos para la salud. Se establece para diferentes usos. La **Tabla nº 46** presenta una selección de los elementos de interés para este estudio.

**Tabla nº 46: Concentraciones de referencia totales (CRT) (mg/kg) por tipo de uso de suelo en México.**

Metal (mg/kg)	Uso del suelo Agrícola/Residencial/ Comercial	Uso del suelo Industrial
Cd	37	450
CrVI	280	510
As	22	260
Pb	400	800

En la siguiente tabla, se puede observar que los valores de las concentraciones encontradas en las muestras de los distintos sectores durante el año 2013 superaron en la mayoría de los casos a los criterios establecidos para uso de suelo residencial en la normativa extranjera.

**Tabla nº 47: Comparación de los valores P95 de contaminantes en suelo, obtenidos en 2013, con los criterios establecidos en normativas extranjeras.**

Sector	Contaminante	Valor Obtenido (mg/kg)	Nivel de las concentraciones obtenidas versus la referencia normativa extranjera, para uso residencial de suelos. En color rojo aquellos valores que superan la referencia y en color azul aquellos que se encuentran por debajo de esta.					
			Canadá	Australia	México	Brasil, São Paulo	País Vasco, España.	Promedio de referencias
Población Rosario	As	64,50	438%	-36%	193%	17%	115%	47%
	Cd	0,43	-96%	-98%	-99%	-95%	-95%	-97%
	Cr	32,65	-49%	-100%	Sin datos	Sin datos	-84%	-100%
	Cu	1078,00	1611%	8%	Sin datos	170%	Sin datos	Sin datos
	Pb	1367,00	876%	356%	242%	356%	811%	430%
	Mn	0,04	Sin datos	-100%	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
	Mo	151,70	1417%	-61%	Sin datos	52%	102%	6%
	Zn	267,50	7%	-96%	Sin datos	-73%	Sin datos	Sin datos
El Palomar	As	43,70	264%	-56%	99%	-21%	46%	0%
	Cd	0,14	-99%	-99%	-100%	-98%	-98%	-99%
	Cr	42,00	-34%	-100%	Sin datos	Sin datos	-79%	-100%
	Cu	540,50	758%	-46%	Sin datos	35%	Sin datos	Sin datos
	Pb	798,50	470%	166%	100%	166%	432%	209%
	Mn	0,04	Sin datos	-100%	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
	Mo	25,63	156%	-93%	Sin datos	-74%	-66%	-82%
	Zn	284,10	14%	-96%	Sin datos	-72%	Sin datos	Sin datos
La Viñita	As	69,50	479%	-31%	216%	26%	132%	59%
	Cd	0,37	-96%	-98%	-99%	-95%	-95%	-98%
	Cr	41,00	-36%	-100%	Sin datos	Sin datos	-80%	-100%
	Cu	4480,00	7011%	348%	Sin datos	1020%	Sin datos	Sin datos
	Pb	1930,00	1279%	543%	383%	543%	1187%	648%
	Mn	0,04	Sin datos	-100%	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
	Mo	73,30	633%	-81%	Sin datos	-27%	-2%	-49%
	Zn	499,20	100%	-93%	Sin datos	-50%	Sin datos	Sin datos
Paipote	As	82,52	588%	-17%	275%	50%	175%	88%
	Cd	1,00	-90%	-95%	-97%	-87%	-87%	-94%
	Cr	46,35	-28%	-100%	Sin datos	Sin datos	-77%	-100%
	Cu	2502,00	3871%	150%	Sin datos	526%	Sin datos	Sin datos
	Pb	890,60	536%	197%	123%	197%	494%	245%
	Mn	2,39	Sin datos	-100%	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
	Mo	100,50	905%	-74%	Sin datos	0%	34%	-30%
	Zn	467,40	87%	-93%	Sin datos	-53%	Sin datos	Sin datos
Tierra Amarilla	As	170,50	1321%	71%	675%	210%	468%	289%
	Cd	1,12	-89%	-94%	-97%	-86%	-86%	-93%
	Cr	41,91	-35%	-100%	Sin datos	Sin datos	-79%	-100%
	Cu	4524,00	7081%	352%	Sin datos	1031%	Sin datos	Sin datos
	Pb	937,30	570%	212%	134%	212%	525%	263%
	Mn	2,63	Sin datos	-100%	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
	Mo	91,70	817%	-76%	Sin datos	-8%	22%	-36%
	Zn	573,90	130%	-92%	Sin datos	-43%	Sin datos	Sin datos

Fuente: Elaboración propia.

No obstante, no se evalúa el riesgo a la salud por exposición a estos valores más allá de la

comparación con valores de referencia, lo que puede mal interpretarse por parte de la población como si se tratara de un riesgo inmediato, ya que, no especifica si se tratan de valores recomendados para exposiciones agudas o crónicas, no considera posibles efectos sinérgicos, ni qué tipo de efectos en la salud podrían representar.

### **6.3. Caracterización del riesgo por efectos no cancerígenos y cancerígenos**

#### **Modelo toxicocinético basado en fisiología (PBTK) para el plomo**

El modelo toxicocinético utilizado permite conocer la distribución estadística y porcentaje de niños que se encuentran con niveles sanguíneos de plomo por sobre los niveles de riesgo considerando exposición y metabolismo biocinético en niños de hasta 7 años de edad. La ventaja del modelo PBTK es que permite tomar en cuenta todos los aportes de plomo al organismo (suelo, agua, aire, alimentos) y permite predecir el nivel sanguíneo que resulta de todas las contribuciones. Actualmente es el método más apropiado para estudiar poblaciones en lugar de individuos. El modelo biocinético predictivo es recomendado en EEUU, pero la confirmación se hace con análisis sanguíneo. Por otra parte, el modelo PBTK sólo predice niveles sanguíneos, pero no un Índice de Peligrosidad. El modelo PBTK recomendado actualmente para analizar los niveles sanguíneos asociados con exposición al plomo es el IEUBKwin, desarrollado por la US.EPA y extensamente validado.

En los EE.UU., las preocupaciones por los efectos en la salud han sido determinados por la US.EPA, y Center of Disease Control (CDC), y están asociados con concentraciones de plomo sanguíneo en niños alrededor o por sobre 3,5 ug/dL desde el año 2021, anterior a este año el valor era de 5 ug/dL

En el caso del plomo el modelo IEUBK no estima riesgos sino la probabilidad de que la concentración de plomo sanguíneo en receptores de 0 hasta  $\leq 7$  años de edad supere los 3,5 ug/dl de sangre. Aunque no se ha identificado ningún límite o valor de referencia para el plomo que sea seguro en infantes, el uso de un umbral dicotómico es ventajoso porque se usa como punto de corte para las definiciones de vigilancia y manejo de casos.

En este estudio, según los valores de plomo obtenidos para cada sector, se estima que el porcentaje de niños que superaría los 3,5 ug/dl de plomo en sangre sería de 10,477% en sector Población Rosario, 0,836% en sector El palomar, 3,016% en sector La Viñita, 5,063% en sector Paipote y 4,335% en sector Tierra Amarilla.

Debido a que no se dispone de los valores de plomo en sangre para los grupos etarios considerados en la modelación del programa IEUBK, no es posible verificar la concordancia de esta estimación con las condiciones reales de los receptores.

#### **Caracterización del riesgo por efectos no cancerígenos**

Para el caso del sector Población Rosario, los valores de IPTotales calculados son 3,50 para

infantes, 0,58 para adolescentes y 0,40 para adultos, siendo en todos los casos el arsénico el principal contaminante (>76%), seguido por el zinc y el cobre (>12% y >9%, respectivamente). La vía oral es la principal vía contribuyente (>99%). Además, se obtiene un valor de IPTotal >1, para el escenario de infantes (IPTotal = 3,50), lo que, según la USEPA, constituiría un riesgo por exposición a metales en suelo para este rango etario.

Para el caso del sector El Palomar, los valores de IPTotales calculados son 2,48 para infantes, 0,41 para adolescentes y 0,28 para adultos, siendo en todos los casos el arsénico el principal contaminante (>73%), seguido por el zinc y el cobre (>19% y >6%, respectivamente). La vía oral es la principal vía contribuyente (>99%). Además, se obtiene un valor de IPTotal >1, para el escenario de infantes (IPTotal = 2,48), lo que, según la USEPA, constituiría un riesgo por exposición a metales en suelo para este rango etario.

Para el caso del sector La Viñita, los valores de IPTotales calculados son 5,17 para infantes, 0,86 para adolescentes y 0,59 para adultos, siendo en todos los casos el arsénico el principal contaminante (>55%), seguido por el cobre y zinc (>27% y >9%, respectivamente). La vía oral es la principal vía contribuyente (>99%). Además, se obtiene un valor de IPTotal >1, para el escenario de infantes (IPTotal = 5,17), lo que, según la USEPA, constituiría un riesgo por exposición a metales en suelo para este rango etario.

Para el caso del sector Paipote, los valores de IPTotales calculados son 5,03 para infantes, 0,84 para adolescentes y 0,57 para adultos, siendo en todos los casos el arsénico el principal contaminante (>68%), seguido por el cobre y el zinc (>15% en ambos casos). La vía oral es la principal vía contribuyente (>99%). Además, se obtiene un valor de IPTotal >1, para el escenario de infantes (IPTotal = 5,03), lo que, según la USEPA, constituiría un riesgo por exposición a metales en suelo para este rango etario.

Para el caso del sector Tierra Amarilla, los valores de IPTotales calculados son 9,51 para infantes, 1,58 para adolescentes y 1,09 para adultos, siendo en todos los casos el arsénico el principal contaminante (>74%), seguido por el cobre y el zinc (>14% y >10%, respectivamente). La vía oral es la principal vía contribuyente (>99%). Además, se obtiene un valor de IPTotal superior a 1, para todos los escenarios, lo que según la USEPA, constituiría un riesgo por exposición a metales en suelo para este sector en general por efectos no cancerígenos.

Un Índice de Peligrosidad Total (IPT) se interpreta como la probabilidad aditiva de efectos crónicos no cancerígenos en la salud de todos los receptores humanos, incluyendo individuos hipersusceptibles, expuestos por un tiempo largo (un año o más) a una concentración promedio de contaminantes específicos de un sitio según se ha definido en el escenario de exposición. Cuando una dosis DDPA es similar a la DRf, entonces el índice individual se aproxima a la unidad. Si la suma de varios IP individuales también se aproxima a la unidad, entonces un Índice de Peligrosidad IP por debajo de 1 no tiene significado biológico, ya que la dosis interna total de contaminante no alcanza al valor protector de la dosis de referencia. La probabilidad de contraer efectos en la salud de tipo crónico no

cancerígenos aumenta con la magnitud del IP. Diferentes contaminantes pueden causar efectos adversos similares en la salud, y es apropiado combinar los cocientes asociados con diferentes contaminantes. Un IPT es una suma de los IP para todos los contaminantes que afectan todos los órganos o sistemas blancos a los cuales el receptor está expuesto. Idealmente, los IP deben ser combinados para contaminantes que causan efectos adversos por el mismo mecanismo, pero se prefiere la suma de IP para los contaminantes que afectan el mismo órgano o sistema blanco.

Exposiciones acumuladas que resulten en un IP mayor a 1 sugieren la posibilidad de efectos adversos, pero no necesariamente significa que los efectos adversos van a ocurrir. Un IP menor o igual a 1 o menos significa que no se espera que ocurran efectos adversos (no cancerígenos) en la salud como resultado de la exposición.

Un IPT que incluye contaminantes que no inducen el mismo tipo de efecto o mecanismo puede sobreestimar el potencial de efectos. Cuando el IPT excede el valor unitario, la USEPA recomienda segregar las contribuciones de cada contaminante por efecto y mecanismo de acción.

En todos los sectores considerados en el presente estudio, son los infantes aquellos receptores que obtienen un IPT superior. Esto obedece principalmente a que las tasas de ingestión de suelo en niños se asumen al doble que un adulto, por la frecuencia de exposición y hábitos. En el caso de la inhalación, los pulmones de los infantes pueden albergar menores volúmenes de aire que adultos, pero, tienen una tasa metabólica en reposo y una tasa de consumo de oxígeno por unidad de peso corporal más altas debido a su rápido crecimiento y al área de superficie pulmonar relativamente mayor por unidad de peso corporal. La tasa de consumo de oxígeno para un bebé en reposo entre 1 semana y 1 año es de 7 mililitros por kilogramo de peso corporal (ml/kg) por minuto, mientras que la tasa para un adulto en las mismas condiciones es de 3 a 5 ml. /kg por minuto (OMS, 1986). Por lo tanto, mientras que los adultos inhalan mayores cantidades de aire y contaminantes que los niños durante períodos de tiempo similares en términos absolutos, el volumen relativo de aire que pasa a través de los pulmones de un bebé en reposo es hasta el doble que el de un adulto en reposo (U.S. EPA, 2009a; Stifelman, 2007; Brochu et al., 2006b).

### **Caracterización del riesgo por efectos cancerígenos**

Los RECV calculados para todos los sectores y grupos etarios superan el nivel de riesgo cancerígeno aceptable de  $1.10^{-6}$ , definido por la USEPA y utilizado como referencia para la Comuna de Arica, el cual también se ha determinado a partir de estadísticas del Ministerio de Salud.

De la gama de contaminantes considerados en el presente estudio, el arsénico y el plomo son los elementos más peligrosos por sus características intrínsecas. La literatura indica que por exposición crónica a arsénico aumenta la mortalidad por patologías cancerígenas (Rivara y Corey, 1995), mientras que, en el caso del plomo, en todos los sectores, existe

un porcentaje de niños que supera el valor de corte recomendado por la CDC, lo que podría significar que dicho porcentaje de niños podría sufrir disfunciones reproductivas y cambios neuroconductuales (Tchernitchin et al., 2005). Por otro lado, la bibliografía indica que la exposición prenatal a arsénico determina un gran aumento de mortalidad por bronquiectasias entre los 30 y 49 años de edad (Smith et al., 2006), el plomo prenatal determina, más tarde en la vida, déficit intelectual y agresividad entre otras conductas. La alta bioaccesibilidad del arsénico y del plomo, entendiéndose bioaccesibilidad como la fracción del contaminante que puede absorberse al interior del organismo y potencialmente generar efectos adversos a la salud, reafirman la necesidad de evaluar el riesgo que representa la exposición a contaminantes en los suelos, en especial por poblaciones más susceptibles como infantes, adultos mayores y mujeres embarazadas (Tchernitchin et al., 2013).

#### **6.4. Incertidumbres y posibles mejoras**

- La modelación de la migración de un contaminante desde la fuente hasta el punto de contacto, es un enfoque hipotético que considera factores que a menudo son difíciles de medir y/o estimar. En este proyecto no se realizó modelación matemática, sino que se supuso que la concentración en el punto de contacto es igual a la concentración estadísticamente representativa del contaminante para todo el sitio.
- Las concentraciones de contaminantes en partículas resuspendidas por acción del viento se tomaron como iguales a las determinadas en la fuente. Es decir, se supone que el contaminante, una vez en el aire, llega al punto de contacto en forma íntegra, sin dilución atmosférica por el transporte aéreo. Este enfoque es altamente conservador y sobreestima las dosis aéreas e introduce una incertidumbre por exceso.
- También hay suposiciones usadas en consideraciones estadísticas relacionadas con la concentración en el punto de contacto, como, por ejemplo, que no hay cambios de concentración, la fuente de emisión es constante, los factores de exposición son conservadores.
- Considerar que los contaminantes tuvieran el mismo órgano diana, asumiendo un efecto aditivo para el cálculo de los IPT y RECV, y lo correcto debiera ser de manera segregada.
- Las dosis de exposición son promedios a lo largo del tiempo, e implícitamente incluyen los cambios (es decir las concentraciones altas y bajas) en las concentraciones ambientales de los contaminantes.
- Los valores de concentración obtenidos para cada metal utilizados en el presente estudio fueron obtenidos hace 10 años.
- El tamaño muestral y lógica de muestreo podrían seguir una grilla más representativa de los sectores.

- Sería complementario poder contar con un Monitoreo biológico de confirmación y verificar si existe relación entre los sectores, grupos etarios y las concentraciones de metales respectivas.
- Biodigestión de las muestras para conocer con mayor precisión el % de contaminante absorbible al interior del organismo.
- Para mayor representatividad en el cálculo de las dosis, sería apropiado considerar otras vías de ingreso como la vía dérmica, e ingesta voluntaria a través de alimento y agua.

### 6.5. Proyecciones del estudio

Como sabemos, en Chile, no existe una normativa legal vigente para la contaminación de suelos, por lo cual no podemos contrastar legalmente el grado de contaminación.

La obtención de datos y resultados sobre todo cuantitativos permite estimar referencialmente la vulnerabilidad de un determinado sitio con mayor precisión, lo que significa un paso previo indispensable para tomar acciones de prevención, mitigación y gestión de riesgos en general.

Si bien la Gestión del Riesgo se constituye como un proceso complejo, debido a la mezcla de riesgos socio-naturales y antropogénicos, esta debe ser entendida como una condición emergente del desarrollo, una realidad socialmente construida. Y en ese sentido, la información científica podría aportar a la hora de implementar políticas, estrategias y fortalecer sus capacidades a fin de reducir el impacto de amenazas naturales y de desastres ambientales y tecnológicos consecuentes (UNISDR, 2012).

Dado que la cantidad de puntos muestreados era acotada, era importante poder asignar un valor numérico como tal a aquellos resultados de análisis que se encontraban por debajo del límite de detección, y de esta forma alimentar el análisis estadístico de los datos utilizando el software ProUCL.

El reemplazo con  $LOD/\sqrt{2}$  tiene la ventaja de lograr la diferencia relativa más pequeña de todos los métodos de reemplazo simple para la sustitución de valores que se encuentran por debajo del límite de detección.

En el caso del Arsénico, no se presentaron valores por debajo del límite de detección en ningún punto muestreado. En cuanto a la distribución estadística de los datos, en la mayoría de los casos, estos siguieron una distribución Student, y en menor medida distribuciones tipo Chebychev o Gamma Ajustada, como puede observarse desde la tabla 1 a la 10.

Para los valores de contaminación lo ideal hubiera sido trabajar con el Intervalo de confianza superior al 95%, pero debido a la cantidad de muestras disponibles por sector, no fue posible contar con este valor estadístico. De todas maneras, el percentil 95 nos permite contar con

---

un valor estadísticamente representativo guardando un margen de seguridad sin utilizar el valor máximo como referencia en caso de ser puntual.

Los valores obtenidos en el presente estudio podrían ser considerados como referencia de los sectores muestreados, para evaluar la destinación de recursos ante una eventual confirmación de riesgos en el sector, para ampliar el muestreo y/o considerar la necesidad de dar seguimiento a la salud de los habitantes de los sectores muestreados, a través de monitoreos biológicos y/o clínicos.

## 7. Conclusiones

A nivel de riesgos a la salud por efectos no cancerígenos, se destaca la bajísima contribución de la vía de inhalación de partículas, siendo en todos los casos la vía oral la vía principal con más del 99% de contribución del IPT en todos los sectores.

Debido a que el cálculo de los Índice de Peligrosidad Total (IPT) es producto de la sumatoria individual del aporte de cada contaminante considerado en el estudio, es correcto asumir, que este valor siempre aumentaría en la medida que se adicionen más contaminantes a la evaluación, cuando lo correcto sería segregar aquellos contaminantes por efecto y órgano diana.

En todos los sectores, el grupo etario con mayor riesgo a la salud por efectos cancerígenos fueron los infantes, seguido por adultos y finalmente adolescentes. El contaminante que más contribuye al riesgo de cáncer es el arsénico, seguido por el cromo VI y finalmente el cadmio. La vía que más contribuye al riesgo de cáncer en el presente estudio es la vía oral por ingesta accidental.

Este estudio como caracterización del riesgo de sectores en específico, podría servir de referencia a otros autores,

En consecuencia, los resultados son solamente referenciales. Como alcance, este estudio es solamente de carácter exploratorio de los posibles riesgos por exposición a contaminantes metálicos y sugieren que globalmente podría existir riesgo de cumplirse los supuestos y condiciones establecidas en los escenarios del modelo conceptual, sin considerar que los escenarios a su vez pueden ser dinámicos. De manera concluyente no se puede afirmar, con los antecedentes existentes, que haya efectos significativos; esos mismos resultados, a su vez, tampoco permiten descartar completamente efectos para la población humana en algunos de los sectores evaluados.

## 8. Referencias

Azam, M.M., 2016. Soil contamination and remediation measures: revisiting the relevant laws and institutions (chapter 5). In: Hasegawa, H., et al. (Eds.), Environmental Remediation Technologies for Metal Contaminated Soils. Springer, Japan, pp. 99–12.

Berhó, S. 2015. Elementos traza en agua y suelo, asociados a asentamientos humanos próximos a sitios de minería metálica. Provincias de Copiapó y Huasco. Región de Atacama. Chile. Trabajo De Titulación Para Optar Al Título Profesional De Ingeniero Ambiental. Universidad de Valparaíso, Chile.

Carkovic, A.B., Calcagni, M.S., Vega, A.S. et al. Active and legacy mining in an arid urban environment: challenges and perspectives for Copiapó, Northern Chile. Environ Geochem Health 38, 1001–1014 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10653-016-9793-5>

Centro UC – Toxicología CITUC. 2016. Evaluación De Riesgos En La Comuna De Arica Por La Presencia De Polimetales En La Matriz Suelo. Facultad de Medicina, Pontificia Universidad Católica de Chile. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/10/Estudio-Riesgo-Arica.pdf>

Cortés, I.; Ríos, J.; Gaete, L.; Tchernitchin, A. 2015. Metales pesados en muestras ambientales de la Región de Atacama. Situación postaluviones. XIV Congreso Geológico Chileno. [https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/14905\\_v3\\_pp\\_302\\_305.pdf](https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/14905_v3_pp_302_305.pdf)

EC JRC, Van Liedekerke, M., Prokop, G., Rabl-Berger, S., Kibblewhite, M., Louwagie, G., 2014. Progress in management of contaminated sites. European Commission, Joint Research Centre Reference Reports, EUR 26376 EN, European Union.

Fundación Chile (FCH). 2013. Manual de Tecnologías de Remediación de Sitios Contaminados. Desarrollo de Herramientas y Estándares de Calidad para la Identificación, Confirmación y Control de Sitios Contaminados, Proyecto Innova Corfo. Chile.

Hidalgo, C.; Pastor, T.; Serantes, P. 2016. Propuesta De Remediación De Suelo Contaminado Con Hidrocarburos, Empresa Logística Y Transporte Mc2 Spa, Placilla, Región De Valparaíso. Informe De Trabajo Final Para Optar Al Grado De Magíster En Gestión Ambiental. Escuela De Ingeniería. Universidad Viña Del Mar. Chile.

INE (Instituto Nacional de Estadística). 2007. División Político Administrativa y Censal. Región de Atacama. 17pp.

INTENDENCIA ATACAMA. Ministerio del Interior y Seguridad Pública. Portal de Internet. Revisado en noviembre de 2012. <http://www.intendenciaatacama.gov.cl/geografia.html>

Jara, E.; Lattapiat, M. 2013. Metales Pesados Y Arsénico En Suelos Y Aguas De Poblados Aledaños A Pasivos Ambientales Mineros Trabajo De Titulación Para Optar Al Título Profesional De Ingeniero Ambiental. Universidad de Valparaíso, Chile.

Kabengi, N., Chrysochoou, M., 2015. Soil science in environmental management. In: Sarkar, D., Datta, R., Mukherjee, A., Hannigan, R. (Eds.), An Integrated Approach to Environmental Management. John Wiley & Sons, Rome, pp. 75–96.

Rivara, M.I.; Corey, G. 1995. Tendencia del riesgo de morir por cánceres asociados a la exposición crónica al arsénico, II Región de Antofagasta, 1950-1993. Cuadernos Médico Sociales (Chile) 36: 39-51.

Comisión de Agricultura del Senado de la República de Chile. 2022. Informe de la Comisión de Agricultura, Boletín 14714-01: Establece una Ley de Marco de Suelos. Disponible en: [http://www.senado.cl/appsenado/templates/tramitacion/index.php?boletin\\_ini=14714-01](http://www.senado.cl/appsenado/templates/tramitacion/index.php?boletin_ini=14714-01) (abril, 2022).

SERNAGEOMIN. 2011. Ordinario n°00264. Oficio n°05/10, de fecha 14 de diciembre de 2010 de la Comisión Especial Investigadora sobre la situación en que se encuentran los depósitos de relaves mineros existentes en el país. Gobierno de Chile.

SERNAGEOMIN. 2020. Catastro de Depósito de Relaves en Chile. Departamento de Seguridad Minera. Sernageomin. Gobierno de Chile.

SERNAGEOMIN – BGR. 2008. Manual de Evaluación de Riesgos de Faenas Mineras Abandonadas o Paralizadas (FMA/P). Disponible en: <http://bcn.cl/343n> (abril, 2022).

Smith, A.H.; Marshall, G.; Yuan, Y.; Ferreccio, C.; Liaw, J.; von Ehrenstein, O.; Steinmaus, C.; Bates, M.N.; Selvin, S. 2006. Increased mortality from lung cancer and bronchiectasis in young adults after exposure to arsenic in utero and in early childhood. Environmental Health Perspectives 114: 1293- 1296.

Tchernitchin, A.N.; Lapin, N.; Molina, L.; Molina, G.; Tchernitchin, N.A.; Acevedo, C.; Alonso, P. 2005. Human exposure to lead in Chile. Review of Environmental Contamination and Toxicology 185: 93- 139.

US EPA, 1989. Risk assessment guidance for Superfund. Human Health Evaluation Manual. Part A. Interim Final. EPA/540/1-89/002 vol. I. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC, USA.

US EPA, 1991. Risk assessment guidance for Superfund. Human Health Evaluation Manual. Part B Development of Risk-based Preliminary Remediation Goals. Interim. EPA/540R-92/003. Publication 9285.7-01B vol. I. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC, USA.

US EPA, 1994. Guidance Manual for the Integrated Exposure Uptake Biokinetic Model for Lead in Children. EPA PB 93-963510. OSWER 9285.7-15-1. Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, USA.

US EPA, 2004. Risk assessment guidance for Superfund. Human Health Evaluation

Manual. Part E. Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment Final. EPA/540/R/99/005. OSWER 9285.7-02EP. PB 99-963312 vol. I. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, Washington, DC, USA.

US EPA, 2005. Supplemental guidance for assessing susceptibility from early-life exposure to carcinogens. EPA/630/R-03/003F. Risk Assessment Forum, Washington, DC, USA.

US EPA, 2007. User's guide for the integrated exposure uptake biokinetic model for lead in children (IEUBK) Windows®. Prepared for the Technical Review Workgroup for Metals and Asbestos (TRW). EPA 9285.7-42, 540-K-01-005. Prepared by Syracuse Research Corporation 6225 Running Ridge Road North Syracuse, NY. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation.

US EPA, 2014. Assessing dermal exposure from soil. Region 3 Technical Guidance Manual, risk assessment Available at <https://www.epa.gov/risk/assessing-dermal-exposure-soil> (December 2015).

Wcisło; J. Bronder; A. Bubak; E. Rodríguez-Valdés; J.L. Gallego. 2016. Human health risk assessment in restoring safe and productive use of abandoned contaminated sites, Environment International, Volume 94, 436-448 pp.

Bozkurt, D., 2016. Impact of warmer eastern tropical Pacific SST on the March 2015 Atacama floods. Center for Climate and Resilience Research, University of Chile, Santiago, Chile. [http://dgp.uchile.cl/rene/PUBS/sst\\_atacama\\_revised3\\_FINAL.pdf](http://dgp.uchile.cl/rene/PUBS/sst_atacama_revised3_FINAL.pdf)

DGA. 2009. Plan de Gestión para la cuenca del Río Copiapó. Estrategia nacional de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas. Secretaría Técnica CONAMA – DGA. Disponible en: <http://documentos.dga.cl/ADM5374.pdf>

GRIJALBA GÓMEZ, V. 2016. Geología y análisis histórico-meteorológico del aluvión de marzo de 2015 en Chañaral, Atacama. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140039>

ONEMI. 2015. Plataforma Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres. Santiago: ONEMI.

VARGAS, JORGE. 2002. Políticas públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio naturales. (División de Medio Ambiente y Asentamientos Humanos). ISBN: 92-1-322013-8. En: <http://archivo.cepal.org/pdfs/2002/S2002612.pdf>

- Handbook on the Toxicology of Metals, G.F. Nordberg, B.A. Fowler, M. Nordberg, y L.T. Friberg. Third edition, 2007. Academic Press/Elsevier.
- Toxicological Profile (específico para cada sustancia peligrosa). ATSDR, U.S. DHHS.

- Present Knowledge of Nutrition. Seventh edition. E.E. Ziegler and L.J. Filer, editors. ILSI Press, Washington, DC, 1996.

Cotton FA, Wilkinson G. Advanced Inorganic Chemistry. 5ª Ed. New York: Wiley and sons. 1988.

WHO. Lead. Environmental Health Criteria 3. Geneva: WHO, 1977.

Mathews CK, Van Holde KE. Bioquímica. 2ª Ed. Madrid: McGraw-Hill, 1998.

Sullivan JB, Krieger GR. Environmental Sciences: Pollutant Fate and Transport in the Environment. En: Sullivan JB, Krieger GR, editors. Clinical Environmental Health and Toxic Exposures. Philadelphia: Lippincott William and Wilkins, 2001: 6-30.

Kurland LT, Faro SN, Siedler H. Minamata Disease. The Outbreak of a Neurologic Disorder in Minamata, Japan, and Its Relationship to the Ingestion of Seafood Contaminated by Mercury Compounds. World Neurol 1960; 1: 370-395.

Ferrer A, Cabral R. Collective poisoning by pesticides: mechanism of production-mechanism of prevention. Rev Environ Toxicol 1993; 5: 161-201.

Rahman MM, Chowdhury UK, Mukherjee SCh, Mondal BK, Paul K, Lodh D et al. Chronic arsenic toxicity in Balgladesh and West Bengal, India- A review and commentary. Clin Toxicol 2001; 39: 683-700.

Tomatis L. Cancer: Causes, Ocurrance and Control. IARC scientific publications nº 100. Lyon: WHO IARC, 1990.

<https://www.iarc.who.int/> (Consultado el 04/04/2023).

Aaseth J. Recent advances in the therapy of metal poisoning with chelating agents. Hum Toxicol 1983: 257-272.

Howland MA. Antidotes in Depth. Dimercaprol (BAL). En: Goldfrank LR, Flomenbaum NE, Lewin NA, Weisman RS, Howland MA, Hoffman RS, editors. Goldfrank's Toxicologic Emergencies, 6ª edición. Stamford: Appleton and Lange, 1998a: 1274-1276.

Howland MA, Graziano JH. Antidotes in Depth. Succimer (2,3-Dimercaptosuccinic Acid, DMSA). En: Goldfrank LR, Flomenbaum NE, Lewin NA, Weisman RS, Howland MA, Hoffman RS, editores. Goldfrank's Toxicologic Emergencies, 6ª edición. Stamford: Appleton and Lange, 1998b: 1310-1314.

Howland MA. Antidotes in Depth. Calcium Disodium Edetate. En: Goldfrank LR, Flomenbaum NE, Lewin NA, Weisman RS, Howland MA, Hoffman RS, editors. Goldfrank's Toxicologic Emergencies, 6ª edición. Stamford: Appleton and Lange, 1998c: 1310-1314.

---

Nogué S. Protocolos de tratamiento de las intoxicaciones de la Sección de Toxicología Clínica de la Asociación Española de Toxicología. 2007. [wzar.unizar.es/stc/index.htm](http://wzar.unizar.es/stc/index.htm)

Handbook on the Toxicology of Metals, G.F. Nordberg, B.A. Fowler, M. Nordberg, y L.T. Friberg. Third edition, 2007. Academic Press/Elsevier.

Toxicological Profile (específico para cada sustancia peligrosa). ATSDR, U.S. DHHS.

Present Knowledge of Nutrition. Seventh edition. E.E. Ziegler and L.J. Filer, editors. ILSI Press, Washington, DC, 1996.

## 9. ANEXOS:

### 9.1. Resultados de los análisis en el laboratorio (obtenidas de otros colaboradores)

Los resultados de análisis del año 2013 se presentan a continuación, con los valores de concentración de metales totales (expresados en mg/kg) para las muestras correspondientes a los distintos sectores.

**Tabla nº 48: Concentración de contaminantes en muestras del Sector Población Rosario, obtenidas durante el año 2013.**

Nomen- clatura	Coordenadas UTM			Contaminantes (mg/kg)							
	Huso	Este	Norte	Cd	Cr	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn	As
SA1PR1	19J	367479	6971650	0,03	0,10	753,10	523,28	0,04	40,80	125,50	33,91
SA1PR2	19J	367469	6971629	0,04	17,10	714,50	433,19	0,04	87,90	200,00	35,20
SA1PR5	19J	367712	6971192	0,04	16,80	384,20	862,40	0,04	18,20	91,90	48,70
SA2PR3	19J	367525	6971762	0,22	33,20	950,00	700,00	0,04	54,00	118,00	54,00
SA2PR4	19J	367515	6971741	0,50	31,00	1121,00	626,00	0,04	173,00	290,00	63,00
SA2PR7	19J	367758	6971304	0,21	29,00	374,00	1535,00	0,04	18,50	123,00	65,00

**Tabla nº 49: Concentración de contaminantes en muestras del Sector El Palomar, obtenidas durante el año 2013.**

Nomen- clatura	Coordenadas UTM			Contaminantes (mg/kg)							
	Huso	Este	Norte	Cd	Cr	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn	As
SB1EP5	19H	368505	6969664	0,04	44,80	153,40	516,90	0,04	5,50	41,80	33,70
SB1EP6	19H	368585	6969768	0,04	20,20	281,60	608,60	0,04	14,50	115,50	36,70
SB1EP7	19H	368113	6970128	0,04	17,50	457,80	475,20	0,04	19,50	158,40	39,80
SB2EP5	19J	368551	6969776	0,04	30,90	303,00	642,00	0,04	14,00	120,00	33,00
SB2EP6	19J	368630	6969879	0,17	33,60	568,00	834,00	0,04	27,67	326,00	45,00
SB2EP7	19J	368159	6970240	0,02	33,40	293,00	692,00	0,04	16,00	125,00	37,00

**Tabla nº 50: Concentración de contaminantes en muestras del Sector La Viñita, obtenidas durante el año 2013.**

Nomen- clatura	Coordenadas UTM			Contaminantes (mg/kg)							
	Huso	Este	Norte	Cd	Cr	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn	As
SC1LV1	19H	369963	6968031	0,04	45,50	247,20	511,30	0,04	24,00	89,00	34,40
SC1LV3	19H	370373	6968723	0,04	26,00	7667,20	2839,90	0,04	16,10	77,40	69,90
SC1LV4	19H	370373	6968529	0,04	19,40	394,70	675,30	0,04	55,20	147,20	38,40
SC1LV6	19H	370949	6967946	0,04	18,20	238,70	561,10	0,04	30,10	157,90	51,50
SC1LV7	19H	371241	6968136	0,14	26,50	403,50	486,40	0,04	88,10	551,70	56,90
SC2LV3	19J	370009	6968142	0,11	35,50	516,00	813,00	0,04	31,00	170,00	43,00
SC2LV4	19J	370416	6968797	0,04	27,30	585,00	817,00	0,04	14,10	99,40	36,00



SC2LV5	19J	370419	6968640	0,13	32,10	401,00	771,00	0,04	46,00	220,00	46,00
SC2LV6	19J	370995	6968057	0,17	28,40	441,00	702,00	0,04	53,00	180,00	43,10
SC2LV7	19J	371287	6968247	0,53	30,10	303,00	700,00	0,04	49,00	435,00	69,00

**Tabla nº 51: Concentración de contaminantes en muestras del Sector Paipote, obtenidas durante el año 2013.**

Nomen- clatura	Coordenadas UTM			Contaminantes (mg/kg)							
	Huso	Este	Norte	Cd	Cr	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn	As
SD1P2	19H	374417	6967120	0,04	23,00	953,60	590,80	0,04	26,10	194,10	46,50
SD1P3	19H	374320	6966937	0,04	51,00	2280,20	532,20	0,04	43,39	298,00	67,90
SD1P4	19H	374101	6966765	0,04	22,50	2144,10	704,90	0,04	108,90	511,20	87,10
SD1P5	19H	373896	6967018	0,04	16,90	513,40	561,40	0,04	14,30	161,90	39,40
SD2P2	19J	374463	6967231	0,86	37,70	1487,00	823,00	0,04	44,00	269,00	61,00
SD2P3	19J	374366	6967048	0,04	22,00	2621,00	550,00	2,50	51,20	386,00	64,00
SD2P4	19J	374147	6966877	1,08	35,90	1320,00	927,00	0,04	85,00	384,00	74,00
SD2P5	19J	373942	6967129	0,04	13,00	562,00	565,00	2,18	19,00	113,00	61,00

**Tabla nº 52: Concentración de contaminantes en muestras del Sector Tierra Amarilla, obtenidas durante el año 2013.**

Nomen- clatura	Coordenadas UTM			Contaminantes (mg/kg)							
	Huso	Este	Norte	Cd	Cr	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn	As
SE1TA1	19H	375069	6958335	0,04	13,30	878,90	459,80	0,04	47,32	196,20	92,90
SE1TA2	19H	375069	6958335	0,04	24,00	1622,87	784,00	0,04	69,90	237,40	118,50
SE1TA4	19H	374947	6957885	0,04	22,90	4763,05	715,90	0,04	81,20	589,30	175,90
SE1TA5	19H	374941	6960955	0,04	22,00	433,30	610,30	0,04	40,02	272,20	60,80
SE1TA6	19H	374827	6961378	0,04	14,40	1143,20	527,90	0,04	33,00	226,90	75,80
SE2TA2	19J	375089	6958423	0,04	26,50	1529,00	654,00	1,70	77,00	205,00	164,00
SE2TA3	19J	375168	6958439	1,00	36,90	1829,00	958,00	0,04	98,00	274,80	144,00
SE2TA4	19J	374993	6957996	0,04	27,40	4176,00	767,00	2,30	61,50	555,00	121,00
SE2TA5	19J	374987	6961066	1,21	46,00	4232,00	912,00	0,04	84,00	417,00	96,00
SE2TA6	19J	374873	6961489	0,04	25,80	2085,00	667,00	2,90	69,00	330,00	62,00

## 9.2. Estándares y normativa extranjera para contaminantes en suelo

### 9.2.1. Criterio Canadiense establecido para calidad de suelos por la Guía “Normas Canadienses de la Calidad del Suelo para la Protección de la Salud del Medio Ambiente y los Humanos” (Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health)

Esta guía canadiense proporciona valores de concentración de diversos parámetros para distintos escenarios de uso de suelos, como se ejemplifica en la **Tabla nº 53** a continuación.

**Tabla nº 53: Estándares de calidad de suelo para la protección de la salud y el medio ambiente, según uso de suelo, en Canadá.**

Contaminante	Símbolo Químico	NºCAS	Concentración (mg/kg en peso seco) de referencia por Uso de Suelo					Fecha de Promulgación
			Uso Agrícola	Uso Residencial y de Parques	Uso Comercial	Uso Industrial		
Arsénico	As	7440-38-2	12	12	12	12	1997	
Cadmio	Cd	7440-43-9	1.4	10	22	22	1999	
Cromo	Cr	7440-47-3	64	64	87	87	1997	
Cromo, hexavalente	Cr(VI)	7440-47-3	0.4	0.4	1.4	1.4	1999	
Cobre	Cu	7440-50-8	63	63	91	91	1999	
Plomo	Pb	7439-92-1	70	140	260	600	1999	
Manganeso	Mn	7439-96-5	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	
Molibdeno	Mo	7439-98-7	5	10	40	40	1991	
Zinc	Zn	7440-66-6	250	250	410	410	2018	

Fuente: Elaboración propia en base a información disponible en <https://ccme.ca/en/summary-table?chems=4,8,9,12,15,16,20,21,61,63,62,65,71,123,124,127,129,131,138,139,197,198,200,211,213,225,226,229&chapters=4>

**9.2.2. Criterio Australiano para la calidad de suelos establecidos por el Departamento Medioambiental y Conservación: “Niveles para Evaluación de Suelos, Sedimentos y Agua, 2010” (Assessment Levels for Soil, Sediment and Water, 2010).**

La normativa de suelos australiana contiene valores de concentración de diversos parámetros, entregando valores límites indicativos para investigación de nivel ecológico y para investigación de riesgos a la salud, como se presenta en la **Tabla nº 54**.

**Tabla nº 54: Niveles de metales y contaminantes en suelo (en mg/kg) para realizar investigación de riesgo ecológico y a la salud humana, según la normativa de Australia.**

Niveles (mg/kg) para realizar investigación en salud			

Contaminante	Símbolo Químico	Niveles (mg/kg) para realizar investigación ecológica	Uso residencial con jardín / suelo accesible con contribución menor al 10% de la ingesta de vegetales y frutas. Esta categoría incluye centros de cuidado diario de niños, escuelas preescolares y primarias	Uso residencial con oportunidad es mínimas de acceso al suelo, incluyendo suelo pavimentado	Uso de parques, espacios recreacionales abiertos y lugares de juego incluyendo escuela secundaria	Uso comercial/industrial incluyendo tiendas, oficinas, fábricas y sitios industriales
Arsénico	As	20	100	400	200	500
Cadmio	Cd	3	20	80	40	100
Cromo trivalente	Cr (III)	400	120000	480000	240000	600000
Cromo hexavalente	Cr (VI)	1	100	400	200	500
Cobre	Cu	100	1000	4000	2000	5000
Plomo	Pb	600	300	1200	600	1500
Manganeso	Mn	500	1500	6000	3000	7500
Molibdeno	Mo	40	390	Sin datos	Sin datos	5100
Zinc	Zn	200	7000	28000	14000	35000

Fuente: Elaboración propia en base a información disponible en <http://www.esdat.net/Environmental%20Standards/Australia/WA/Assessment%20Levels%20-%202010.pdf>

### 9.2.3. Norma Oficial Mexicana para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004).

En México, rige la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (2003), donde se establecen las bases para prevenir la contaminación de sitios por el manejo de materiales y residuos, así como para definir los criterios a los que se sujetará su remediación. Un concepto fundamental es el de **Concentración de referencia total (CRT)**, que refiere a la masa del elemento químico regulado, expresada en mg/kg de suelo en base seca, por encima de la cual se considera que existe riesgo de que se generen efectos adversos para la salud.

**Tabla nº 55: Valores de concentración de referencia total para diferentes usos, según NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.**

Contaminante	Símbolo Químico	Concentración de referencia total (mg/kg)	
		Uso agrícola / residencial / comercial	Uso industrial
Arsénico	As	22	260
Cadmio	Cd	37	450
Cromo hexavalente	Cr(VI)	280	510
Cobre	Cu	Sin datos	Sin datos
Plomo	Pb	400	800
Manganeso	Mn	Sin datos	Sin datos
Molibdeno	Mo	Sin datos	Sin datos
Zinc	Zn	Sin datos	Sin datos

Fuente: Elaboración propia en base a información disponible en [http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat\\_ssa1-2004.pdf](http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat_ssa1-2004.pdf)

#### **9.2.4. Valores orientadores para suelos en el estado de Sao Pablo, Brasil. “Artigo 1º Decisão de Diretoria Nº 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005”.**

La Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental de Sao Pablo, Brasil, mediante su Directriz N° 195 de noviembre de 2005 estableció las Disposiciones sobre la aprobación de valores orientadores para suelos y aguas subterráneas en el Estado de Sao Pablo.

**Valor de Referencia de Calidad (VRQ)** es la concentración de una determinada sustancia en suelo (o agua subterránea) que define a un suelo como limpio o de calidad natural a partir de una información estadística de análisis realizados en el estado de San Pablo. Debe ser utilizado como referencia para acciones de prevención de la contaminación.

**Valor de Prevención (VP)** es la concentración de una determinada sustancia por encima de la cual pueden ocurrir alteraciones perjudiciales a la calidad del suelo y del agua subterránea. Este valor indica la calidad de un suelo de ser capaz de sustentar sus funciones primarias protegiendo tanto sus funciones primarias como receptor ecológico y la calidad de las aguas subterráneas.

Este valor de prevención (VP) debe ser considerado para autorizar la introducción de sustancias en el suelo.

**Valor de Intervención (VI)** es la concentración de una sustancia en suelo y agua subterránea por encima de la cual existen riesgos potenciales directos e indirectos a la salud humana considerando un escenario de exposición genérico.

En la **Tabla nº 56** se presentan estos valores para los contaminantes metálicos.

**Tabla nº 56: Valores de referencia, prevención y de intervención para diferentes usos, según Directriz No 195/2005 Estado de Sao Pablo, Brasil.**

Contaminante	Símbolo Químico	Concentración (mg/kg)				
		Valor de referencia (VRQ)	Valor de prevención (VP)	Valor de Intervención (IV)		
				Uso agrícola	Uso Residencial	Uso industrial
Arsénico	As	3.5	15	35	55	150
Cadmio	Cd	<0.5	1.3	3	8	20
Cromo	Cr	40	75	150	300	400
Cobre	Cu	35	60	200	400	600
Plomo	Pb	17	72	180	300	900
Manganeso	Mn	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
Molibdeno	Mo	<4	30	50	100	120
Zinc	Zn	60	300	450	1000	2000

Fuente: Elaboración propia en base a información disponible en [http://solo.cetesb.sp.gov.br/solo/valores-orientadores-para-solo-e-agua-subterranea/.solo.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/34/2014/12/tabela\\_valores\\_2005.pdf](http://solo.cetesb.sp.gov.br/solo/valores-orientadores-para-solo-e-agua-subterranea/.solo.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/34/2014/12/tabela_valores_2005.pdf)

### 9.2.5. Criterios establecidos para calidad de suelos en la Comunidad Autónoma del País Vasco, España.

La Ley 4/2015 del 25 de junio, establece el régimen jurídico para recuperar los suelos que hayan sido declarados como contaminantes mediante resolución expresa.

Se utiliza el concepto de Valor indicativo, que corresponde al límite superior del intervalo de concentraciones en que una determinada sustancia se encuentra de forma natural en los suelos de la Comunidad Autónoma del País Vasco; por lo que consecuentemente, si la concentración encontrada supera el VALOR INDICATIVO, se requiere una evaluación del caso para determinar su grado de alteración. Los valores indicativos, contenidos en el Anexo III de la Ley 4/2015 de 25 de junio, son los siguientes:

**Tabla nº 57: Valores indicativos de evaluación para diferentes usos, según Ley 4/2015 del País Vasco, España.**

Contaminante	Símbolo Químico	Valor indicativo (mg/kg)	Niveles indicativos de evaluación para diferentes usos (mg/kg)				
			Industrial	Parque público	Urbano	Área de juego infantil	Otros usos
Arsénico	As	23	200	30	30	30	30



Cadmio	Cd	0,8	50	25	8	5	5
Cromo Total	Cr	25 + contenido de arcilla	550	400	200	90	200
Cobre	Cu	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
Plomo	Pb	16 + 0,7 * contenido de arcilla + 2,1 * contenido de materia orgánica	1000	450	150	120	120
Manganeso	Mn	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
Molibdeno	Mo	0,6 + 0,018 * contenido de arcilla	750	250	75	75	75
Zinc	Zn	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos

Fuente: Elaboración propia en base a información disponible en <http://www.boe.es/boe/dias/2015/07/24/pdfs/BOE-A-2015-8272.pdf>