INFORME FINAL

Convenio Polimetales Ministerio del Medio Ambiente – Subsecretaría del Medio Ambiente y la UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA METROPOLITANA

“Estudio de presencia de polimetales en la comuna de Arica”

Directora del Proyecto	
Ms en Ingeniería Ambiental, Ingeniero civil químico	Ms. Carolina Parodi Dávila.
Equipo de Investigación Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente, Facultad Industria, UTEM.	
Geógrafa, Dra. Geografía física	Dra. Keyla Alencar Da Silva
Geógrafa, Dra. en geoquímica	Dra. Drielly Fonseca Da Silva
Ingeniera Química	Gabriela Sarpi González
Ingeniero Químico	Luiggi Correa Retamales
Profesional de apoyo	Francisco Gómez Capponi
Ingeniero Químico	Carlos Astorga Chacón
Equipo del Ministerio de Medio Ambiente	
Contraparte Técnica Arica	Bianca Saavedra Fernández
Contraparte Técnica Santiago	Gabriel Castro Celis
Equipo del Ministerio de Salud	
Contraparte Revisora	Roxana Tessada Sepúlveda

Índice

1 Glosario 7

2 Resumen 15

3 Introducción 24

3.1 Objetivo general del estudio 26
3.2 Objetivo Específicos del Estudio 27
3.3 Metodología y diseño estratégico del proyecto. 28
3.4 Certificaciones 30
3.5 Importancia del uso de la bioaccesibilidad en la evaluación de riesgos a la salud de la población en los suelos de Arica. 33

4 Antecedentes Ambientales de Arica para el estudio de riesgos 37

4.1 Residuos 37
4.2 Calidad de Aire 37
4.3 Agua Potable 38
4.4 Basurales y vertederos 39
4.5 Demografía 39
4.6 Clima 40

5 Alcances del Estudio de Riesgo a la Salud de la población 41

5.1 Aspectos generales 41
5.2 Bioaccesibilidad y Biodisponibilidad Relativa en la Evaluación de Riesgo para metales pesados y metaloides en el suelo 46
5.3 Caracterización de la Peligrosidad 50
5.3.1 Criterios de selección de contaminantes: 50
5.3.2 Evaluación de Medios Ambientales: EMEG 52

6 Caracterización de la población expuesta Arica 55

6.1 Identificación de Zonas de Exposición 55
6.2 Justificación técnica de las modificaciones al plan de muestreo de Hotspots 62
6.3 Caracterización de la fuente de exposición 65
6.4 Rutas de Exposición 68
6.5 Modelo Conceptual de la Contaminación 70
6.6 Escenarios de análisis de exposición 75
6.6.1 Escenario 1: Conservador (no real) 75
6.6.2 Escenario 2: Probable 76
6.6.3 Escenario 3 : Realista 78

7 Cuantificación de la dosis- respuesta 80

7.1 Cálculo dosis de exposición 80
7.2 Factores de exposición 84
7.3 Resultados Dosis de Exposición 87

8 Caracterización del Riesgo por Arsénico 91

8.1 Resultados de la evaluación de riesgos carcinogénico 91
8.2 Resultados del Índice de Peligrosidad (efecto crónico) 94

9 Caracterización del riesgo por Plomo 98

9.1 Marco conceptual 98
9.2 Resultados 98
9.3 Conclusión: 101

10 Análisis de Incertidumbre 102

10.1 Análisis de incertidumbre 102
10.2 Incertidumbre asociada al muestreo y análisis químico 103
10.3 Incertidumbre asociada a la caracterización de la exposición 103
10.4 Reducción de la incertidumbre mediante el uso de concentraciones bioaccesibles 104
10.5 Incertidumbre toxicológica 105
10.6 Variabilidad de la población 105
10.7 Incertidumbre asociada al modelo IEUBK 105
10.8 Conclusión del análisis de incertidumbre 106

11 Conclusiones del estudio 108

11.1 Generales 108
11.2 Evaluación de Riesgo 109

12 Análisis de riesgo del Hotspots 111

13 Lista de Anexos 118

Índice de Tablas

Tabla 1: Antecedentes Población Arica 41
Tabla 2: Subsectores para análisis de riesgo 43
Tabla 3: Análisis toxicológico de analitos carcinogénicos: arsénico, cromo VI, mercurio (sales) y cadmio 52
Tabla 4: Análisis toxicológico para analito mutagénico: plomo 52
Tabla 5: Datos para cálculo del EMEG en suelo 55
Tabla 6: Resultados del EMEG en suelo por metal o metaloide 55
Tabla 7: Sectores geográficos considerados en estudio de riesgo 57
Tabla 8: Concentraciones totales y bioaccesibles y %Bioaccesibilidad del arsénico y plomo para el estudio de riesgo 66
Tabla 9: Concentraciones totales y bioaccesibles y % Bioaccesibilidad del cadmio, mercurio y cromo. 67
Tabla 10: Estadígrafos para el arsénico para la fase gástrica y gastrointestinal 68
Tabla 11: Estadígrafos para el plomo para la fase gástrica y gastrointestinal 69
Tabla 12: Factores de Exposición: vía oral-dérmica-inhalación 87
Tabla 13: Factores de exposición para escenario conservador para el arsénico 88
Tabla 14: Factores de exposición para escenario probable para el arsénico 89
Tabla 15: Factores de exposición para escenario realista para el arsénico 89
Tabla 16: Resultados dosis de exposición vía ingesta oral–dérmica-inhalación por presencia de arsénico en el polígono de intervención para cada escenario propuesto 90
Tabla 17: Resultados riesgo extra-cáncer exposición vía ingesta oral, dérmica e inhalación, por presencia de arsénico 94
Tabla 18: Resultados índice peligrosidad vía ingesta oral, dérmica e inhalación por presencia de arsénico 97
Tabla 19: Resultados de las concentraciones totales y bioaccesibles de arsénico y plomo en Zona perimetral Hotspot 116
Tabla 20: Resultados Riesgo incremental e índice de peligrosidad por presencia de arsénico en Zona Hotspot 117

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema de los 16 subsectores estudiados en el estudio 44
Figura 2: Esquema de los subsectores del polígono intervención para estudio de riesgo: sector Puerto en amarillo, sector Maestranza en verde y sector F o industrial en rojo 45
Figura 3:Mapa ubicación del sector Puerto, con sus subsectores Centro (PC) y Puerto (PP), con sus puntos de muestreo en terreno. 59
Figura 4:Mapa ubicación del sector Maestranza, con sus subsectores Chinchorro Alto (PMCA) y Zona Industrial (PMZI), con sus puntos de muestreo en terreno. 60
Figura 5:Mapa ubicación de Sector F, con sus subsectores Alborada (AS), Huamachuco I y II (PH), Sica-Sica (PSS) y Villa Araucanía (PVA), con sus puntos de muestreo en terreno. 61
Figura 6:Mapa ubicación de Sector F, con sus subsectores Los Industriales 0 (PLI-0), Los Industriales I (PLI-I) y Los Industriales (PLI-II), con sus puntos de muestreo en terreno. 62
Figura 7:Mapa ubicación de Sector F, con sus subsectores Los Industriales III (PLI-III), Los Industriales IV (PLI-IV), con sus puntos de muestreo en terreno. 63
Figura 8: Muestreo final de *hotspots* – mayo de 2025 66
Figura 9: Modelo Conceptual del Estudio del Problema de Contaminación 76
Figura 10: Dosis de exposición acumulada por vía ingesta oral, dérmica e inhalación por presencia de arsénico para cada escenario propuesto 92
Figura 11: Resultados riesgo extra-cáncer exposición vía ingesta oral, dérmica e inhalación por presencia de arsénico para cada escenario propuesto 96
Figura 12: Resultados riesgo de índice peligrosidad por presencia de arsénico para cada escenario propuesto 99
Figura 13 :Curva de densidad probabilística de incidencia de plomo en niños residentes en polígono de intervención de Arica 102
Figura 14: Esquema de puntos Hotspots propuestos en enero 2025 114
Figura 15: Punto propuestos en pre-terreno, en marzo 2025 115
Figura 16 :Curva de distribución de probabilidad de incidencia de plomo en niños sector perimetral, hotspot de Arica 119

1 Glosario

Sigla/Acrónimo	Significado / Descripción
ADN	Ácido desoxirribonucleico
ADD	Dosis diaria promedio de exposición (por sus siglas en inglés, *Average Daily Dose*), expresada en mg/kg·día
ATSDR	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades de Estados Unidos. Forma parte del Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE. UU. ***ATSDR***, por sus siglas en inglés
Alcorque	Área delimitada alrededor de la base de un árbol urbano
BARGE	Grupo de Investigación de Bioaccesibilidad en Europa. Acrónimo en inglés "*Bioaccessibility Research Group of Europe"*. Consorcio científico europeo que desarrolló y recomendó el Procedimiento UBM para la medición de la bioaccesibilidad de contaminantes inorgánicos a partir de matrices sólidas especialmente en niños.
BGS	Servicio Geológico Británico (por sus siglas en inglés, BGS, *British Geological Survey*)
BGS-102	Material de referencia certificado (CRM) cuyo contenido total de metales y fracción bioaccesible. Certificado por el Servicio Geológico Británico
Bias	Es la diferencia entre los valores pronosticados y los reales, o una desviación sistemática en los resultados del muestreo.
CE	Conductividad eléctrica, propiedad física que indica la aptitud de un medio para transportar corriente eléctrica debido a la presencia de iones móviles.
CENMA	Centro Nacional del Medio Ambiente
CI	Coeficiente Intelectual
CIDH	Comisión Interamericana de Derechos Humanos
CITUC	Centro de Información Toxicología de la Universidad Católica; Centro Universidad Católica de Toxicología y Medio Ambiente de la Facultad de Medicina de la Pontificia Universidad Católica de Chile
CDE	Consejo de Defensa del Estado de Chile
CLEA	Agencia Ambiental Británica (por sus siglas en inglés *"UK Environment Agency")*
EFE	Ferrocarriles del Estado
EBK	Método geoestadístico de interpolación de análisis mediante Kriging bayesiano empírico
EMEG	Es la Guía de Evaluación de Medios Ambientales: Concentración estimada de un contaminante en el agua,

Sigla/Acrónimo	Significado / Descripción
	suelo o aire que, según la ATSDR, que es poco probable que cause efectos tóxicos no cancerosos apreciables en la salud humana durante un tiempo de exposición específico. Esta concentración se designa como EMEG por sus siglas en inglés *"Environmental Media Evaluation Guides"*
EPA	Agencia de Protección Ambiental Norteamericana
EU REACH Regulation	Es la Regulación (CE) Nº 1907/2006 de la Unión Europea sobre Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias y Mezclas Químicas (por sus siglas en inglés "*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals"*
FITRACE	Grupo multidisciplinar de investigadores del Departamento de Química de la UIB en la "Inyección de flujo y análisis de trazas"
Geofagia	La geofagia es el hábito de consumir tierra, arcilla o sustancias similares. Clasificada como un trastorno alimenticio tipo "pica", es común durante el embarazo, la infancia y en ciertas culturas.
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
HIARC	Comité de Revisión de Evaluación de Identificación de Peligros de la Agencia de Protección Ambiental, de los Estados Unidos.
Hotspots	Área geográfica localizada donde las concentraciones de contaminantes superan los niveles de referencia o valores normativos.
HI	Índice de Peligro, denominado por sus siglas en inglés, "Hazard Index" o (HI) por la USEPA.
HQ	Cociente de Peligro (por sus siglas en inglés, *Hazard Quotient"*), adimensional.
HQ_i	Cociente de Peligro correspondiente al contaminante y/o vía de exposición *i*.
ILCR	Incremento potencial del riesgo de cáncer durante la vida, por sus siglas en ingles "Increased Lifetime Cancer Risk"
IARC	Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer
ICP-MS	Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente
ICP-OES	Espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente
IEUBK	Modelo Integrado de Exposición, Absorción y Biocinética del Plomo en Niños (por sus siglas en inglés "*Integrated Exposure*

Sigla/Acrónimo	Significado / Descripción
	Uptake Biokinetic Model for Lead in Children"), desarrollado por EPA para evaluar riesgo de exposición al plomo en niños
ILCR	Incremento del Riesgo de Cáncer durante la Vida (por sus siglas en inglés, *"Incremental Lifetime Cancer Risk")*
ISO	Es la Organización Internacional de Normalización por sus siglas en inglés *"International Organization for Standardization"*
IP	Índice de Peligro, denominado Hazard Index (HI) por la USEPA
INAPI	Instituto Nacional de Propiedad Industrial
INERIS	Instituto Nacional Francés de Medio Ambiente y Riesgos Industriales
IUR	Riesgo Unitario por Inhalación (por sus siglas en ingles *"Inhalation Unit Risk*", IUR): parámetro toxicológico que representa el incremento estimado del riesgo de desarrollar cáncer durante la vida asociado a una exposición continua por inhalación a una concentración de 1 µg/m³ de un contaminante presente en el aire. Se expresa en $(\mu g/m^3)^{-1}$ y es específico para cada sustancia.
IRIS	Sistema Integrado de Información sobre Riesgos: Es una base de datos científica desarrollada por la EPA, por sus siglas en ingles "Integrated Risk Information System"
IVG	Modelo gastrointestinal in vitro por sus siglas en inglés "*In Vitro Gastrointestinal"*
ITRC	Consejo Interestatal de Tecnología y Regulación norteamericano por sus siglas en inglés " Interstate Technology & Regulatory Council", Washington, DC, USA
JJVV	Junta de Vecinos
LADD	Dosis diaria promedio durante la vida (por sus sigla en inglés, *"Lifetime Average Daily Dose*"), expresada en (mg/kg·día).
LOD	Límite de Detección (LOD) corresponde a la menor concentración de un analito que puede diferenciarse del ruido de fondo del método analítico, aunque no necesariamente puede cuantificarse con precisión. En otras palabras, el LOD permite determinar si un analito está presente, pero no proporciona un valor confiable de su concentración
LOQ	Límite de Cuantificación (LOQ), representa la menor concentración de un analito que puede ser medida con precisión y exactitud aceptables según las condiciones del método. Valores iguales o superiores al LOQ pueden reportarse cuantitativamente de manera confiable.
MABIOMET	Móvil Automatizado de Bioaccesibilidad de Metales Pesados

Sigla/Acrónimo	Significado / Descripción
MRL	Niveles de riesgo mínimo, establecidos por la ATSDR, por sus siglas en inglés, “Minimal Risk Levels” para estimar los EMEG
MINSAL	Ministerio de Salud de Chile
MINVU	Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile
MMA	Ministerio del Medio Ambiente
NCh	Norma Chilena
NIST 2710	Es un Material de Referencia Certificado (CRM, por sus siglas en inglés “Certified Reference Material”) producido por el **Instituto Nacional de Estándares y Tecnología** de Estados unidos ((NIST, por sus siglas en inglés, U.S. *National Institute of Standards and Technology. Material* utilizado ampliamente en análisis ambientales, especialmente para la calibración y control de calidad en la determinación de metales pesados en suelos contaminados.
Norma ISO	Una norma ISO es un documento consensuado que establece criterios, especificaciones, directrices o características técnicas para asegurar que materiales, productos, procesos y servicios sean seguros, confiables y de calidad.
Norma ISO 17924	Método estandarizado para medir bioaccesibilidad de metales en suelo (riesgo para salud).
Norma ISO 18400	Conjunto de normas estandarizadas para muestreo de suelos (representatividad y calidad de datos).
PBET	Prueba de extracción con base fisiológica, por sus siglas en inglés *“Physiologically Based Extraction Test”*
PCT	Tratado de Cooperación en materia de Patentes
PROMEL	Empresa Procesadora de Metales Ltda.
PROUCL	Software puesto a disposición por la Agencia de Protección Ambiental para proporcionar a los científicos ambientales herramientas para realizar análisis estadísticos.
PXRF	Equipo portátil de fluorescencia de rayos X portátil (por sus siglas en inglés “*Portable X-Ray Fluorescence*”)
QC	Control de la Calidad (*por sus siglas en inglés, Quality Control*). Son las acciones técnicas para verificar que los resultados obtenidos cumplen con los criterios de precisión y exactitud definidos (uso de blancos, duplicados y controles)
QA	Aseguramiento de la Calidad (*por sus siglas en inglés, Quality Assurance*). Es el sistema o conjunto de procedimientos planificados que se implementan para asegurar que todo el proceso (desde la toma de muestras hasta el informe final) se haga correctamente.
QGis	Software de sistema de información geográfica gratuito de código abierto QGis versión 3.34.12

Sigla/Acrónimo	Significado / Descripción
RfD	Dosis de Referencia (por sus siglas en ingles "*Reference Dose"*), expresada en mg/kg día.
RAGS	Guía de evaluación de riesgos para Superfund de la Agencia de protección ambiental norteamericana (RAGS, por sus siglas en inglés "Risk Assessment Guidance for Superfund")
RECV	Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV) , equivalente al *Incremental Lifetime Cancer Risk* (ILCR) definido por la USEPA,
RMEG	Guías de evaluación de medios basadas en el riesgo (RMEG por sus siglas en inglés, Risk-based Media Evaluation Guides) corresponden a concentraciones ambientales derivadas a partir de la dosis de referencia (RfD) de la EPA
RCA	Resoluciones de calificación ambiental
RPD	Diferencia porcentual relativa (por sus siglas en inglés *"Relative Percent Difference*". Indicador de precisión analítica, usado para evaluar qué tan reproducibles son dos mediciones del mismo parámetro (por ejemplo, duplicados de laboratorio o duplicados de campo).
SEREMI	Secretarías Regionales Ministeriales
SF	Es el Factor Pendiente Cancerígeno (*Slope Factor*), que representa la potencia carcinogénica de un contaminante y cuantifica el incremento estimado del riesgo de cáncer durante la vida por unidad de dosis diaria promedio recibido. Se expresa en $(mg/kg \cdot día)^{-1}$ y es específico para cada sustancia y vía de exposición. (por sus siglas en inglés, *"Slope Factor"),* expresado en $(mg/kg \cdot día)^{-1}$ La Guia del SEA lo define como la Potencia carcinogénica por ingestión.
SBR	Consorcio de Investigación en Solubilidad y Bioaccesibilidad por sus siglas en inglés, *"Solubility Bioaccessibility Research Consortium"*
SGS	Laboratorio internacional de inspección, verificación, pruebas y certificación
SILOB	Laboratorio especializado en análisis ambientales de aguas.
SMA	Superintendencia del Medio Ambiente
SPPC	Suelos con potencial presencia de contaminantes
TDAH	El trastorno por déficit de atención e hiperactividad
UBM	Método Unificado de Bioaccesibilidad
UIB	Universidad Islas Baleares de España
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de EE. UU por sus siglas en inglés *"U.S. Environmental Protection Agency"*
UTM	Coordenadas UTM (por su sigla en inglés *"Universal Transverse Mercator"*), son un sistema de proyección

Sigla/Acrónimo	Significado / Descripción
	cartográfica que permite ubicar cualquier punto de la Tierra mediante coordenadas métricas, expresadas en metros al Este y metros al Norte, dentro de una zona UTM específica.
UTA	Universidad de Tarapacá
UTEM	Universidad Tecnológica Metropolitana
Valor Outlier	Un valor outlier (o *valor atípico*) es una observación que se desvía de manera significativa del patrón general de los datos, mostrando una magnitud inusualmente alta o baja en comparación con el resto del conjunto muestral
WHO	Organización Mundial de la Salud (por sus siglas en inglés "*World Health Organization* ", WHO)

2 Resumen

Se realizó la primera reunión de inicio de proyecto en enero 2025 y se propuso la planificación y diseño del plan de muestreo de suelos urbanos en la ciudad de Arica, dentro del marco del estudio de contaminación por polimetales (As, Pb, Cd, Cr, Hg) para el Ministerio del Medio Ambiente (MMA). El trabajo fue liderado por la jefa de Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente de la UTEM, Ms. Maria Carolina Parodi Dávila que, junto a todo su equipo de profesionales e investigadores, contó con la colaboración de la Universidad de Tarapacá (UTA) y con la participación ciudadana de Juntas de Vecinos (JJVV). Para ello se realizó una visita preliminar, en marzo 2025, donde se realizó una inspección visual de los sectores urbanos (industriales, residenciales y áreas verdes) en estudio. Para el diseño del plan se aplicaron criterios de accesibilidad, representatividad espacial y seguridad. Algunos puntos fueron modificados y reubicados por pavimentación, riesgo o acceso restringido (Cerro Chuño, Maestranza EFE), por tanto, se definieron nuevos puntos viables y se generaron mapas .kmz para su localización. Las actividades claves del terreno fueron: a) Realizar las capacitaciones en patrimonio arqueológico (para sector EFE) para el personal de toma de muestra; b) Coordinación con JJVV, visita a JJVV y autoridades locales; c) Programación del trabajo de terreno entre mayo y junio 2025 en la UTA y en el Laboratorio Móvil de la UTEM instalado en sus dependencias. Finalmente se diseña, aprueba, ejecuta e informa el siguiente Plan de Muestreo asociado la modelo de evaluación de riesgos:

1. Diseño y Objetivo: caracterización química de los suelos superficiales, determinación de concentraciones totales y bioaccesibles de metales y metaloides en estudio y proceso de aseguramiento de la representatividad, trazabilidad y calidad (QA/QC) del muestreo. El muestreo implementado fue para un sitio urbano intervenido, por tanto, se toman las siguientes consideraciones específicas: a) Muestreo aleatorio no alineado (NCh 3400/01; pág. 35, punto C.7);

b) La profundidad de las muestras fue establecida por criterios multifactoriales, es decir, se consideraron profundidades desde 0 hasta 60 cm o más de acuerdo a los siguientes criterios que lo justificaron (USEPA 2003, 2007, 2009 a, 2009 b, 2024): uso actual y futuro del suelo; tipo de receptores expuestos; vías de exposición relevantes (ingestión incidental de suelo, contacto dérmico y polvo inhalable); actividades humanas que pueden generar contacto con suelos subsuperficiales (jardinería, juegos, excavaciones domésticas, obras de urbanización); historia de la intervención y movimiento de tierras; distribución vertical del contaminante y su comportamiento geoquímico; presencia de elementos carcinógenos, mutagénicos como el arsénico y plomo. En este proceso se debió además, considerar la limpieza superficial del sitio de muestreo y una recolección de un mínimo de 2 kg de muestra y 2 kg de contramuestra, con el debido etiquetado y registro GPS e ingreso a drive con ciberseguridad; c) Análisis in situ con espectrómetro PXRF Bruker S1 Titan; d) Secado, tamizado y homogenización en laboratorio; e) Preparación de muestras compuestas representativas en campo; f) Envío de contramuestras a Santiago (puntuales y compuestas de terreno) para preparación de las contramuestras representativas, cuantificación de bioaccesibilidad mediante tecnología MABIOMET en Santiago y su envío a Laboratorios externos certificados.

2. Equipamiento y Personal: Incluyó el uso herramientas manuales (palas, chuzo, bolsas HDPE, GPS Garmin, ahoyador, cuando sea factible) y equipos especializados (analizador XRF portátil). Participaron 15 profesionales entre geógrafos, geólogos, ingenieros químicos y psicóloga ambiental, 3 investigadoras del Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente de la UTEM y estudiantes de la UTA.

3. Aseguramiento y Control de Calidad (QA/QC): Se aplicó un sistema QA/QC conforme a ISO 17025, ISO 18400 y NCh 3400/01: uso de duplicados (≥10% de las muestras totales), contramuestras en todos los sectores, blancos de campo y Laboratorio (uso material certificado BGS-102), uso de controles de campo como material de referencia (NIST 2710 o BGS 102), RPD ≤20%, uso de blancos de

campo como suelo orgánico conocido sin contaminantes y análisis estadísticos con nivel de confianza ≥95%. Cada muestra posee código único y cadena de custodia digitalizada.

4. Cumplimiento Normativo: NCh 3400/01 (objetivo, técnicas adaptadas, registro, volumen, profundidad y cierre de calicatas) y con ISO 18400–17924 (técnicas, representatividad, replicabilidad y análisis geoestadístico). Ambas normas fueron complementarias, garantizando la validez técnica nacional e internacional.

5. Cobertura y Distribución de Muestras: Se tomaron 198 muestras en total (muestras puntuales + contramuestras) distribuidas en 16 subsectores urbanos: Puerto, Prat, Maestranza, Chinchorro, Industriales I–IV, Sica-Sica, Huamachuco, Villa Araucanía, Alborada, “Sitio origen F”, Hotspots (zona perimetral de Arica) y Cerro Chuño. Cada subsector se ajustó según área efectiva, excluyendo zonas pavimentadas, arqueológicas o privadas.

6. Clasificación de Uso de Suelo: Según el Plan Regulador de Arica puede haber 4 tipos: ZCA (comercial), ZC (equipamiento), ZR2/ZM1 (residencial o mixto), ZV/ZCE (áreas verdes o cementerios). Esta clasificación por “tipo de uso” permitió relacionar los niveles de presencia de contaminantes, su potencial contaminación y análisis de riesgo. Todos los subsitios en estudio estaban de acuerdo con el plan regulador y clasificados para uso residencial, recreacional ó áreas verdes.

7. Seguridad y Prevención: Se aplicaron medidas de seguridad del Sernageomin: uso de casco, lentes, respirador, guantes, chaleco reflectante, calzado y bloqueador solar. Se prioriza la seguridad, hidratación del equipo humano, horario y transporte rápido de muestras al laboratorio.

La ejecución de este plan de muestreo urbano de Arica (2025) permitió generar una base de datos experimental de concentraciones totales y bioaccesible para evaluar el riesgo ambiental con énfasis en la salud de la población, por la presencia de polimetales en los suelos urbanos de la comuna de Arica con

representatividad, trazabilidad, control de calidad y seguridad con validez geoestadística.

El desarrollo de la actividad “Determinación de la concentración total y bioaccesible de contaminantes de interés: cromo, plomo, cadmio, arsénico y mercurio en suelos y sitios de la comuna de Arica”, incluyó : a) la instalación del Laboratorio móvil; b) ejecución del plan de muestreo; c) coordinación y ejecución de los dos meses de trabajo (mayo-junio) en la UTA, incluyendo sábados y domingo para realizar la toma de muestras, procesamiento y caracterización geoquímica de muestras, fabricación de muestras compuestas y cuantificación de % bioaccesibilidad en campo; d) entrega de resultados obtenidos en campo de las concentraciones bioaccesible obtenidas por fotometría y totales por PXRF; e) entrega de resultados de caracterización de concentraciones totales por ICP óptico de las 32 muestras representativas (muestras y contramuestras) y por el Método EPA 7471AB; f) Detección y cuantificación de concentraciones ambientales totales presentes y su distribución espacial; g) Caracterización química de las muestras de suelo representativas, para cuantificar la concentración total y bioaccesibilidad de los contaminantes de interés; h) Análisis y determinación de estadígrafos de muestras representativas por PXRF y por ICP Óptico, incluyendo análisis de blancos y controles para validar el sistema de control de calidad del muestreo.

Los resultados de campo (PXRF y fotometría) obtenidos en el polígono de intervención de Arica revelan que:

a) Para el caso del arsénico, se obtuvo que en todos los sitios se cuantificó arsénico bioaccesible cuya fase control del riesgo fue la gastrointestinal y en promedio llegó a un valor del 61%. Estos valores se verificaron mediante uso de la técnica de ICPMS donde se obtuvieron valores promedio de 64 % bioaccesibilidad.
b) Para el caso del plomo, se detectaron en algunos sitios plomo bioaccesible, lo que sugirió la necesidad de una validación por ICPMS para verificar este

hallazgo. En el resto de los sitios no se cuantificó plomo bioaccesible, esto debido a la presencia de interferentes, lo que limitó la técnica fotométrica en campo.

c) No se detectó y no se cuantificó cadmio en ningún sitio (todas son concentraciones estaban bajo el límite de detección).
d) No se pudo cuantificar en campo el mercurio y cromo porque ambos metales requieren de equipos más sensibles y sus ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente de Santiago.

De los resultados obtenidos para la caracterización física, el pH, humedad y CE (conductividad eléctrica) de las muestras por subsector, se concluyó que son suelos no salinos, neutros, con un bajo contenido de humedad, y que de acuerdo con sus características morfológicas y de color, tenían bajo contenido de materia orgánica y con acumulaciones superficiales de carbonato de calcio (caliche), correspondiente a suelos tipo Aridisoles.

De los resultados de las muestras caracterizadas por Laboratorios externos acreditados (ICP Óptico y ICMPS) obtenidos en el polígono de intervención de Arica revelaron que:

a) Destacó como principal resultado que no se detectó y no se cuantificó mercurio en ningún subsector, excepto en dos de las muestras representativas del subsector Centro-Prat, donde presentan valores cercanos a 0,1 ppm, que no son de interés ambiental y no representan ningún riesgo ambiental.
b) Para el arsénico se obtuvo que en todos los subsitios estudiados hay arsénico bioaccesible cuya fase control del riesgo fue la gastrointestinal con valores promedio de 64 % bioaccesibilidad. Los valores más elevados se observaron en el sector Maestranza y Los Industriales.
c) Para el plomo se obtuvo que en todos los sitios había plomo bioaccesible cuya fase control del riesgo fue la gástrica con valores promedio de 78 % bioaccesibilidad.

d) No se detectó y no se cuantificó, cadmio y mercurio bioaccesible de interés ambiental (todas las concentraciones estaban bajo el límite de detección)
e) Considerando el control de calidad aplicado y la adopción de ICP-OES e ICP-MS como referencia para las fracciones totales y bioaccesibles, la base analítica presentada es robusta y permitió sustentar la interpretación geoquímica y de la evaluación de riesgo con fundamento técnico.

De las actividades educativas y de difusión con las Juntas de Vecinos realizadas durante la campaña de terreno, se ofreció un balance general del avance del estudio, se respondieron dudas e inquietudes manifestadas por las asistentes y se permitió el ingreso al Laboratorio móvil, lo que permitió reafirmar el compromiso del equipo de investigación con una entrega transparente, accesible y contextualizada de los resultados. Además, la directora del proyecto participó de manera virtual, en el “Seminario de cierre de gestión 2022–2025. Ley N°20.590 establece un programa de intervención en zonas con presencia de polimetales en la comuna de Arica” con el fin de mostrar los avances preliminares a diciembre 2025, previo al cierre final.

De las entrevistas con las comunidades del polígono de intervención en Arica se concluyó que existía una percepción persistente de riesgo por contaminación por los polimetales (fundamentalmente plomo y arsénico), asociada a las experiencias de daño en la salud y a la sensación de que las remediaciones realizadas han sido insuficientes, derivada de años de una memoria colectiva de abandono e injusticia ambiental. También reveló que este nuevo estudio generó expectativas y confianza, especialmente por su nuevo enfoque en la bioaccesibilidad y por la transparencia las fases de difusión.

El estudio de riesgo a la salud de la población se basó en un modelo conceptual de riesgo de estudio donde su evaluación cuantitativa y detallada se focalizó en el

arsénico y plomo. Para ello, se realizó un análisis preliminar basándose en los siguientes criterios que se detallan a continuación:

A.- Análisis de las concentraciones totales de los analitos (cromo, cadmio, mercurio y arsénico) en el suelo: fueron evaluadas mediante la comparación con los valores de referencia “EMEG” establecidos por la ATSDR por ser un criterio de screening o “tamizaje” conservador para la identificación de potenciales riesgos a la salud humana bajo escenarios de exposición residencial. El valor de referencia “EMEG”, es una guía de evaluación de un medio ambiental, basada en el cálculo de una concentración estimada de un contaminante en el suelo que, según la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades de Estados Unidos (ATSDR por sus siglas en inglés), que es poco probable que cause efectos tóxicos no cancerosos apreciables en la salud humana durante un tiempo de exposición específico.
B.- Análisis de los factores socioambientales de la comuna a partir de las entrevistas a las JJVV con la psicóloga ambiental.
C.- Análisis de presencia de concentraciones bioaccesibles y antecedentes históricos.

De la comparación de los resultados de concentraciones totales con los valores EMEG, como criterio de tamizaje inicial en la evaluación de riesgo por exposición oral en suelo se obtuvo que:
a.1.- En el caso del mercurio (Hg), cadmio (Cd) y cromo (Cr) : las concentraciones totales promedio detectadas son inferiores a las concentraciones EMEG establecidas para población infantil y adulta, lo que sugirió una baja probabilidad de efectos adversos bajo los escenarios de exposición evaluados.
a.2.- Para el caso del arsénico (As) y plomo (Pb): estos dos analitos se incorporan al modelo de riesgo detallado, por ser elementos de preocupación social y por cuantificarse concentraciones bioaccesibles, lo que permitió realizar una caracterización realista de la exposición. En estos dos casos, y bajo un criterio

más conservador, según criterios establecidos por la OMS, se deben ingresar en la evaluación cuantitativa detallada de riesgo, aun cuando algunos de ellos no excedan los valores EMEG, con el fin de reducir la incertidumbre asociada a la estimación del riesgo y fortalecer la robustez del análisis.

a3.- Adicionalmente, para el caso del mercurio (Hg), cadmio (Cd) y cromo (Cr) : no se detectó presencia de concentraciones bioaccesibles de interés ambiental para estos tres elementos en los sitios estudiados (mercurio bioaccesible ~ 0 y cadmio bioaccesible ~ 0,165 ppm y cromo bioaccesible ~ 2,819 ppm), por lo que no hay antecedentes cuantitativos de interés ambiental para su evaluación detallada.

En función de lo anterior, estos tres analitos fueron excluidos del análisis cuantitativo detallado de riesgo, considerando tanto el cumplimiento de los criterios de tamizaje como de la ausencia de información complementaria que permita refinar la estimación de exposición.

Del análisis estadístico por medio del uso software PROUCL, se cuantificaron las concentraciones totales y bioaccesibles, representativas promedio del sector polígono de intervención para su incorporación al estudio de riesgo:

a) Para el arsénico, se obtuvo una concentración total igual 12,92 [mg/Kg], concentración gastrointestinal igual a 10,3 [mg/Kg] y 80% de bioaccesibilidad, mediante un análisis estadístico 95% Student´s-t UCL.
b) Para el plomo, se obtuvo una concentración total igual 50,23 [mg/Kg], concentración gástrica igual a 48,85 [mg/Kg] y 97% de bioaccesibilidad, mediante un análisis estadístico “95% Student´s-t UCL”.

Con estos valores, el análisis de riesgo incremental por exposición al arsénico mostró que, en las condiciones actuales del año 2025, se encuentra dentro un rango aceptable de 1,1 E -06 para niños y 1,4 E -06 para adultos. Estos resultados, a la fecha de realización de este estudio de campo (mayo 2025), mostraron que el riesgo es bajo, que hubo una reducción del 90% del área efectiva

del polígono, que el riesgo se encuentra controlado y que habiéndose terminado las obras de remediación y sellado, resta hacer el seguimiento de evaluaciones periódicas de estudios ambientales para dar cumplimiento a la ley 20.590.

Respecto a la evaluación de riesgo por exposición al plomo para los escenarios en estudio, se usó el “Modelo Integrado de Exposición, Absorción y Biocinética del Plomo en Niños” (por sus siglas en inglés se designa, IEUBK). Con este software se obtuvo que la distribución de plomo en sangre para niños entre 0 y 7 años es de 1,356 µg/dL, valor por debajo de la referencia teórica internacional (umbral conservador teórico de 2 µg/dL), con una probabilidad de excedencia teórica inferior a un 0,3%, lo que evidencia un control robusto del riesgo.

Del análisis de los efectos crónicos del arsénico a los que está expuesta la población que vive en el polígono de intervención, los resultados de los índices de peligrosidad resultaron ser muy inferiores a la unidad tanto, en niños como adultos (IP< 0,003).
Con estos resultados se pudo confirmar que el riesgo a la salud es bajo y está controlado.

3 Introducción

De acuerdo con el informe elaborado en 2009 por el Gobierno de Chile, titulado “Programa Maestro de Intervención Zonas con Presencia de Polimetales en Arica”, la Presidencia de la República instruyó la elaboración, con fecha tope el 14 de septiembre de 2009, de un Plan Maestro de Intervención en Arica (Gobierno Regional de Arica y Parinacota, 2009). Este debía abordar de manera integral la problemática de la contaminación por polimetales tóxicos, incluyendo un programa de salud para la población afectada y la evaluación de eventuales reubicaciones de viviendas en zonas contaminadas.

El eje central de esta intervención es el sanitario, desde donde se formulan recomendaciones en el ámbito de la salud pública. A partir de este enfoque, se establecen criterios orientadores para las acciones en educación y vivienda, así como un Programa de Salud para la población expuesta a polimetales (Gobierno Regional de Arica y Parinacota, 2009).

Mediante el análisis de información documental y entrevistas con actores clave, se identificaron zonas con fuentes de exposición a polimetales, entre las que se encuentran: el Sitio F y la zona de relaves de Promel; la zona de Maestranza; y el Puerto. En el caso del Sitio F, la fuente de exposición se relaciona con los acopios de residuos con alto contenido de plomo y arsénico, ingresados desde Suecia en 1984, así como con actividades de procesamiento de metales y relaves realizadas por la Empresa Procesadora de Metales Ltda. (PROMEL). En la zona de Maestranza, el riesgo proviene del almacenamiento y tránsito de ferrocarriles y camiones con minerales bolivianos, también con altos contenidos de plomo (Vivanco, 2019).

Posteriormente, en 2012, se promulgó la Ley N° 20.590 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, titulada “Establece un Programa de Intervención en Zonas con Presencia de Polimetales en la Comuna de Arica” y en 2014 se dictó el

Decreto Supremo N°80, titulado “Modifica el Reglamento de la ley N°20.590”, que sustituye el articulado del decreto N°113 de 2012, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. El objetivo del reglamento es operacionalizar lo establecido en la Ley N° 20.590, definiendo las acciones a implementar tanto en los territorios específicos afectados como en la población beneficiaria ley (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2014).

La Ley N° 20.590 reconoce la condición de la comuna de Arica como zona con presencia de polimetales y establece la necesidad de realizar estudios que permitan determinar los niveles de contaminación y definir medidas de intervención. Si bien no se establece un protocolo específico de muestreo o monitoreo ambiental, el reglamento establece mecanismos de evaluación y seguimiento del riesgo. En este contexto, una vez ejecutadas las acciones de intervención en las zonas identificadas, el Ministerio del Medio Ambiente, en coordinación con la Autoridad Coordinadora, deberá realizar evaluaciones periódicas para verificar los resultados de las intervenciones y su impacto sobre la salud y el ambiente (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2014).

En este contexto, el presente estudio de continuidad se desarrolló considerando algunos de los aspectos del informe entregado por el CITUC, titulado *“Determinación de la concentración de contaminantes de interés en la ciudad de Arica”*, publicado en noviembre de 2021 (Centro de Información Toxicológica de la Universidad Católica, 2021), sin embargo, sus resultados no son comparables porque la metodología usada consideró un modelo de riesgo actualizado incorporando el uso de la bioaccesibilidad, actualizaciones bibliográficas y científicas de las Agencias de Protección Ambiental de Estados Unidos.

La principal propuesta de valor y elemento diferenciador de este nuevo estudio respecto de los trabajos previos radica en la incorporación del análisis de la bioaccesibilidad de polimetales presentes en el suelo, específicamente arsénico, plomo, cadmio, cromo y mercurio, dentro del polígono de intervención definido por los mencionado en la ley, para cuantificar el riesgo real a la salud de la población.

Para ello, se aplicó el Método UBM (ISO 17924), para estimar la fracción real de contaminantes que puede ser absorbida por el organismo humano al estar en contacto con el suelo (International Organization for Standardization, 2018). Este procedimiento se llevó a cabo utilizando la tecnología MABIOMET, desarrollada y patentada por la UTEM, ante INAPI. Esta tecnología contó con un sistema de trazabilidad integral que abarca desde la toma de muestra hasta la entrega de los resultados de bioaccesibilidad, permitiendo cuantificar en línea y en tiempo real las variables críticas en terreno, lo que mejoró significativamente la precisión de la estimación de las concentraciones de exposición (Parodi *et al*., 2024).

El estudio contempló la recolección de aproximadamente 200 muestras de suelo en distintos puntos de la ciudad de Arica. A partir de estas muestras, se fabricaron muestras representativas por cada sector de interés, con el objetivo de evaluar el riesgo potencial a la salud de la población debido a la presencia de polimetales en el suelo dentro del área de intervención establecida (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2012), considerando que el objetivo del reglamento es establecer si existen nuevas zonas de riesgo, y dar seguimiento a las zonas ya definidas.

3.1 Objetivo general del estudio

Determinar las concentraciones de exposición a los contaminantes de interés -Arsénico, Cadmio, Cromo, Plomo y Mercurio- en los suelos de la comuna de Arica, mediante el diseño y la ejecución de un plan de muestreo que cumpla con todos los criterios técnicos pertinentes (Ministerio del Medio Ambiente, 2015), considerando las condiciones actuales de la comuna. Este estudio se lleva a cabo conforme a lo establecido en la Ley 20.590 y su respectivo reglamento (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2012; Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2014), asegurando así que la recolección de datos sea precisa y representativa, lo que permite evaluar de manera adecuada la existencia o no de niveles de contaminación por estos analitos en la zona específica de estudio.

3.2 Objetivo Específicos del Estudio

a) Revisión de gabinete, recopilación que considere la búsqueda bibliográfica nacional e internacional, relacionada a la temática en estudio y a la gestión de suelos contaminados y afines.

b) Diseñar, planificar y ejecutar un plan de muestreo de suelos en la comuna de Arica.

c) Determinar la concentración total y bioaccesible de los contaminantes de interés (cromo, plomo, cadmio, arsénico y mercurio) en suelos y sitios de la comuna de Arica, con el fin de hacer un análisis en relación con los potenciales daños que afectan la salud de la población

d) Identificar y determinar los sectores en donde la concentración de contaminantes de interés sobrepasa valores de referencia internacionales y compararlos con los valores background de la comuna de Arica.

e) Realizar un análisis ambiental de suelos en los polígonos definidos por la Ley N° 20.590 en la comuna de Arica (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2012), enfocándose sólo en la caracterización de contaminantes inorgánicos en estudio: arsénico, plomo, cadmio, cromo y mercurio, considerando sus concentraciones totales y su fracción bioaccesible como insumo para la evaluación de riesgo a la salud de la población por ingesta accidental de polimetales presentes en los suelos de Arica en estudio

f) Desarrollar un diagnóstico del estado actual de los suelos en los sitios evaluados, incorporando el análisis de bioaccesibilidad como variable ambiental para estimar el riesgo.

g) Realizar un estudio de riesgo para la salud de la población por exposición a los polimetales en estudio, considerando el porcentaje de bioaccesibilidad de los sitios en estudio, como variable ambiental para su cuantificación.

h) Llevar a cabo talleres de socialización dirigidos a la comunidad, en particular a las Juntas de Vecinos ubicadas dentro del Polígono de Intervención, con el objetivo de informar y sensibilizar respecto a los

resultados del estudio y los conceptos asociados a la exposición a polimetales.

3.3 Metodología y diseño estratégico del proyecto.

1. Determinación de la concentración de exposición de los contaminantes de interés principalmente en las áreas especificadas en los siguientes sectores: Hotspots definidos en el estudio Evaluación de Riesgos en la Comuna de Arica por la Presencia de Polimetales en la Matriz Suelo (Gobierno Regional de Arica y Parinacota, 2009); sector puerto, sector maestranza y el sector F.
2. Como antecedente estratégico, se consideró el estudio realizado en el año 2021 por el CITUC, titulado “Determinación de la concentración de contaminantes de interés en la ciudad de Arica” (Centro de Información Toxicológica de la Universidad Católica, 2021). Este estudio evidenció que el comparar únicamente las concentraciones totales de contaminantes presentes en el suelo con los valores establecidos por normas internacionales resulta insuficiente, dado que en Chile no existe una norma de calidad de suelos vigente. En particular, este análisis basado en los valores de EMEG (Environmental Media Evaluation Guide, o Guía de Evaluación de Medios Ambientales; Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2020) no permitió obtener conclusiones determinantes respecto al riesgo real para la salud humana, lo que hace necesario profundizar en estudios que consideren la exposición efectiva bajo condiciones locales. En general, las evaluaciones tradicionales utilizan la concentración total en el suelo, asumiendo que el 100% del contaminante es absorbido por el organismo. Sin embargo, esto no es consistente con la evidencia científica, ya que solo una fracción del contaminante es bioaccesible, es decir, potencialmente soluble en el tracto gastrointestinal y disponible para absorción sistémica. Por lo tanto, sobreestima la dosis de exposición y el riesgo.

3. Uso de la variable ambiental bioaccesibilidad, que es la fracción del contaminante que puede ser absorbida por el organismo humano tras el contacto con el suelo, bajo condiciones fisiológicas simuladas. Este nuevo enfoque permitió realizar una mejor estimación del riesgo potencial, especialmente en poblaciones vulnerables como niños (International Organization for Standardization, 2018; Parodi et al., 2024). De esta forma el uso de la bioaccesibilidad permitió transitar de una evaluación conservadora hacia una evaluación realista del riesgo, permitiendo tomar decisiones regulatorias técnicamente robustas, proporcionales y basadas en evidencia científica.
4. Cuantificación de la fracción bioaccesible de los metales y metaloides de interés de las muestras representativas por cada sector en estudio, con el fin de cuantificar el riesgo incremental a la salud de la población aledaña de los sitios en estudio (International Organization for Standardization, 2018; Parodi et al., 2024.
5. Realizar la detección y cuantificación de concentraciones totales de metales en los sitios seleccionados mediante el uso de espectroscopía de fluorescencia de rayos X portátil (PXRF). Técnica que permitió medir las concentraciones de elementos químicos directamente en terreno, de manera rápida y no destructiva. Adicionalmente, se empleó el PXRF en modo escritorio (laboratorio) para aquellas muestras previamente preparadas, utilizando una calibración específica desarrollada para las características del suelo de la comuna de Arica.
6. Validación y certificación de los resultados, mediante el envío de muestras representativas al laboratorio SGS Minerals S.A., el cual cuenta con acreditaciones vigentes para realizar análisis de concentraciones totales mediante espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES, por sus siglas en inglés: Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry, o en español: Espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente). El análisis utilizado fue

el "Test ICP Geoquímico de 36 Elementos" (0.2 g, 20 ml), el cual permite identificar y cuantificar con alta precisión los elementos de interés.

7. Determinación de la fracción bioaccesible de los metales (arsénico, plomo, cadmio, cromo y mercurio), mediante el método BARGE , estandarizado bajo la norma ISO 17924 (International Organization for Standardization, 2018), en conjunto con la tecnología MABIOMET desarrollada por la Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM) y con patente concedida por la INAPI en el año 2024 (Parodi et al., 2024). Esta tecnología permitió realizar la trazabilidad completa desde la toma de muestra hasta el análisis de bioaccesibilidad, midiendo en tiempo real variables ambientales in situ que influyen en la exposición.
8. Determinación en terreno de las fracciones bioaccesibles por fotometría, como medida de campo que permitió cuantificar la bioaccesibilidad con un error del 30%, mediante el uso de una curva de calibración diseñada para el equipo en el Laboratorio. Para la certificación de los resultados se enviaron las contramuestras al Laboratorio externo, SILOB Chile, que cuenta con las acreditaciones requeridas para validar este estudio (concentración bioaccesible) para todas las muestras representativas en estudio.
9. Se realizaron las visitas a las Juntas de Vecinos del Polígono de Intervención para informar los alcances del estudio, se realizaron charlas de difusión de apertura y cierre de proyecto y se recibieron a los vecinos para mostrar las instalaciones del laboratorio móvil y explicar a la comunidad el proceso de cuantificación de la bioaccesibilidad. Estas actividades se llevaron a cabo con la participación de una doctora en psicología ambiental, quien abordó los aspectos psicosociales relacionados con la percepción del riesgo ambiental de la comunidad.

3.4 Certificaciones

1. El plan de muestreo se realizó conforme a la norma chilena NCh 3400/1: Calidad de Suelos – Directrices para el diseño de programas de muestreo

(Instituto Nacional de Normalización, 2020), la cual establece los criterios técnicos para la planificación y ejecución del muestreo de suelos. Complementariamente, y para asegurar la compatibilidad con las técnicas utilizadas, el Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente de la UTEM incorporó también las directrices de la norma internacional ISO 18400 (International Organization for Standardization, 2017), a fin de cumplir con los requerimientos metodológicos asociados a la norma ISO 17924, relacionada con la cuantificación de la bioaccesibilidad de contaminantes en suelos (International Organization for Standardization, 2018).

2. En el laboratorio, el ensayo de bioaccesibilidad se llevó a cabo mediante el método estandarizado UBM (Unified Bioaccessibility Method), técnica respaldada por la norma ISO 17924 (International Organization for Standardization, 2018). Este procedimiento fue ejecutado utilizando la tecnología MABIOMET, implementada desde el año 2022 en las dependencias del Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente y en su Laboratorio móvil, que teniendo registro de marca propia y patente concedida en Chile por INAPI en 2024 (Parodi et al., 2024), le otorgó su uso exclusivo en el país. Actualmente, la solicitud de patente aún se encuentra en trámite internacional (vía PCT) en España, Inglaterra, Holanda, Australia, China y Canadá.
3. Descripción de la tecnología MABIOMET: Es un dispositivo desarrollado por la Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM), protegido por la solicitud de patente PCT/CL2020/050198, actualmente en tramitación en las jurisdicciones mencionadas. En Chile, la patente fue concedida con fecha 10 de abril de 2024, bajo el registro N° 68.865, y su marca fue concedida en INAPI bajo el N° 1.388.792 (Parodi et al., 2024).
4. El Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente de la UTEM en Santiago y su Laboratorio móvil, contó con el certificado de operación emitido por el Comité de Bioseguridad de la UTEM. Este documento concede el respaldo

institucional para haber realizado las actividades contempladas en el proyecto.

5. Se contó con la participación del Laboratorio externo SILOB Chile, encargado del análisis de metales pesados y metaloides presentes en los extractos bioaccesibles enviados de las muestras y contramuestras representativas. Dichos análisis se realizaron mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), utilizando el equipo Agilent Technologies 7700 Series con autosampler CETAC ASX-520. Las muestras requirieron de una etapa previa de digestión ácida, proceso que fue realizado mediante el uso del equipo digestor por microondas Mars 6 de CEM, bajo el método 3050B establecido por la USEPA (United States Environmental Protection Agency, 2020). SILOB Chile, ubicado en la Región de Valparaíso, está acreditado bajo la norma NCh-ISO 17025.Of2005 (Instituto Nacional de Normalización, 2005) para la realización de muestreos, ensayos microbiológicos, fisicoquímicos y organolépticos en alimentos, productos hidrobiológicos, aguas, aguas residuales y sedimentos.
6. Asimismo, se contó con la participación del Laboratorio SGS Minerales S.A. para la validación de las concentraciones totales de metales y metaloides en las muestras y contramuestras representativas. Este Laboratorio cuenta con acreditaciones técnicas y equipos especializados, lo que permitió garantizar la calidad y confiabilidad de los resultados obtenidos.
7. Para la ejecución del estudio, el laboratorio móvil se estacionó en las dependencias de la Universidad de Tarapacá, en virtud del convenio de colaboración suscrito entre la UTEM y la UTA, formalizado mediante Resolución N° 329 del 24 de enero de 2025 y autorizado por el mandante. Esta ubicación fue definida en común acuerdo por consideraciones técnicas, aspectos de seguridad del equipo humano y equipamiento mayor, acceso a energía eléctrica estable, cercanía con instalaciones adecuadas para el lavado de material de laboratorio, acceso a baños para el personal y

disposición final de residuos líquidos peligrosos, para el cumplimiento de la normativa ambiental vigente (Ministerio de Salud, 2004).

3.5 Importancia del uso de la bioaccesibilidad en la evaluación de riesgos a la salud de la población en los suelos de Arica.

La biodisponibilidad de metales pesados y metaloides se define como la fracción de un contaminante presente en el suelo que es absorbida por el organismo humano a través de vías como la ingestión, inhalación o contacto dérmico, y que está disponible para participar en reacciones metabólicas o causar efectos tóxicos (US EPA, 2007; Ruby et al., 1999). Un concepto relacionado con la biodisponibilidad es la bioaccesibilidad, que nos acerca a este valor sin realizar pruebas en humanos, que corresponde a la fracción del metal que se disuelve en el tracto gastrointestinal y está potencialmente disponible para su absorción humana (Wragg et al., 2011). La bioaccesibilidad depende de factores como la especiación química del metal, la matriz del suelo (pH, materia orgánica, mineralogía) y las condiciones fisiológicas del organismo (Chou & Harper, 2007).

Históricamente, durante la década de los 90 y hasta principios de los años 2000, la bioaccesibilidad de metales pesados y metaloides presentes en suelos contaminados, la asociaban directamente a la biodisponibilidad como una manera de acercarse a las condiciones humanas de exposición de estos analitos y se estimaba mediante la extracción con ácido clorhídrico (HCl) diluido a temperatura ambiente, según el instructivo ILQAS-001510, seguida de cuantificación por espectrometría de plasma inductivamente acoplado (ICP-OES). Este método, basado en principios de la química inorgánica y analítica (Shriver & Atkins, 2008; Harris, 2001; Burriel & Lucena, 2017), asumía que la solubilidad de los metales en HCl a 37°C era un indicador aproximado de su biodisponibilidad (Hooda, 2010). Sin embargo, este método carece de componentes críticos como la simulación de

enzimas, agitación gástrica o la fase intestinal, lo que puede **sobreestimar o subestimar la fracción bioaccesible** y finalmente la biodisponibilidad, especialmente de metales pesados y metaloides presentes en matrices de suelo complejas. Desde aproximadamente, el año 2000 en adelante, han surgido metodologías *"in vitro"* más avanzadas para evaluar la bioaccesibilidad, para acercarse a la biodisponibilidad, superando las limitaciones anteriores, las más destacadas son:

a) El Método Unificado de Bioaccesibilidad BARGE (UBM; ISO 17924:2018): Simula las fases gástricas (pH ~1.5, con pepsina) e intestinal (pH ~6.5, con sales biliares y pancreatina).
b) Modelo gastrointestinal "in vitro" (IVG) Evalúa metales pesados y metaloides en suelos y alimentos. (Van De Wiele, et al 2007)
c) Prueba de extracción con base fisiológica (PBET): Similar al UBM, con variaciones en pH y enzimas (Kelley et al., 2002).

De estas metodologías, el Método UBM tiene una mayor solidez científica debido a que:

a) Cuenta con validación contra estudios *"in vivo"* para el arsénico y el plomo (Wragg et al., 2011; Wragg et al., 2009).
b) Fue recomendada por el Grupo de Investigación de Bioaccesibilidad de Europa, BARGE y con estandarización bajo la norma ISO 17924 en el año 2010.
c) Su capacidad para considerar la especiación química de analitos y la caracterización de la matriz del suelo por su efecto en la bioaccesibilidad, y por incluir por medio del uso de la norma ISO 18.400 para establecer métodos con validez geoestadística para sus ensayos.
d) La prueba ha sido validada para arsénico, cadmio y plomo en un ensayo Interlaboratorio (Wragg et al., 2009).

Por lo tanto, en el marco de este estudio de seguimiento de la Ley de polimetales se consideraron tres características significativas para justificar el uso de valores experimentales de bioaccesibilidad para estimar el riesgo real a la salud de la población por exposición al arsénico, plomo, cadmio, cromo y mercurio:

a) sitios donde la presencia de potenciales contaminantes tuvo como procedencia (fuente primaria) residuos industriales que además afectaron a zonas residenciales aledañas;
b) es un estudio que requiere verificar la afectación real a la salud de las personas (niños y adultos) por la exposición principalmente al arsénico, plomo y cadmio (CITUC, 2021) presentes en una matriz compleja de suelos en estudio (pH=7);
c) sitios donde aún se informan valores de arsénico y plomo por sobre los valores background (CITUC, 2021);

Dada estas condiciones, el uso del Método UBM, implementado en el Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente, de la UTEM, por medio de la tecnología de MABIOMET, ofreció las siguientes ventajas y diferenciación a estudios anteriores realizados por el Ministerio de Medio Ambiente que se detallan a continuación:

a) Uso de un método que incluye la simulación fisiológica completa: considera simulación de fases gástrica e intestinal con enzimas y sales biliares.
b) Uso de un método con validación *“in vivo”:* Correlaciona mejor con la biodisponibilidad real, evitando sobreestimaciones o subestimaciones del riesgo.
c) Uso de un método con estandarización internacional: Cumple con la norma ISO 17924.
d) Uso de un método con mayor precisión: Considera la posible especiación química de los analitos y la caracterización de la matriz del suelo (pH 7,00 en Arica), que influyen en las concentraciones

bioaccesible y finalmente en los % de bioaccesibilidad del arsénico, plomo y cadmio, presentes en el suelo.

e) Realizar un estudio de riesgo a la salud de las personas por ingesta accidental de suelos potencialmente contaminados, usando valores experimentales de porcentajes de bioaccesibilidad, tal como sugiere la Agencia Ambiental de Estados Unidos para evitar sobreestimar o subestimar la concentración de exposición, al tomar valores estandarizados.

Finalmente, la cuantificación de la bioaccesibilidad de metales pesados y metaloides con el Método UBM, le dio un nuevo enfoque metodológico a los estudios de riesgo al estar estandarizado y de acuerdo con lo que recomienda la USEPA para estudios de riesgo, el uso de valores experimentales para no sobreestimar los resultados.

4 Antecedentes Ambientales de Arica para el estudio de riesgos

4.1 Residuos

En el año 1984, la empresa Promel ingresó por el puerto de Arica aproximadamente 20 mil toneladas de residuos peligrosos con un alto contenido de polimetales, principalmente arsénico (As) y plomo (Pb). Estos desechos permanecieron durante seis meses en las instalaciones portuarias antes de ser trasladados al sector conocido como “Sitio F”. Durante el mismo año, se realizaron modificaciones al Plan Regulador Comunal de Arica, lo que permitió la construcción de viviendas en áreas colindantes al depósito de estos residuos. En 1985 se entregaron las primeras viviendas y en el año 1998 estos residuos fueron finalmente trasladados a un sector de Quebrada Encantada, donde se procedió al sellado de este sector y del “Sitio origen F”. En total, estos residuos tóxicos con altas concentraciones de polimetales estuvieron en contacto directo con el suelo de la comuna cerca de 14 años. Actualmente, aún existen algunas zonas representan un foco de potenciales conflicto socioambientales. En particular, el sector conocido como “Cerro Chuño” ha vuelto a ser motivo de preocupación, debido al uso habitacional ilegal, provocando la proliferación de microbasurales por la acumulando residuos domiciliarios profundizando la problemática socioambiental del área.

4.2 Calidad de Aire

Los residuos ingresaron al país en formato a granel, lo que generó grandes acumulaciones de desechos en forma de cerros. Paralelamente, el Puerto de Arica también funcionaba como receptor de concentrados minerales provenientes de Bolivia, los cuales contenían elevadas concentraciones de plomo (Pb) y zinc (Zn). Durante los 14 años en que estos residuos permanecieron almacenados dentro del área urbana de Arica, su exposición constante a la intemperie favoreció la

dispersión de material particulado y sedimentado por acción del viento. A esto se sumó el transporte ferroviario de los minerales bolivianos a través de la ciudad, lo que incrementó aún más la diseminación de contaminantes en el entorno urbano. Como resultado, diversos sectores de la ciudad se vieron afectados, especialmente las zonas cercanas al Puerto de Arica, la Maestranza Arica–La Paz y el denominado “Sitio F”. Si bien Arica, por su ubicación costera, presenta en condiciones normales bajos niveles de contaminación atmosférica, en este contexto particular la velocidad del viento intensificó la dispersión de los contaminantes en el entorno urbano. En la actualidad, la ciudad cuenta con una única estación de monitoreo de calidad del aire, ubicada en la Escuela D-17. Esta estación fue instalada en el año 2013 y mide el material particulado fino (PM2.5).

4.3 Agua Potable

El norte de Chile se caracteriza por la presencia de suelos con alto contenido de minerales, entre los cuales destacan el plomo (Pb) y el arsénico (As). En la ciudad de Arica, el abastecimiento de agua potable proviene principalmente de fuentes subterráneas ubicadas en los valles de Azapa y Lluta. Estos valles son atravesados por ríos que presentan crecidas anuales de gran caudal. Dichas crecidas provocan la infiltración de agua superficial hacia los acuíferos subterráneos, generando una agitación en las napas freáticas. Como consecuencia, se produce la re-suspensión de metales pesados de origen natural que se encontraban decantados en el subsuelo, lo que eleva los niveles de estos metales y metaloides en el agua extraída para consumo humano.

Esta situación ha representado un desafío constante para la empresa Aguas del Altiplano, encargada del tratamiento del recurso hídrico en la zona. Para enfrentar esta problemática, se implementaron procesos avanzados como la filtración, la descoagulación y principalmente, la ósmosis inversa. Estos métodos permiten tratar y mitigar la presencia natural de algunos metales y metaloides, como, por

ejemplo, el arsénico, previo al consumo humano a niveles de cumplimiento de la NCh409.

Es importante señalar que el agua para consumo humano (agua potable) cumple con los estándares normativos nacionales y estándares de calidad recomendados por la Organización Mundial de la Salud, por lo tanto, su consumo es seguro para la población.

4.4 Basurales y vertederos

En Arica, la disposición de residuos domiciliarios se realiza en el Vertedero de Quebrada Encantada. Actualmente, esta zona se ve afectada por microbasurales derivados de la ocupación ilegal en Cerro Chuño. El acceso al recinto se encuentra rodeado por focos informales de plásticos, escombros y desechos orgánicos. Estos microbasurales representan un riesgo sanitario latente, generando lixiviados, malos olores y emisiones contaminantes.

Paralelamente, la Región de Arica y Parinacota presenta una gestión de valorización que alcanza anualmente las 421,6 t de plásticos, 739 t de metales y 376,4 t de papel y cartón, entre otros materiales; sin embargo, cifras como las 0,4 t de residuos electrónicos evidencian una brecha pendiente en el reciclaje regional.

4.5 Demografía

Los indicadores siguientes fueron generados a partir de la información del Censo de Población y vivienda 2024 del INE. Se presenta la población desagregada según sexo y grandes grupos de edad, así como indicadores que dan cuenta tanto de la distribución territorial de la población activa laboralmente, como del envejecimiento poblacional: índice de masculinidad, índice de dependencia demográfica e índice de adultos mayores. En la Tabla 1 se resumen estos antecedentes a considerar.

Tabla 1: Antecedentes Población Arica

Región	Región de Arica y Parinacota
Hombres	120.381
Mujeres	124.188
Total	244.569
Población Infantil (0 a 14 años)	19,60%
Población en edad de trabajar (15 a 64 años)	67,60%
Adultos Mayores (65 años o más)	12,80%

Según esto la región de Arica tiene una población sensible para este estudio de niños y adultos mayores equivalente al 32,4% del total de su cuidadanos.

4.6 Clima

La Estación Meteorológica Chacalluta en Arica, ubicada en el aeropuerto de Arica, operada por la Dirección General Aeronáutica de Chile, monitorea un clima árido con precipitaciones anuales muy bajas, promediando apenas 1,8 mm, con registros máximos de 9,3 mm en 2002 y mínimos de 0,0 mm. Esta zona costera se caracteriza por su aridez. Esta estación es fundamental para medir las condiciones del desierto costero y las ráfagas de viento, que pueden alcanzar velocidades significativas, como los 50 km/h reportados en situaciones de alerta. La serie presenta una media anual de 1,8 mm, lo que refleja su régimen particular de precipitaciones. El valor máximo registrado fue de 9,3 mm en 2002, mientras que el mínimo alcanzó los 0,0 mm en 1984. En el año más reciente de la serie, 2023, se registraron 1,5 mm, lo que aporta una referencia actual al comportamiento de la estación. Esta serie muestra una tendencia en aumento en los valores de agua caída (mm).

5 Alcances del Estudio de Riesgo a la Salud de la población

5.1 Aspectos generales

1. La evaluación de riesgo a la salud de la población se realizó para el área polígono de intervención, que consideró 3 subsectores: Puerto- Maestranza-Industriales y Sector F (juntos) con datos de significancia estadística, sin considerar los puntos hotspot de la zona de Arica perimetral (HP-MR) por estar excluidos del polígono de intervención. Respecto al “sitio F de origen” (SF-MR), se demostró en estudios anteriores y en el presente, que no existe presencia del pasivo ambiental que dio origen a la Ley N° 20.590, ni tampoco se evidencia contaminación en el área. Adicionalmente, cabe considerar que en dicho sitio corresponde a un sector de uso industrial, en el cual no existe población residente.
2. El análisis consideró indicadores y factores de exposición para cada zona de uso de suelo residencial con sitios pavimentados.
3. El plan de muestreo consideró 16 subsectores que se muestran en la Figura 1 para el estudio realizado, pero para el análisis de riesgo a la salud de la población solo se consideraron las muestras asociadas a los 14 subsectores incluidos en la Ley 20590, que se muestran en la Tabla 2 y gráficamente en la Figura 2.

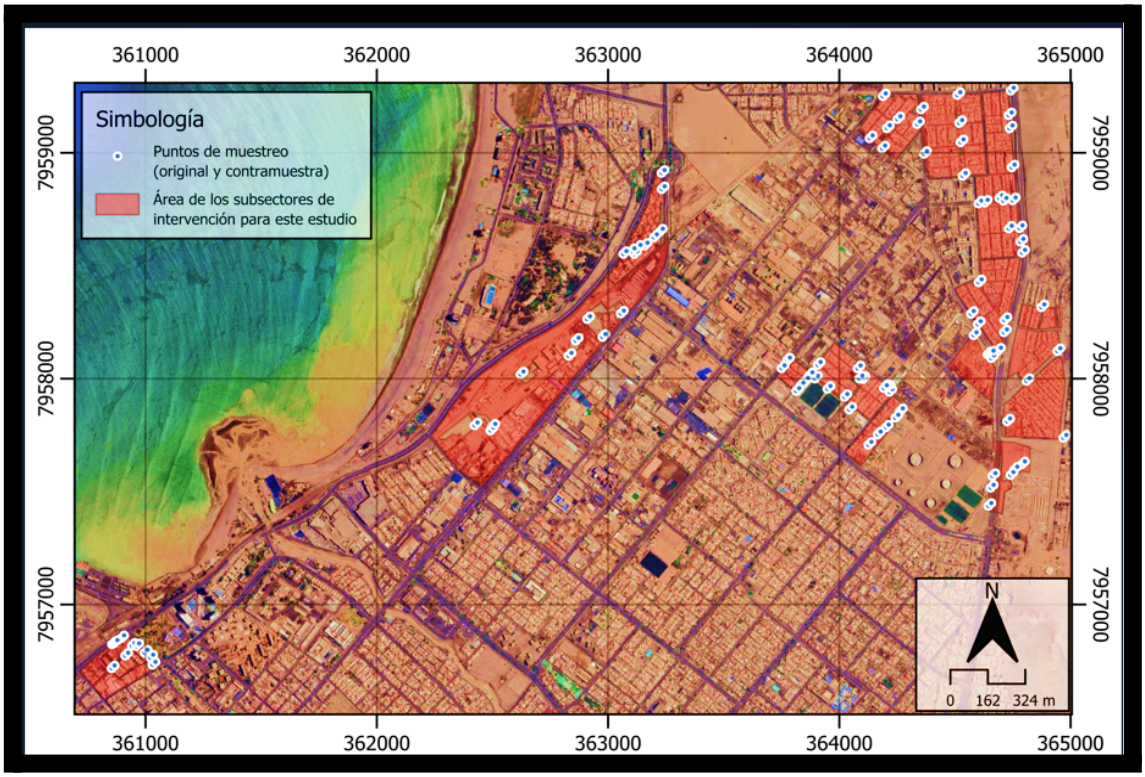


Figura 1: Esquema de los 16 subsectores estudiados en el estudio

Tabla 2: Subsectores para análisis de riesgo

Sector	Subsector
Puerto	Centro
	Prat
Maestranza	Zona Industrial
	Chinchorro alto
Los Industriales-Sector F	Los Industriales 0
	Los Industriales I
	Los Industriales II
	Los Industriales III
	Los Industriales IV
	Cerro Chuño
	Sica-Sica
	Huamachuco I y II
	Villa Araucanía
	Alborada

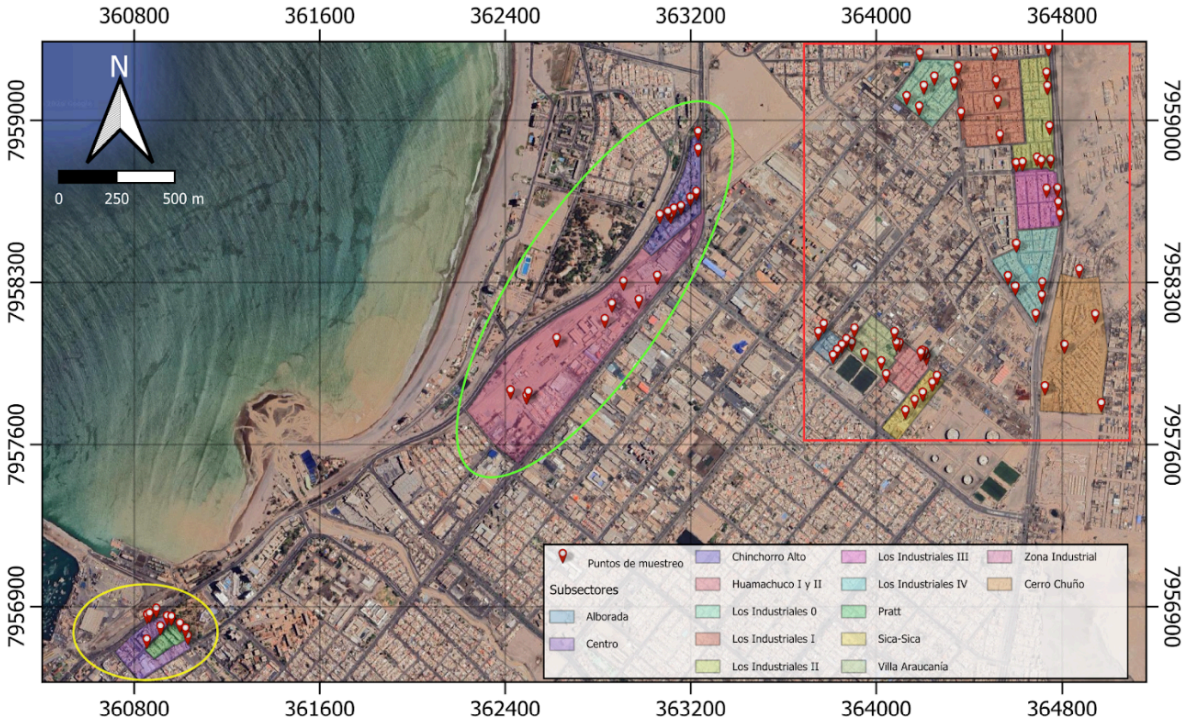


Figura 2: Esquema de los subsectores del polígono intervención para estudio de riesgo: sector Puerto en amarillo, sector Maestranza en verde y sector F o industrial en rojo

4. El estudio de riesgo realizado tuvo foco en evaluar la exposición de los vecinos a los polimetales y su impacto en su salud, por lo tanto, para esto se requirió un plan de muestreo (Ver Anexo 8.1) adecuado al modelo de riesgo que incluyó:

a. Análisis de muestras compuestas o representativas por cada subsector.
b. Obtención de muestras puntuales a nivel superficial y de subsuelo.
c. Las muestras representativas fueron preparadas a partir de al menos 5 muestras individuales y la mayoría de ellas a partir de 9 en cada subsector.
d. Todas las muestras puntales y representativas tuvieron una contramuestra.
e. La preparación de las muestras representativas o composites por cada subsector, se obtuvieron mezclando de forma homogénea todas las fracciones "fondo" (tamaño inferior a 250 micrómetros, es decir, inferior a

malla serie Tyler 60) de las muestras pertenecientes a un mismo sector. Estas muestras consolidadas fueron almacenadas en tarros de 500-650 gramos, debidamente etiquetados y sanitizados. Adicionalmente, se preparó una cápsula de cada muestra representativa para futuros análisis. La preparación de muestras representativas, se obtuvieron mediante la mezcla y homogenización de todas las muestras del fondo del tamiz pertenecientes a un mismo sector. Es decir, si un sector contaba con cinco muestras individuales, estas se mezclaron entre sí para conformar una única muestra representativa de dicho sector.

5. Las principales conclusiones del estado del arte que se consideraron fueron: i) Desde el punto de vista geoquímico, toxicidad y el riesgo ambiental de los elementos en estudio (arsénico, plomo, cromo, cadmio y mercurio) no dependen exclusivamente de su concentración total, sino de su forma química, movilidad y fracción potencialmente disponible para los organismos. Estos procesos son los que controlan la bioaccesibilidad del contaminante y explican la variabilidad observada en su biodisponibilidad, lo que justifica el uso de enfoques basados en fracciones bioaccesibles en la evaluación de riesgo. Por lo tanto, no toda la concentración total es ambientalmente relevante, ya que la bioaccesibilidad depende de la especiación química que controla: la movilidad, la solubilidad, la absorción biológica, fase mineral y finalmente la fracción “disponible” es la que determina el riesgo real; ii) La bioaccesibilidad gastrointestinal fue más elevada, cuando el arsénico está asociado a los óxidos de hierro y es inferior cuando el arsénico está combinado con sulfuros o pirita; iii) La bioaccesibilidad para el caso del plomo cuando está como carbonatado es más elevada y diferente al plomo adsorbido, esto justifica por qué dos suelos con igual concentración total mg/kg tuvieron distinto riesgo.

6. Se tomó la *«Pauta de evaluación de medios ambientales» EMEG*, por sus siglas en inglés) para identificar contaminantes críticos. El EMEG es la

concentración de un contaminante en el agua, el suelo o el aire, que es poco probable esté asociada con cualquier riesgo apreciable de efectos deletéreos no cancerosos, durante una duración de exposición determinada. El EMEG se deriva usando los niveles de riesgo mínimo de la *ATSDR*, tomando en cuenta los pesos corporales y tasas de ingesta, ambos por defecto.

7. Se consideraron solo los resultados de concentraciones totales y bioaccesibles obtenidas para las muestras y contramuestras representativas por ICP-OES e ICPMS ya que tienen significancia estadística, precisión y calidad, como datos válidos para hacer el estudio de riesgo a la salud de la población.

8. Se utilizó el software estadístico ProUCL versión 5.2 que es la última actualización del paquete de software estadístico ProUCL de la EPA para el análisis de conjuntos de datos ambientales con y sin observaciones no detectadas (ND). ProUCL versión 5.2 es un completo paquete de software estadístico con métodos estadísticos y herramientas gráficas para abordar diversos problemas de muestreo ambiental y estadístico. Esta versión 5.2 es la última versión del software actualizado para incluir mejoras en la Guía Técnica y la Guía del Usuario para mayor claridad, actualizaciones de código para corregir errores reportados y varios cambios en la lógica de decisión para la recomendación de UCL para esta versión.

9. Se incluyó el enfoque actual del uso de la variable ambiental de bioaccesibilidad como un proxy de la biodisponibilidad relativa incorporada en las ecuaciones para el cálculo de las dosis de exposición (RBA).

10. Se incluyó el análisis de dos vías de exposición completas la dérmica e ingesta oral. No se tenían antecedentes o datos para incluir la vía de inhalación respiratoria y estaba fuera del alcance del estudio solicitado en el Convenio firmado.

5.2 Bioaccesibilidad y Biodisponibilidad Relativa en la Evaluación de Riesgo para metales pesados y metaloides en el suelo

Conceptualmente, la biodisponibilidad integra la solubilización del contaminante en el sistema salival, tubo digestivo y tracto gastrointestinal (bioaccesibilidad), transporte del contaminante a través de la barrera gastrointestinal y la fracción metabolizada del contaminante antes de la transmisión a la circulación sistémica. La bioaccesibilidad es la fracción de contaminante extraída en solución por los fluidos digestivos del sistema salival y sistema gastrointestinal.

El método utilizado en el presente estudio corresponde al Método Unificado de Bioaccesibilidad (*Unified BARGE Method*, UBM), desarrollado por el grupo europeo de investigación BARGE (*BioAccessibility Research Group of Europe*). BARGE es un consorcio científico europeo conformado por investigadores e instituciones especializadas en contaminación de suelos, cuyo objetivo fue desarrollar y armonizar metodologías para determinar la bioaccesibilidad de contaminantes inorgánicos e incorporar este parámetro en las evaluaciones de riesgo para la salud humana. Como resultado de este trabajo colaborativo, el consorcio desarrolló el Método Unificado de Bioaccesibilidad (UBM), un ensayo estandarizado de laboratorio (*in vitro*) que simula las principales condiciones fisicoquímicas del sistema digestivo humano mediante el empleo de fluidos digestivos sintéticos (saliva, jugo gástrico, fluido duodenal y bilis), con el propósito de estimar la fracción de un contaminante potencialmente disponible para ser absorbida tras la ingestión accidental de suelo, polvo u otras matrices sólidas contaminadas. El UBM corresponde a un método *in vitro* cuya capacidad predictiva fue validada mediante comparación con estudios de biodisponibilidad *in vivo*, lo que respalda su aplicación en la evaluación cuantitativa del riesgo para la

salud humana. El desarrollo del UBM se basó en la integración del método originalmente desarrollado por el Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente de los Países Bajos (RIVM) (Oomen et al., 2003) con los procedimientos desarrollados por el consorcio BARGE. Posteriormente, el método fue perfeccionado mediante modificaciones destinadas a mejorar su representatividad fisiológica, reproducibilidad, robustez y aplicabilidad a distintos tipos de suelos y condiciones geológicas, manteniendo un enfoque conservador para la evaluación de la exposición humana. La reproducibilidad y confiabilidad del método fueron evaluadas mediante un amplio ensayo interlaboratorio internacional (*Inter-laboratory Trial of a Unified Bioaccessibility Testing Procedure*) (Wragg et al., 2009), en el que participaron diversos laboratorios europeos. Este estudio demostró que el procedimiento podía aplicarse de manera reproducible y armonizada entre diferentes laboratorios, constituyendo uno de los principales antecedentes técnicos para el posterior desarrollo de la Norma Internacional ISO 17924, la cual establece el procedimiento para la determinación de la bioaccesibilidad de elementos en suelos mediante el ensayo fisiológicamente basado UBM.

La evaluación de riesgo por ingestión de suelos contaminados con metales y metaloides, tradicionalmente se ha basado usando las concentraciones totales. Sin embargo, desde un punto de vista geoquímico y toxicológico, la concentración total no representa adecuadamente la fracción del contaminante que puede ser efectivamente absorbida por el organismo humano. La movilidad, especiación química y forma de asociación del metal con las fases del suelo son las que controlan su liberación durante la digestión y posterior absorción sistémica. La bioaccesibilidad gastrointestinal corresponde a la fracción del metal que se solubiliza bajo condiciones simuladas del tracto digestivo humano y representa el potencial de absorción. Diversos métodos in vitro, tales como UBM, SBRC y PBET, fueron desarrollados para este fin y son ampliamente utilizados en evaluaciones de riesgo humano por ingestión accidental de suelo (comportamiento

de llevarse objetos a la boca donde las tasas de ingestión de tierra o polvo explican la ingestión accidental de estos, especialmente en niños). El estudio tomó de referencia los factores de exposición actualizados por la Agencia de protección ambiental norteamericana (EPA, 2017) para el caso de ingesta de suelos y polvo, incluyendo la ingesta accidental o involuntaria, sino que además como resultado indirecto por hacer otra actividad.

La biodisponibilidad relativa (RBA), corresponde a la fracción del metal que es efectivamente absorbida en el organismo, en comparación con una forma soluble de referencia. La RBA integra no solo la disolución gastrointestinal, sino también los procesos de absorción intestinal y metabolismo, constituyendo el parámetro más representativo de la exposición interna real.

Para arsénico y plomo, numerosos estudios han demostrado que la biodisponibilidad relativa varía ampliamente entre suelos y que el uso de concentraciones totales tiende a sobreestimar el riesgo. Estudios internacionales han establecido una relación empírica robusta entre bioaccesibilidad gastrointestinal y la biodisponibilidad relativa (RBA), particularmente para el arsénico mediante métodos como SBRC-G y UBM-GI, los cuales han demostrado capacidad predictiva consistente frente a datos in vivo. En este contexto, la bioaccesibilidad gastrointestinal puede emplearse como un proxy técnicamente válido de la biodisponibilidad relativa para el arsénico y la bioaccesibilidad gástrica para el plomo, siempre que se utilice dentro de un marco de evaluación de riesgo y con métodos previamente validados. Este enfoque se encuentra alineado con las mejores prácticas internacionales y permite reducir la incertidumbre y evitar la sobreestimación del riesgo asociada al uso exclusivo de concentraciones totales.

La evidencia científica demuestra que, para el arsénico y el plomo, la bioaccesibilidad gastrointestinal medida por medio de métodos validados (UBM-GI / SBRC-G) constituye un proxy técnicamente válido de la biodisponibilidad relativa,

permitiendo una evaluación de riesgo más realista como sugieren las Agencias de Protección Internacionales de Estados Unidos, Australia y Canadá. En el caso del ser humano la liberación de la fracción bioaccesible ocurre en el espacio gastrointestinal, en el proceso de la digestión, quedando potencialmente disponible para absorción intestinal. El estudio de Meunier y colaboradores (2010), relaciona la bioaccesibilidad del arsénico con la composición del suelo y la mineralogía de relaves mineros. Los resultados mostraron que el 0,1- 49% del total es bioaccesible, presentando una baja correlación con el arsénico total. La mayor bioaccesibilidad se relaciona con el arseniato de calcio (49%) y la más baja con la presencia de arsenopirita. Para la evaluación cuantitativa de riesgo en suelos contaminados, la principal vía de exposición es la ingesta de suelo y polvo, por lo cual justifica su incorporación en la metodología de evaluación. La EPA (2011) y la ATSDR (2005) sugieren incluir los valores de la bioaccesibilidad en el estudio de riesgo experimentales cuando se disponen de ellos y es lo que se incorpora en el presente estudio.

5.3 Caracterización de la Peligrosidad

El análisis del riesgo incluyó los 5 elementos establecidos en la Ley 20590: plomo, arsénico, cromo, cadmio y mercurio. Para ello se caracterizó por ICP-Óptico las concentraciones totales, por ICPMS la concentración bioaccesible, según detalle de las Actividades 3 y 4 del Informe de avance III y su peligrosidad mediante un análisis de toxicidad intrínseca.

5.3.1 Criterios de selección de contaminantes:

Se realizó un análisis toxicológico para definir la peligrosidad de los elementos en estudio y se calcularon los EMEG del suelo usando los factores de dosis de referencia recomendados por la ATSDR (ATSDR, 2005; EPA 2024), para identificar los elementos que se incorporan en el estudio detallado de riesgo.

La Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC) tienen la siguiente clasificación de carcinogénicos (Smoke, 2004):

Grupo 1: El agente es cancerígeno para los humanos.

Grupo 2A: El agente es probablemente cancerígeno para los humanos.

Grupo 2B: El agente es posiblemente cancerígeno para los humanos.

Grupo 3: El agente no es clasificable en cuanto a su carcinogenicidad en humanos.

Grupo 4: El agente no es probablemente cancerígeno para los humanos.

Como el plomo no tiene un criterio de toxicidad, se evaluó mediante el uso de la cuantificación del biomarcador de concentración de plomo en sangre aplicando el

modelo IEUBK, de acuerdo con lo recomendado por la USEPA. Este modelo y software, fue desarrollado por la USEPA (EPA, 2007) y permite estimar el riesgo de que un niño o una población de niños puedan exceder el nivel de preocupación sobre 5 µg/dL ambiental (OMS, 2021).

Tabla 3: Análisis toxicológico de analitos carcinogénicos: arsénico, cromo VI, mercurio (sales) y cadmio

Contaminantes	Clasificación	Concentración de Referencia Oral, Efecto Inhalación Crónico RfD oral (mg/kg/día)	Factor de Pendiente Cancerígeno por vía oral SF mg/(kg-día)	Riesgo Unitario cancerígeno por inhalación IUR (µg/m^3)	Contacto dermal RfD_{ABS} (mg/kg-día)
Arsénico	1A carcinogénico	3,00E-04	1,50	4,300E-03	3,000E-02
Cromo VI	1A carcinogénico	3,00E-03	0,50	1,200E-02	2,500E-02
Mercurio (sales)	C carcinogénico en estudio por vía oral	3,00E-04	-	3,000E-05	1,000E-02
Cadmio	1 B carcinogénico	1,00E-03	-	1,800E-03	1,000E-02

Tabla 4: Análisis toxicológico para analito mutagénico: plomo

Plomo	Clasificación: B2 mutagénicos	Modelo IEUBK, EPA	<5 µg/dL

5.3.2 Evaluación de Medios Ambientales: EMEG

La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, por sus siglas en inglés Agency for Toxic Substances and Disease Registry") desarrolló la Guía de Evaluación de Medios Ambientales, denominada EMEG (por su sigla en inglés "Environmental Media Evaluation Guides), aplicables a matrices ambientales como suelo, aire y agua. Los EMEG corresponden a concentraciones de contaminantes en un medio ambiental por debajo de las cuales no se espera la ocurrencia de efectos adversos no cancerígenos, considerando escenarios de exposición específicos (ATSDR, 2005; 2016).

Estos valores se derivan a partir de los niveles de riesgo mínimo (o MRL, por sus siglas en inglés, Minimal Risk Levels), incorporando supuestos estándar de exposición, tales como peso corporal, tasas de ingesta y frecuencia/duración de exposición. Los EMEG se establecen diferenciadamente para exposiciones agudas (<14 días), intermedias (15–364 días) y crónicas (≥365 días) (ATSDR, 2005; ATSDR, 2016).

Por su parte, las Guías de evaluación de medios basadas en el riesgo (RMEG por sus siglas en inglés, Risk-based Media Evaluation Guides) corresponden a concentraciones ambientales derivadas a partir de la dosis de referencia (RfD), integrando parámetros de exposición por defecto, como peso corporal y tasas de ingesta, con el fin de evaluar el riesgo no cancerígeno en distintos medios ambientales (ATSDR, 2016).

En el presente estudio se usaron valores de dosis de referencia (RfD) obtenidos de la Agencia de Protección ambiental norteamericana (EPA,2024) específicamente de las bases de datos toxicológicas del sistema IRIS (base de datos científica desarrollada por la EPA por sus siglas en ingles "Integrated Risk Information System"), el cual compila valores toxicológicos derivados mediante

metodologías estandarizadas para la evaluación de riesgo no cancerígeno (EPA, 2024). En particular, se considera la RfD crónica por vía oral, definida como una estimación de la exposición diaria continua a largo plazo (≥365 días), bajo la cual no se esperan efectos adversos no cancerígenos en la población humana, incluyendo subgrupos sensibles (EPA, 2002; EPA, 2024).

Del estudio realizado en Arica, se seleccionó al plomo y arsénico para su evaluación detallada de riesgo detallada por ser analitos de preocupación social y haberse detectado y cuantificado fracciones bioaccesible de ellos, en todos los sitios estudiados del polígono de intervención, lo que fue posible hacer el estudio incluyendo la bioaccesibilidad. En el caso del mercurio (Hg), cadmio (Cd) y cromo (Cr), las concentraciones promedio detectadas se encuentran por debajo de los valores EMEG establecidos para población infantil y adulta, lo que sugirió una baja probabilidad de efectos adversos bajo los escenarios de exposición evaluados.

Adicionalmente, se verificó experimentalmente que las concentraciones bioaccesibles para estos tres elementos en los sitios estudiados (mercurio bioaccesible ~ 0 , cadmio bioaccesible ~ 0,165 ppm y cromo bioaccesible ~ 2, ppm), que corresponden a la corrección de la concentración de exposición real, no son de interés ambiental para su evaluación detallada.

La ecuación usada para el cálculo del EMEG se detalla a continuación:

$$EMEG\ (ssuelo) = \frac{RfD\left(\frac{mg}{kg-dia}\right)*PC\ (Kg)}{TI(\frac{Kg\ ó\ Lt}{dia})}$$

Los datos para su cálculo se muestran en la Tabla 5 , el peso (PC) considerado para adultos es de 80 Kg y los niños 20,6 Kg, valores promedio de los residentes de la comuna de Arica, informados en el último CENSO del año 2024 (*Censo Población y Vivienda 2024, INE)* disponible en el sitio público de datos regionales

de la biblioteca central, del “Informe de patrones de crecimiento” (MINSAL, 2018a) monitoreados por el MINSAL y del informe de “Encuesta Nacional de Salud 2016–2017” (MINSAL, 2018 b) que reportó pesos corporales promedio de 79,7 kg en hombres y 70,8 kg en mujeres adultas. Asimismo, la evidencia epidemiológica indicó que el peso corporal por sobrepeso, obesidad y circunferencia de cintura aumentan con la edad, alcanzando su mayor prevalencia en los grupos de 45 a 64 años, lo que sugirió una mayor masa corporal en estos segmentos poblacionales. Considerando lo anterior, y en concordancia con un enfoque conservador de evaluación de riesgo, se adoptó un peso corporal representativo de 80 kg para población adulta, valor que se encuentra alineado con la evidencia nacional y dentro del rango utilizado en evaluaciones internacionales, permitiendo una estimación protectora de la dosis sin subestimar la exposición.

Tabla 5: Datos para cálculo del EMEG en suelo

Factor de Exposición	Nomenclatura	Adulto	Niños
Peso corporal (Censo Arica 2024)	P (Kg)	80	20,5
Tasa de ingestión accidental de polvo contaminado (mg/día) EPA, 2011	TI	100	200
Edad	(años)	45-64	6

Tabla 6: Resultados del EMEG en suelo por metal o metaloide

Analito en Estudio	Concentración Total promedio (mg/Kg)	Concentración de Referencia Oral RfD (mg/kg-día)	EMEG (mg /Kg) niños, exposición carcinogénica residencial	EMEG (mg /Kg) adultos, exposición carcinogénica residencial	Valor porcentual (C_{total}/C_{emeg}) niños
Arsénico	12,92	3,00E-04	31	240	
Cadmio	2	1,00E-03	103	800	2%
Mercurio	0,0458	3,00E-04	31	240	0,1%
Cromo VI	16,79	3,00E-03	308	2.400	5%

Para su cálculo, se consideró un escenario conservador, donde se toman los efectos del cromo y mercurio como si fuesen cromo hexavalente y sales de mercurio al 100% y las tasas de ingestas más desfavorables. De acuerdo con la *Tabla 6*, los resultados indicaron que las concentraciones de mercurio (Hg), cadmio (Cd) y cromo (Cr) se encuentran por debajo de los valores EMEG definidos tanto para la población infantil como la adulta, lo que permitió descartar preliminarmente la ocurrencia de efectos adversos no cancerígenos asociados a estos elementos en las condiciones evaluadas. En este contexto, los valores de concentraciones totales dieron por debajo del 5% en relación con la concentración EMEG estimada de posible riesgo, para estos tres casos, verificando que no son de interés ambiental.

En el caso del plomo (Pb) su consideración para la evaluación cuantitativa detallada corresponde al riesgo en la población infantil, debido a sus efectos neurotóxicos. En el caso del arsénico (As) su consideración para la evaluación cuantitativa detallada, aunque sus concentraciones no excedían los valores EMEG, es que es un analito de preocupación social y por obtenerse datos experimentales de bioaccesibilidad presentes en todos los subsectores de estudio y cuya presencia bioaccesible fue confirmada por los Laboratorios externos acreditados por ICPMS. Esto permitió estimar la concentración de exposición considerando su fracción más representativa de la dosis potencialmente absorbida, con el objetivo de disminuir la incertidumbre y fortalecer la robustez del análisis de riesgo.

6 Caracterización de la población expuesta Arica

6.1 Identificación de Zonas de Exposición

La población susceptible que se consideró para el estudio de riesgo fue según el área geográfica, específicamente para la población que vive dentro del polígono de intervención, según Ley 20590. Los datos considerados son los obtenidos del

análisis estadístico a través del software PROUCL, por ser datos de mejor significancia estadística. En la Tabla 7 se muestran los puntos considerados en el presente estudio de riesgo.

Tabla 7: Sectores geográficos considerados en estudio de riesgo

Sector	Subsector	Correlativo
Puerto	Centro	PC-MR
	Prat	PP-MR
Maestranza	Zona Industrial	PMZI-MR
	Chinchorro alto	PMCA-MR
Los Industriales-Sector F	Los Industriales 0	PLI0-MR
	Los Industriales I	PLI1-MR
	Los Industriales II	PLI2-MR
	Los Industriales III	PLI3-MR
	Los Industriales IV	PLI4-MR
	Cerro Chuño	CC-MR
	Sica-Sica	PSS-MR
	Huamachuco I y II	PH-MR
	Villa Araucanía	PVA-MR
	Alborada	AS-MR

Estos sitios se mostraron gráficamente en la Figura 2, y correspondieron a un área efectiva de aproximadamente 10 hectáreas cuyo uso destinado, por plan regulador, es residencial o recreacional. El área total del polígono de intervención es de cerca de 100.000 m^2, por tanto, su reducción ha sido aproximadamente del 90% al año 2025.

A continuación, se muestran gráficamente los mapas donde se detallan los sitios y las muestras georreferenciadas de cada subsector de estudio. El sector Puerto, con sus subsectores Centro (PC) y Puerto (PP) se observan en la Figura 3, el sector Maestranza, con sus subsectores Chinchorro Alto (PMCA) y Zona Industrial (PMZI) en la Figura 4, el Sector F con sus subsectores Alborada (AS), Huamachuco I y II (PH), Sica-Sica (PSS) y Villa Araucanía (PVA) en la Figura 5 ,

el Sector F, con sus subsectores Los Industriales 0 (PLI-0), Los Industriales I (PLI-I) y Los Industriales II (PLI-II) en la Figura 6 y finalmente el Sector F, con los subsectores Los Industriales III (PLI-III) y Los Industriales IV (PLI-IV) en la Figura 7.

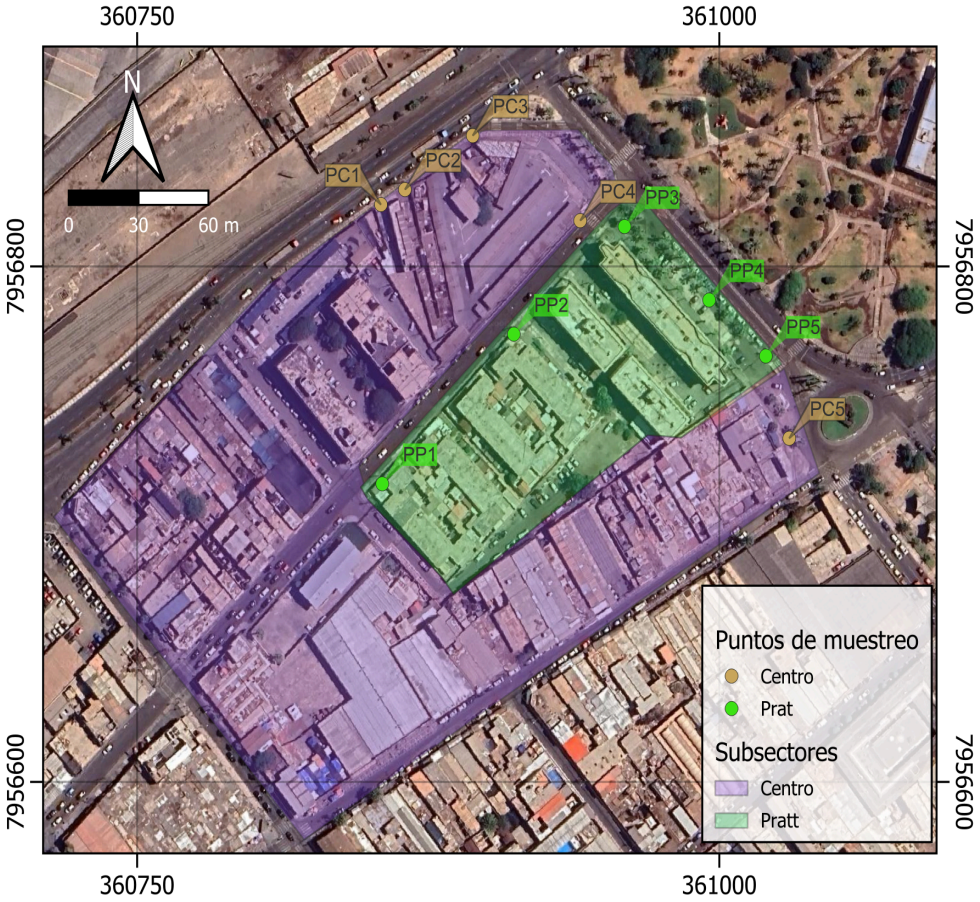


Figura 3:Mapa ubicación del sector Puerto, con sus subsectores Centro (PC) y Puerto (PP), con sus puntos de muestreo en terreno.

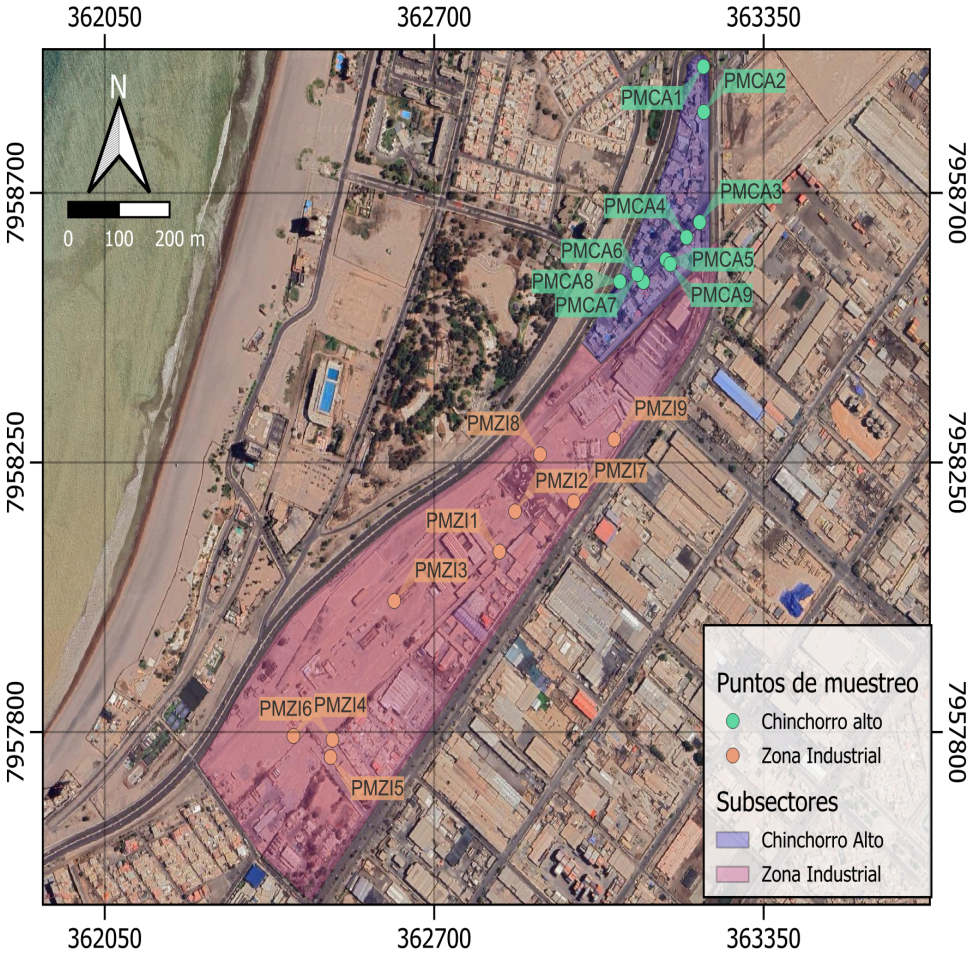


Figura 4:Mapa ubicación del sector Maestranza, con sus subsectores Chinchorro Alto (PMCA) y Zona Industrial (PMZI), con sus puntos de muestreo en terreno.

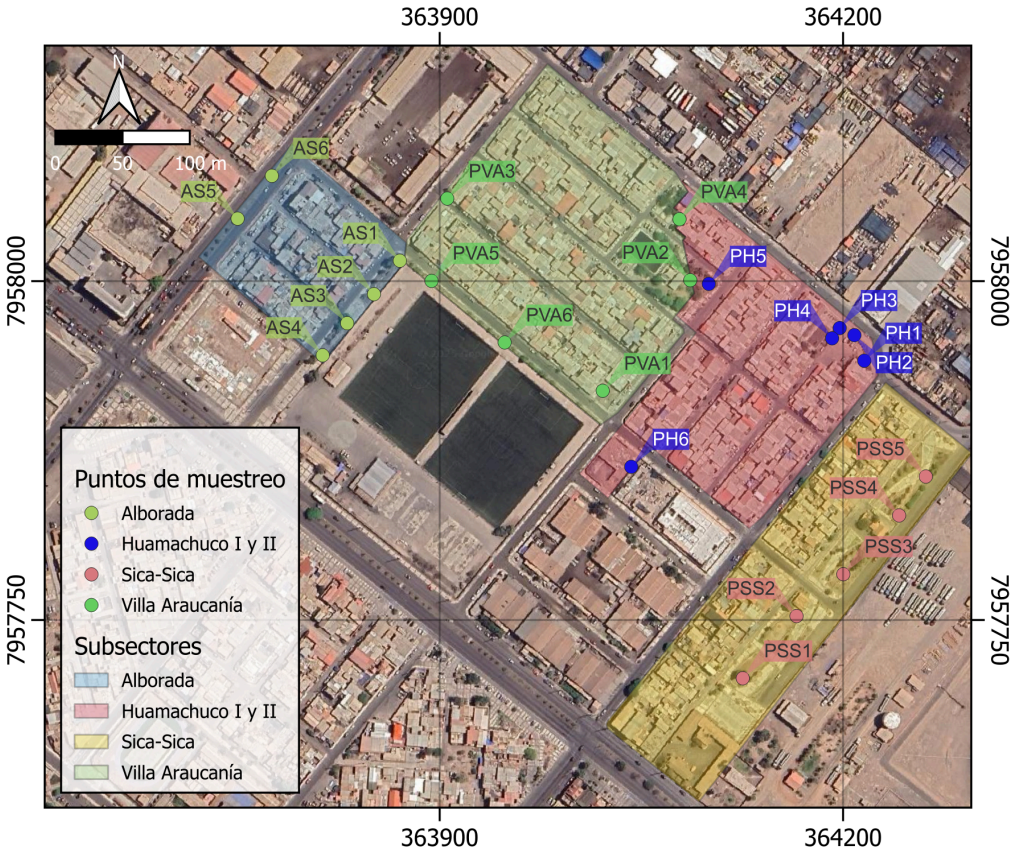


Figura 5:Mapa ubicación de Sector F, con sus subsectores Alborada (AS), Huamachuco I y II (PH), Sica-Sica (PSS) y Villa Araucanía (PVA), con sus puntos de muestreo en terreno.

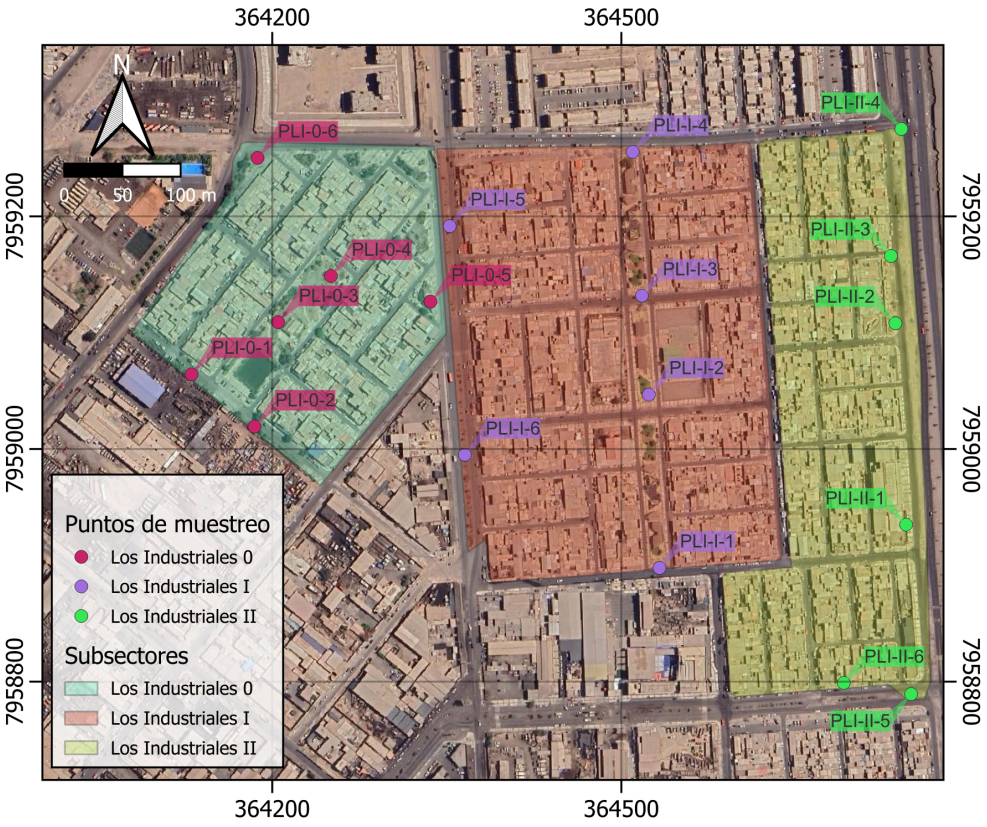


Figura 6:Mapa ubicación de Sector F, con sus subsectores Los Industriales 0 (PLI-0), Los Industriales I (PLI-I) y Los Industriales (PLI-II), con sus puntos de muestreo en terreno.

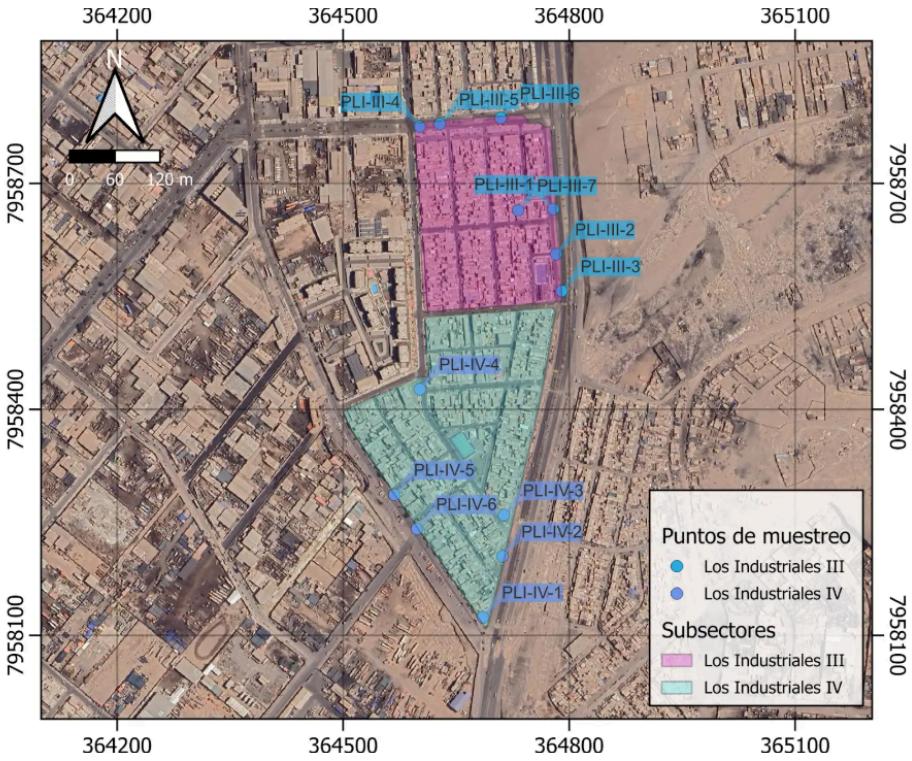


Figura 7:Mapa ubicación de Sector F, con sus subsectores Los Industriales III (PLI-III), Los Industriales IV (PLI-IV), con sus puntos de muestreo en terreno.

Los puntos muestreados del sitio F para el estudio de riesgo, se seleccionaron considerando que fue objeto de un proceso de remediación iniciado en el año 1998 y finalizado en 2001, antecedentes que se encuentran debidamente documentados y fueron entregados al Primer Tribunal Ambiental. Asimismo, según los estudios ambientales realizados por el Ministerio del Medio Ambiente entre 2012 y 2025, se determinó que las medidas de remediación implementadas entre 1998 y 2001 fueron efectivas, dado que no se observan residuos del pasivo ambiental que originó la Ley 20.590. Además, los resultados de estos estudios muestran que la situación de contaminación en el área de intervención se encuentra controlada. Adicionalmente, cabe considerar que el sitio F corresponde a un sector de uso industrial, en el cual no existe población residente. En consecuencia, la evaluación de riesgos se centra en los sitios aledaños, con el

objetivo de evaluar adecuadamente el riesgo para la población que aun habita en dichos sectores.

Los puntos muestreados y estudiados como hotspots que se consideraron para el presente estudio no corresponden a los considerados en el estudio realizado por el CITUC en el año 2021, por tanto, no fue posible hacer un análisis comparativo entre ellos.

Desde una perspectiva técnica las modificaciones que se efectuaron, respondieron a criterios legítimos de seguridad del personal en terreno, especialmente relevantes en contextos urbanos complejos, no comprometen la representatividad ni la calidad de los datos obtenidos, se enmarcan en prácticas aceptadas de muestreo adaptativo en estudios ambientales y se mantiene coherencia con el objetivo general del proyecto, orientado a evaluar la exposición a polimetales bajo las condiciones actuales y reales de la comuna de Arica con énfasis en la salud de las personas. Por lo tanto, el proceso de ajuste progresivo del plan de muestreo, desde su definición inicial hasta la campaña final, constituyó un procedimiento técnicamente justificado, documentado y aprobado, que fortalece la robustez del estudio.

6.2 Justificación técnica de las modificaciones al plan de muestreo de Hotspots

Los ajustes realizados al plan de muestreo de *hotspots* para la evaluación de concentraciones de metales (As, Cd, Cr, Pb y Hg) presentes en suelos de la comuna de Arica, tuvo un enfoque progresivo, combinando análisis preliminar, validación en terreno y ajustes operacionales, en concordancia con la Ley 20.590 y criterios de seguridad en estudios ambientales. Inicialmente, los puntos de muestreo fueron definidos en enero de 2025 en base a antecedentes históricos de

contaminación, análisis espacial y criterios de exposición potencial. Estos puntos tenían carácter exploratorio y estaban sujetos a validación en terreno.

Durante la etapa de pre-terreno (marzo 2025), se identificaron limitaciones relevantes, especialmente en el sector Quebrada Encantada, donde condiciones de inseguridad pública impedían realizar el muestreo de forma segura. Por esta razón, se decidió excluir este sector y relocalizar los puntos en áreas equivalentes en términos de exposición, priorizando la seguridad del equipo sin afectar los objetivos del estudio. Además, se identificó la necesidad de monitorear sectores aguas abajo de los residuos de Promel para futuros análisis de exposición. Finalmente, en la campaña de muestreo (mayo 2025), se realizaron ajustes menores debido a cambios en el uso del suelo (ej. pavimentación o áreas recreativas), lo que impidió la toma de muestras en algunos puntos. Estos fueron reubicados dentro del mismo entorno para mantener la representatividad espacial y evitar sesgos. En la Figura 8 se muestran los puntos incluidos y con sus resultados se analizó el riesgo especifico, que se encuentra detallado en extenso en el punto 11 del presente informe.

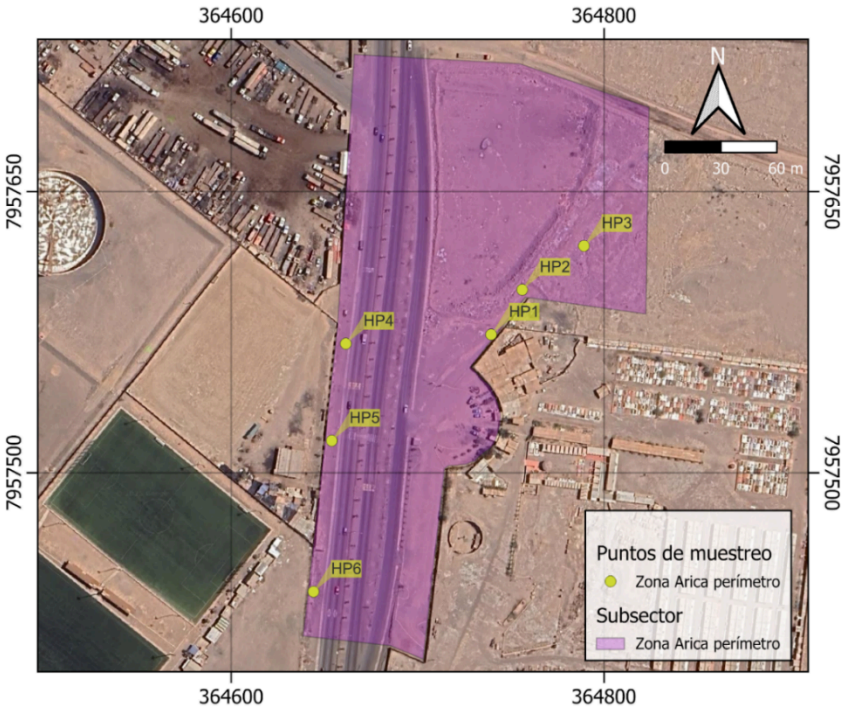


Figura 8: Muestreo final de *hotspots* – mayo de 2025

6.3 **Caracterización de la fuente de exposición**

Mediante el uso del software ProUCL, versión 5.2, se consideraron los resultados obtenidos de las muestras, contramuestras y repeticiones o valores outlier y aquellas informadas por Laboratorio bajo límite de detección obtenidas por ICPMS e ICP Óptico. En La Tabla *8* se muestran las concentraciones promedio totales y bioaccesibles para cada metal del polígono de intervención como una única fuente principal de exposición (punto de exposición). Con estos antecedentes se calculó la bioaccesibilidad gástrica y gastrointestinal y se determinó la más alta como fase control para incluir dicho valor como % de bioaccesibilidad (proxy del RBA) en el estudio de riesgo. El cálculo detallado de la concentración total y bioaccesible consideró las recomendaciones de acuerdo con el árbol de decisión del software. Sin embargo, en aquellos casos donde el análisis estadístico no consideró los aspectos físicos y termodinámicos, como es el caso del plomo por su alta dispersión y efectos “nugget”, se privilegió el análisis estadístico del “Test de student”.

Tabla 8: Concentraciones totales y bioaccesibles y %Bioaccesibilidad del arsénico y plomo para el estudio de riesgo

Concentraciones Bioaccesibles	Concentración Promedio Polígono Arsénico (mg/Kg)	Concentración Promedio Polígono Plomo (mg/Kg)	Método Estadístico PRO UCL
Concentración Gástrica [mg/Kg]	9,87	48,85	KM H-Log-UCL (As); 95% Student´s-t UCL (Pb)
Concentración Gastrointestinal [mg/Kg]	10,3	11,65	95% Student´s-t UCL (As); 95% Student´s-t UCL (Pb)
Concentración Total [mg/Kg]	12,92	50,23	95% Student´s-t UCL
% Bioaccesibilidad Fase Control	80%	97%	

Tabla 9: Concentraciones totales y bioaccesibles y % Bioaccesibilidad del cadmio, mercurio y cromo.

Concentraciones Bioaccesible	Concentración Promedio Polígono Cadmio (mg/Kg)	Concentración Promedio Polígono Mercurio (mg/Kg)	Concentración Promedio Polígono Cromo (mg/Kg)	Método Estadístico PRO UCL
Concentración Gástrica [mg/Kg]	0	0	2,819	95 KM(t) UCL(Cd, Hg); 95% Adjustment Gamma UCL (Cr)
Concentración Gastrointestinal [mg/Kg]	0,165	0	0,531	95 KM(t) UCL (Cd, Hg, Cr)
Concentración Total [mg/Kg]	2,029	0,0458	16,79	95 KM(t) UCL (Cd, Hg); 95% Student´s-t UCL(Cr)
% Bioaccesibilidad Fase Control	**8%**	**0%**	**17%**	

De acuerdo con los resultados de la Tabla *9* , para el caso del cadmio, mercurio y cromo no se encontraron valores presentes de interés ambiental, se dejan fuera del estudio de riesgo detallado por sus bajos niveles de concentraciones totales y bioaccesibles detectadas en algunas muestras. Esto se validó posteriormente con el cálculo de la concentración que presenta riesgo crónico y carcinogénico, mediante el EMEG en suelo, tomado los factores recomendados por la ATSDR. En el Anexo 12, se incluyó una planilla en Excel con los detalles de los cálculos y los archivos en pdf como respaldos de los análisis desde el PROUCL obtenidos directamente para cada simulación. Los valores usados como datos ingresados al software fueron los obtenidos de los informes de SGS Mineral y SILOB Chile (Anexos 8.5 y 8.7 respectivamente).

Para el caso del cálculo del valor promedio bioaccesible de las concentraciones gástricas del plomo mediante ProUCL, éste indicó una alta asimetría y varianza (Coeficiente de Variación > 1), rechazando la normalidad. Bajo estas condiciones, el software recomendó usar el método (ej. métodos no paramétricos de

Chebyshev o Bootstrap BCA/t) que arrojaban Límites Superiores de Confianza (UCL), pero que excedían la concentración total en el sector (50,23 mg/Kg), reflejando una inconsistencia física. Utilizar una de estas estimaciones estadísticamente válidas resultaría no solo en una bioaccesibilidad superior al 100% sino que no considera el principio físico de conservación de masa. Por lo tanto, se decidió considerar un enfoque más conservador y físicamente coherente usando el valor promedio estimado por el 95% Student´s-t UCL. En este caso en particular, el "efecto nugget" de los datos en el plomo y el análisis de los "outlier" permitió darles a estos resultados una interpretación física y adecuada a los resultados para hacer un análisis ambiental y de riesgo adecuado.

La validez estadística entregada por el PROUCL de los datos experimentales se detalla en la Tabla 10 y Tabla 11 para los elementos de interés del estudio de riesgo, arsénico y plomo respectivamente. Esta base de datos que se generó fue de alta calidad considerando no solo sus indicadores estadísticos, sino que, además, porque se cumplió durante la ejecución del plan de muestreo con los protocolos de aseguramiento de calidad de las cadenas de custodia para las muestras y contramuestras en su caracterización total y bioaccesible.

Tabla 10: Estadígrafos para el arsénico para la fase gástrica y gastrointestinal

ARSÉNICO	Fase Gastrointestinal	Fase Gástrica	Concentración total
Número de datos	28	29	36
mínimo	4,326	3,572	5,8
máximo	23,11	17,13	19,5
SD (desviación estándar)	4,636	2,991	4,001
CV (coeficiente de variación)	0,526	0,44	0,339
media	8,806		11,8
mediana	7,505		11,6
desviación estándar de la media	0,876		0,667
asimetría	1,889		0,307
Promedio (95% Student´s-t UCL)	10,3		12,92
promedio (KM H--log UCL)		9,87	

Tabla 11: Estadígrafos para el plomo para la fase gástrica y gastrointestinal

PLOMO	Fase Gastrointestinal	Fase Gástrica	Concentración total
Número de datos	28	29	36
mínimo	2,556	3,205	3,1
Máximo	26,21	134,8	114,2
SD (desviación estándar)	6,66	38,25	33,72
CV (coeficiente de variación)	0,701	1,04	0,828
Media	9,509	36,76	40,73
mediana	8,455	16,3	23,4
desviación estándar de la media	1,259	7,103	5,62
asimetría	1,079	1,264	0,822
promedio (95% Student´s-t UCL)	11,65	48,85	50,23

6.4 **Rutas de Exposición**

Actualmente, no se identifican fuentes primarias activas de contaminación por polimetales dentro del polígono definido por la Ley N° 20.590 en la ciudad de Arica. No obstante, para el presente estudio, el componente ambiental de mayor relevancia continúa siendo el suelo, debido a la contaminación histórica asociada a la disposición de residuos con altos contenidos de metales por parte de PROMEL, que motivó las acciones de intervención y remediación ejecutadas en el sector.

En este contexto, el estudio realizado corresponde a un seguimiento ambiental de carácter preventivo, enfocado en un sector intervenido, con el objetivo de verificar que las condiciones actuales no representen un riesgo residual para la salud de la población.

Estos contaminantes también fueron transportados mediante material particulado grueso (MP10) y fino (MP2,5), incorporándose transitoriamente al aire, el cual actuó en ese período como una vía secundaria de dispersión, ampliando el área de influencia de la contaminación original.

Respecto al recurso hídrico, específicamente el agua potable, se determinó que los niveles de metales se encuentran dentro de los parámetros establecidos por la NCh 409, que regula la calidad del agua para consumo humano.

Las rutas de exposición (entendidas como los puntos de ingreso de los contaminantes al interior del organismo) están asociadas principalmente con tres funciones corpóreas:

a) ***Por la vía respiratoria:*** en el tracto respiratorio (nariz, boca, pulmones) el contaminante penetra la membrana que recubre los bronquios, entrando a la sangre. Por la vía respiratoria podrían ingresar el material particulado de tamaño mayor a 5 o 10 µm el que es retenido en la porción superior de la vía respiratoria y redirigidas al tracto gastrointestinal.
b) ***Por la vía oral:*** la sustancia atraviesa la pared gastrointestinal, principalmente en el estómago e intestinos desde el lumen al sistema porta. Mientras la sustancia se encuentre en el lumen del tracto gastrointestinal sin ser absorbido, no hay exposición. Por la vía oral puede ingresar material no consolidado movilizado como polvo o suelo, ingeridos de modo accidental.
c) ***Por la vía dérmica o piel***: la exposición por la superficie externa del organismo ocurre cuando la sustancia penetra la piel e ingresa a la circulación sanguínea. En el caso presente, se estimó que la piel podría ser afectada por contacto directo con el material no consolidado movilizado como polvo o con suelos.

Para el presente estudio, se incluyen tres vías de exposición completas: Ingestión (tracto digestivo, estómago, intestino), contacto dérmico (piel y ojos) e inhalación respiratoria de partículas resuspendidas. Por tanto, los receptores potenciales pueden verse expuestos a:

a) **Ingestión oral:** se asocia a la ingesta accidental de polvo o suelo presente en sitio al exterior e interior de las viviendas residenciales, en salas de clases, en zona de juegos, salas de juego donde los juguetes o cualquier lugar donde los receptores viven y pueden estar expuestos directos al suelo y polvo del polígono de intervención considerando que el uso es habitacional y recreacional
b) **Contacto dérmico:** puede tener lugar tanto en ambientes exteriores como interiores, dado que la totalidad de las viviendas en el sector del polígono corresponden a familias en sectores residenciales. Cualquier lugar donde se tenga contacto con polvo contaminado que pueda absorberse por la piel como poner las manos en el suelo, tocar objetos con polvo o llevarse a la boca las manos u objetos sucios. También se incluye el caso de los usuarios recreacionales, que pueden tomar contacto con partículas provenientes del suelo y polvo en el sitio directo.
c) **Inhalación respiratoria**: puede tener lugar tanto en ambientes exteriores como interiores o cualquier lugar donde se tenga contacto con polvo sedimentable (derivada de la matriz suelo). También incluye el polvo inhalable por re-suspensión del material sedimentable.

6.5 Modelo Conceptual de la Contaminación

El Modelo Conceptual del estudio de Contaminación incorpora la información acerca de la fuente de contaminación, sus mecanismos de liberación, transporte y migración medio ambiental, destino fisicoquímico del contaminante, y punto de exposición con diversos receptores hipotéticos, que se integran en un diagrama conocido como Modelo Conceptual del Problema de Contaminación (MCPC). Este modelo para el caso de Arica incluyó los siguientes aspectos multifactoriales como:

a. Uso actual y futuro del suelo (residencial, recreacional)
b. Tipo de receptores expuestos (población adulta e infantil).
c. Vías de exposición relevantes (ingestión accidental de suelo y polvo, contacto dérmico).
d. Actividades humanas que pueden generar contacto con suelos subsuperficiales (jardinería, juegos, excavaciones domésticas, obras de urbanización).
e. Historia de intervención y movimiento de tierras del polígono de intervención.
f. Distribución vertical del contaminante y su comportamiento geoquímico, esto específicamente se considera en la calicata y cuantificación de la bioaccesibilidad como un proxy de la biodisponibilidad relativa
g. Presencia de elementos carcinógenos, mutagénicos como el arsénico y plomo en todos los sectores en estudio.

En el caso de este estudio de suelos, se consideró que su uso es habitacional, recreacional y de vivienda, por tanto, las potenciales vías de exposición más significativas que constituían un riesgo para la salud humana es la exposición directa al suelo superficial, por ingestión accidental de suelo, contacto dérmico y polvo inhalable (re-suspensión), por lo que se incluyeron los valores experimentales de bioaccesibilidad para el cálculo de la concentración como dosis de exposición real, por ser un criterio precautorio para los niños.

Se consideraron además, todas las actividades humanas que pueden generar contacto con suelos subsuperficiales (jardinería, juegos, excavaciones domésticas, obras de urbanización), esto debido a los factores propios de la historia de contaminación de Arica donde los sitios del polígono de intervención serán y son de uso residencial y donde ha habido excavaciones y movimiento de tierras, por lo que aún podría haber intervenciones en profundidad desde los mismos residentes como, zonas de juegos, actividades de pavimentación y de cableado, entre otros. De los estudios e intervenciones realizados de remedición y pavimentación,

ejecutadas por MINVU detalladas en las resoluciones de calificación ambiental RCA 14/2013 y RCA 35/2014 y de los informes de la SMA (Res. Ex. N° 1/ Rol F-023-2019, Santiago, 27 junio 2019) destacó que hubo una reducción producto de las intervenciones que ha reducido el polígono en casi 83%, desde el inicio de la Ley, donde se informan cerca de 165 ha, a tener en la actualidad cerca de 10 ha disponibles para muestreo efectivo. En este oficio se instruye al Ministerio de Vivienda y Urbanismo que termine los procesos de remediación y recuperación de áreas verdes en el sector de origen de la contaminación proveniente de los residuos Promel. Por otra parte, también se consideró como evidencia significativa los estudios anteriores que validan la presencia de arsénico y plomo en el polígono de intervención. El modelo conceptual del problema de contaminación del caso del Estudio se muestra esquemáticamente en la Figura 9:

1. El suelo y polvo sedimentable corresponden a las dos matrices ambientales evaluadas en el modelo conceptual, esto en atención a que ruta de exposición es el camino desde la fuente del contaminante o matriz ambiental evaluada hasta el ingreso del contaminante al receptor, como muestra la figura 9.
2. Existe una ruta incompleta y no posible, que no se incluyó y no se evaluó porque corresponde al agua potable que es abastecida a la ciudad por una planta de tratamiento y que está bajo cumplimiento de la normativa ambiental vigente.
3. Los analitos que se incluyeron en la evaluación de riesgo detalladas son el plomo y arsénico, por sus adversos efectos en la salud, de acuerdo con los antecedentes experimentales expuestos. Se informaron sus efectos toxicológicos, valores límites ambientales recomendados para diversos usos de suelo y sus efectos adversos para las personas.
4. Se consideró una configuración geográfica correspondiente a una zona norte del país, marítima y de borde costero, con clima templado, lo que

genera una circulación local de vientos que favorecen la dispersión natural de los contaminantes.

5. Se evidenció una cantidad de menores de 14 años que en conjunto con la mayor presencia de adultos mayores, correspondían a los receptores más sensibles y eran cerca de 80 mil habitantes (32,4% de la población actual).
6. Se incluye la ingesta accidental y dérmica de polvo contaminado, suelo y partículas re- suspendidas, así como la inhalación de polvo sedimentable (derivada de la matriz suelo) por partículas re-suspendidas para la población.
7. Se evidenció que, aunque la población está envejecida, hay un número importante de población etaria menor de 14 años, por tanto, los receptores más lábiles son los niños (menor de 36 meses).
8. Se evidenció que el polígono de intervención tiene como área efectiva 102.572 m^2 correspondiente a 10 hectáreas.
9. Para el presente estudio del polígono de intervención Arica, respecto a las vías de exposición estudiadas, la vía más relevante considerada fue el suelo por la historia asociada de contaminación, por ello, es importante señalar que la inhalación de polvo sedimentable (derivada de la matriz suelo) no es una vía de ingreso propicia para que se constituya una situación de exposición de importancia para la salud (debido a las características aerodinámicas de las partículas en ese escenario), sin embargo se consideró en la evaluación detallada.
10. Respecto a la exposición transdérmica está debidamente incluida, pero no representó una vía de interés especial dada la escasa capacidad de absorción para los metales a través de la piel.
11. La ingesta oral es la vía más importante cuando se trata del suelo, pero no implica necesariamente que sea una vía relevante y que la exposición represente un riesgo significativo a priori, sino que se debe evaluar y cuantificar dándole el contexto a la exposición, es decir, se deben incluir los hábitos de los residentes del sector en estudio y esto va a depender de la

frecuencia y duración de la exposición (además, de la concentración total y de la concentración de exposición corregida por la bioaccesibilidad del analito presente en el suelo), lo que requiere ser cuantificado para llevarlo a un dato objetivo que permita señalar si esta vía realmente resulta relevante o si es poco significativa para el contexto en que ocurre la exposición.

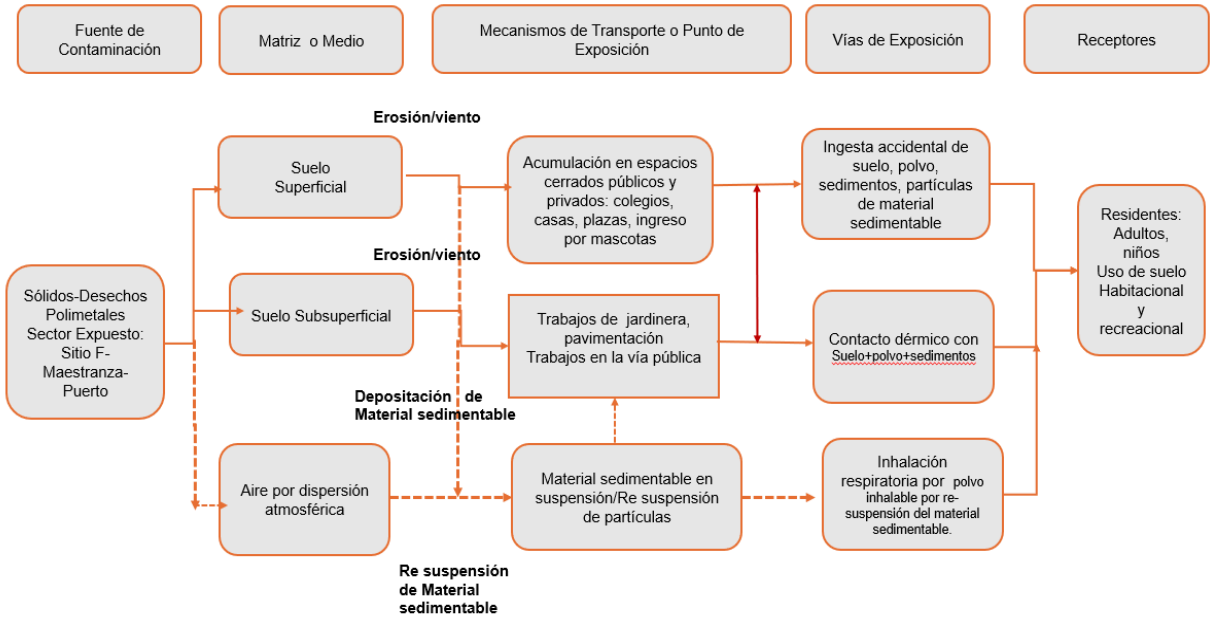


Figura 9: Modelo Conceptual del Estudio del Problema de Contaminación

.

6.6 Escenarios de análisis de exposición

6.6.1 Escenario 1: Conservador (no real)

En este escenario se evaluaron las tres vías de exposición recomendadas por la metodología de evaluación de riesgos de la EPA. Las vías de exposición consideradas son:

a) Ingestión accidental de suelo y polvo

Se considera la ingestión involuntaria de partículas de suelo, polvo y sedimentos presentes en espacios públicos y patios de viviendas durante actividades cotidianas, tales como jardinería, mantención domiciliaria, juegos infantiles, tránsito por zonas no pavimentadas, paseo de mascotas y otras actividades que favorecen el contacto mano-boca. Se utilizaron factores de ingesta de 100 mg/día para adultos y 200 mg/día para niños (ATSDR, 2005).

b) Contacto dérmico

Se considera el contacto directo de la piel con suelo y polvo contaminado durante actividades recreativas, laborales y domésticas, incluyendo juegos infantiles, permanencia en plazas, jardines, patios y trabajos domiciliarios.

c) Inhalación de material particulado resuspendido

Se considera la inhalación de partículas de polvo resuspendidas desde el suelo contaminado por acción del viento y del tránsito de personas o vehículos. Para esta vía se utilizaron tasas de inhalación de 0,63 m^3/h para adultos y 0,69 m^3/h para niños.

Para este escenario se asumió una frecuencia de exposición de 350 días/año y una permanencia de 24 horas/día, representando un escenario altamente conservador para residentes de los hogares en el sector del polígono de intervención (adultos y niños). Se incluyen actividades tanto al aire libre como al

interior de las viviendas en sus patios, en los establecimientos educacionales, jardines infantiles, plazas, sitios de trabajo o de estudio, laborales, recreacionales los fines de semana, por paseo de mascotas, paseo adulto mayor, tránsito en zonas no pavimentadas que provoca ingreso de material a las casas. La jornada laboral puede incluir actividades de intervención por cableado, obras de pavimentación, traslados por veredas y zonas no pavimentadas, ingreso de material accidental por mascotas, viento, entre otros.

6.6.2 Escenario 2: Probable

Este escenario representa las condiciones actualmente observadas en terreno, en Arica en el año 2025, considerando el grado de remediación y pavimentación existente. El 90% del polígono de intervención ha sido reducido y actualmente son zonas pavimentadas o remediadas, las zonas de juegos están selladas y pavimentadas, los sectores efectivos son zonas de tránsitos principalmente en veredas.

Las vías de exposición consideradas son:

a) Ingestión accidental de suelo y polvo

Se considera el contacto accidental con partículas de suelo presentes principalmente en sectores no pavimentados, patios domiciliarios y áreas públicas verdes remanentes. Se utilizaron tasas de ingesta de 50 mg/día para adultos y 100 mg/día para niños.

b) Contacto dérmico

El contacto dérmico ocurre principalmente durante actividades recreativas en plazas, patios domiciliarios y sectores no pavimentados remanentes.

c) Inhalación de material particulado resuspendido

Se considera la inhalación de partículas resuspendidas durante las actividades habituales al aire libre utilizando tasas de inhalación de 0,63 m³/h para adultos y 0,69 m³/h para niños.

Para este escenario se estimó una exposición efectiva máxima de 6 horas/día para niños y 16 horas/día para adultos, de acuerdo con las condiciones observadas en el área de estudio.

Justificación: Para el caso de los niños, se observó que las plazas, establecimientos educacionales jardines infantiles, están completamente pavimentadas la frecuencia de exposición efectiva a los sitios no pavimentados es de aproximadamente equivalente al tiempo de recreación familiar en plazas públicas de 180 min en menores de 5 años. Sin embargo, se suman los tiempos de tránsito y otras acciones recreativas también durante los fines de semana. Esto considerando que las casas o viviendas por lo general no tienen patio, y están cerradas por completo. En total se consideraron como máximo 6 horas al día de potencial exposición promedio, equivalente considerar exposición al aire libre estándar, considerando zonas de juegos, tránsito, patio de viviendas, patios de establecimientos educaciones y jardines infantiles, siendo el principal punto de exposición las plazas públicas. Para el caso de los adultos, la. frecuencia de exposición efectiva a los sitios pavimentados es de máximo 16 horas al día, descontando su jornada laboral, que podrían estar cumpliendo fuera del polígono de intervención. La zona de tránsito del polígono está en un 90% pavimentado o sellado, por lo tanto, la zona de ingesta se limita a horarios limitados de acompañamiento a menores en sus horas de recreación o durante fines de semanas o provenientes de los patios de las viviendas, durante la realización de trabajos en casa y o zonas públicas.

6.6.3 Escenario 3 : Realista

Este escenario representa las condiciones de exposición más probables para la población residente, considerando la movilidad diaria y el alto grado de pavimentación del polígono. Las vías de exposición consideradas son:

a) Ingestión accidental de suelo y polvo

Se considera la ingestión accidental limitada a actividades recreativas, jardinería, patios domiciliarios, paseo de mascotas y tránsito por sectores con suelo expuesto. Se utilizaron tasas de ingesta de 50 mg/día para adultos y 100 mg/día para niños.

b) Contacto dérmico

El contacto dérmico ocurre principalmente en plazas, patios y sectores con suelo descubierto durante actividades recreativas y domésticas.

c) Inhalación de material particulado resuspendido

La exposición inhalatoria considera partículas de polvo resuspendidas desde el suelo contaminado, utilizando tasas de inhalación de 0,63 m^3/h para adultos y 0,69 m^3/h para niños.

Se estimó una exposición efectiva aproximada de 3 horas/día para niños y 6 horas/día para adultos, representando un escenario de exposición cotidiana más realista.

Justificación: Para el caso de los niños, se observó que las plazas, jardines infantiles y establecimientos educacionales, están completamente pavimentadas la frecuencia de exposición efectiva a los sitios no pavimentados es de aproximadamente 3 horas al día, considerando el tiempo en zonas de juegos públicos o privadas, tránsito, patio de viviendas, patios de escuela, actividades recreativas fines de semana, zonas de tránsito por paseo de mascotas. El principal punto de exposición son las plazas públicas._Para el caso de los adultos, la

frecuencia de exposición efectiva a los sitios pavimentados es de máximo 6 horas al día. Para este cálculo se descuenta la jornada laboral, que podrían estar cumpliendo fuera del polígono de intervención. Para residentes que la cumplen en los sectores industriales o comerciales son lugares pavimentados y sellados, y se estima una exposición de 1,5 horas al día durante la semana (descanso laboral durante jornada para almuerzo, pausa activa, desplazamientos) y de 3 horas al día durante el fin de semana para actividades recreativas, que pueden ocurrir al interior de los patios o plazas o zonas de tránsito. La zona de tránsito del polígono está en un 90% pavimentado o sellado, por lo tanto, la zona de ingesta para adultos se limita a horarios de acompañamiento a menores en sus horas de recreación, durante fines de semanas, provenientes de los patios de las viviendas, por prácticas de jardinería, paseo de mascotas, por trabajos en casa y zonas públicas.

7 Cuantificación de la dosis- respuesta

7.1 Cálculo dosis de exposición

En este capítulo se estiman las dosis de ingesta para las diferentes vías de exposición incluidas en el modelo conceptual de riesgo en estudio. La expresión general, de los algoritmos para la estimación de dosis Interna es:

$$I = \frac{C^* \ RBA^* \ CR^* EF^* ED}{BW^* \ AT}$$

I = dosis suministrada (mg/kg*día)

C = Concentración total del contaminante en el punto de exposición (mg/kg)

RBA: biodisponibilidad relativa es un proxy de los valores de bioaccesibilidad experimentales proveniente del screening del suelo o sitio en estudio.

CR =Tasa de contacto (mg/día) (L/día) (m^3/día)

BW= Peso corporal (kg)

AT = Tiempo sobre el cual se promedia la exposición (día): para no carcinógeno

AT= ED; para carcinógenos se considera el tiempo de vida completa (70 años)

ED=Duración de la exposición (días /años)

EF= Frecuencia de la exposición (años)

AT=PT

La ponderación temporal, expresa la dependencia temporal de las variables, es el tiempo sobre el cual se promedia la dosis, y se usa para expresar la dosis como una dosis promedio diaria. La ponderación temporal para contaminantes cancerígenos: es: (70 años) * (365 días /años) = 25550 días. La ponderación temporal para contaminantes crónicos es: (ED, años) * (365 días /años)

Según se trate de un contaminante cancerígeno o un contaminante crónico no cancerígeno, las dosis de contaminante se definen como la dosis contaminante cancerígena= dosis promedio de por vida y la dosis contaminante no cancerígeno= dosis diaria promedio anual.

a) Ingestión Oral: La ingestión de suelo está asociada a diversas actividades que generalmente tienen lugar en el ambiente exterior pero también puede ocurrir en ambientes interiores, siempre que sea efectivo asumir que se produce la movilización de partículas de suelo contaminado en forma de polvo, sedimentos y que éste alcanza un espacio interior y exterior ocupado por receptores. La expresión siguiente permite calcular la ingesta media diaria asociada a la ingestión accidental (o voluntaria, en el caso de niños) de suelo o polvo con presencia de contaminantes, en la que incluye el efecto realista de la bioaccesibilidad:

$$I_{oral} = 10^{-6} * \frac{(Cs*RBA)*TIs}{P} * \frac{TE}{PE} = I_{oral} = 10^{-6} * \frac{(Cs*RBA)*TIs}{P} * FE$$

Donde:

I_{oral} = Ingesta media diaria de contaminante debido a ingestión accidental de suelo o polvo con presencia de contaminantes (mg/kg-día)

Cs = Concentración total del contaminante en el suelo (mg/kg)

RBA ~ biodisponibilidad relativa es un proxy de los valores de bioaccesibilidad experimentales proveniente del screening del suelo o sitio en estudio.

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

P = Peso corporal (kg)

TE = Tiempo de exposición (día)

PE = Periodo de exposición (día)

FE = Factor de exposición = (tiempo de exposición/periodo de exposición) (adimensional)

$$FE = \frac{Frecuencia\ Exposición\left(\frac{días}{año}\right)*Duración\ Exposición\ (años)}{Duración\ máxima\ exposición\ (años)*365\ días} = \frac{TE}{PE}$$

b) Ingesta por exposición dérmica: La dosis absorbida por contacto dérmico con suelo con presencia de contaminantes puede estimarse mediante la expresión siguiente:

$$I_d = 10^{-6} * \frac{(Cs*RBA)*(Sc*AD)*ABS}{P} * \frac{TE}{PE}$$

Dónde:

I_d = Dosis absorbida media diaria debido a contacto dérmico con polvo o suelo con presencia de contaminantes (mg/kg·día)

Cs = Concentración total del contaminante en el suelo (mg/kg)

Sc = Superficie corporal expuesta (cm2/día)

AD = Factor de adherencia suelo-piel (mg/cm2)

ABS = Factor de absorción dérmica (adimensional)

P = Peso corporal (kg)

TE = Tiempo de exposición (día)

PE = Período de exposición (día)

RBA ~ biodisponibilidad relativa es un proxy de los valores de bioaccesibilidad experimentales proveniente del screening del suelo o sitio en estudio.

c) **Inhalación**: La dosis inhalada de material particulado re suspendido desde suelo con presencia de polimetales contaminantes puede estimarse mediante la expresión siguiente:

$$I_{inh} = \frac{(C_s \cdot RBA) \cdot IR \cdot EF \cdot ED}{PEF \cdot BW \cdot AT}$$

Donde el resultado corresponde a una dosis diaria en mg/kg-día.

I_{inh}= dosis diaria promedio por inhalación de partículas en polvo re-suspendido (mg/kg*día)

C_s= concentración total en suelo (mg/kg)

IR = tasa de inhalación (m^3/día)

EF = frecuencia de exposición (días/año)

ED = duración de exposición (años)

PEF = Factor de Emisión de partículas (m^3/kg)

BW = peso corporal (kg)

AT = tiempo de promedio (días)

RBA ~ biodisponibilidad relativa es un proxy de los valores de bioaccesibilidad experimentales proveniente del screening del suelo o sitio en estudio.

7.2 Factores de exposición

1.- Escenario Realista: La información utilizada para el análisis de exposición, bajo un enfoque más representativo de condiciones reales, se basó en el documento "*Exposure Factors Handbook"*, el cual constituye una referencia estándar para la estimación de parámetros de exposición en evaluaciones de riesgo ambiental (US.EPA, 2017). Este compendio, incluye factores de exposición derivados de evidencia empírica y análisis estadísticos, organizados en distintos volúmenes temáticos. En particular, se emplearon los valores reportados en el Capítulo 5 del documento, correspondientes a tasas de ingestión de suelo y polvo en población general. De acuerdo con esta fuente, la exposición combinada se distribuye en aproximadamente un 45% atribuible a suelo y un 55% a polvo. Para niños menores de 6 años, se establece una ingesta diaria de tendencia central de 100 mg/día, valor que corresponde a una aproximación redondeada de una tasa combinada estimada de 110 mg/día. En el caso de adultos, se considera una tasa de ingestión de 50 mg/día (EPA, 2017).

También, se consideró que la duración de exposición para elementos carcinogénicos es de 70 años, por 365 días al año. Sin embargo, un factor importante considerado es que al utilizar estas recomendaciones éstas se limitaron a estimaciones de las cantidades de suelo y polvo ingeridas. Por tanto, el alcance de estos valores se limitó solo a las cantidades de suelo y polvo que ingresan al tracto gastrointestinal, pero no abarca cuestiones relacionadas con la biodisponibilidad de los contaminantes ambientales presentes en dicho suelo y polvo y que deben ser consideradas en la evaluación, donde se realizaron los ajustes en las ecuaciones de exposición a la ingestión de suelo y polvo para representar mejor la dirección del movimiento de dichos contaminantes dentro del tracto gastrointestinal. Estos valores medios son recomendados en zonas equivalentes a las observadas en Arica donde un 90% de los sitios este

pavimentado. Este escenario considera una frecuencia de exposición de 3 horas para los niños y 6 horas para los adultos. La tasa de inhalación y el factor de emisión de partículas se consideró de acuerdo con los valores estándares de la EPA y constantes en el tiempo.

2.- El escenario probable, se consideró que las tasas de ingesta en promedio para adulto eran de 50 mg/día y 100 mg/día para niños (ATSDR 2001), es decir, considerando los valores promedios de los percentiles medios. También incluyó una frecuencia real de exposición de 6 horas para los niños y 16 horas para los adultos.
La tasa de inhalación y el factor de emisión de partículas se consideró de acuerdo con los valores estándares de la EPA y constantes en el tiempo.

3.- Para un escenario más conservador y poco probable, se consideró que las tasas de ingesta en promedio para adulto de 100 mg/día y 200 mg/día para niños (ATSDR 2001), es decir, considerando los valores promedios de los percentiles más altos (no medios). También incluyó una frecuencia teórica de exposición de 24 horas al día considerando 350 días al año.

Finalmente, en la Tabla *12* se resumen los factores de exposición utilizados para los diversos escenarios evaluados.

Tabla 12: Factores de Exposición: vía oral-dérmica-inhalación

Factor de Exposición	**Factor de Exposición**	**Adulto**	**Niños**
Peso corporal	P (Kg)	80	20,5
Frecuencia de Exposición Residencial	FE días /año	350	350
Duración Exposición no cancerígena	DE años	24	6
Duración Exposición cancerígena	DE años para el arsénico y Cromo (carcinogénicos)	70	70
Período de ponderación de máxima exposición carcinogénica	De máx. en [días/año]	365	365
Período de ponderación: Duración máxima de exposición carcinogénica	AT o PT [años]	70	70
Período de ponderación: Duración máxima de exposición no carcinogénica	AT o PT [años]	30	30
Tasa de ingestión de suelo contaminado (mg/día) Zonas pavimentadas de uso residencial, criterio ATSDR 2005, incluye valores de percentiles más altos. Escenario conservador	Tis (IRS)	100	200
Tasa de ingestión accidental de polvo y suelo contaminado (mg/día) EPA 2017 polvo sedimentado interior, exterior en aire y suelos, zonas pavimentadas de uso residencial, valores medios. escenario probable y real	Tis (IRS)	50	100
AD = Factor de adherencia suelo-piel (mg/cm^2)	AF	0,07	0,2
Sc = Superficie corporal expuesta	Sc (cm^2/día)	19400	7300
Fracción de piel expuesta	FPE	30	39
Area de piel superficial expuesta	SA suelo (cm^2)	6032	2373
Factor de Absorción	ABS As dérmico	0,03	0,03
Tasa de inhalación de aire (m^3/h N)	IR (m^3/h N)	0,69	0,63
Factor de Emisión de partículas	FEP m3/kg	1,36E+09	1,36E+09

7.3 **Resultados Dosis de Exposición**

Para la estimación de las dosis de exposición por ingesta oral accidental y por exposición dérmica para el arsénico se consideraron los tres escenarios de análisis: conservador (no real), probable y realista. En la Tabla *13*, Tabla *14* y Tabla *15* se presentan los factores de exposición diferenciadores para cada escenario conservador, probable y realista, respectivamente. Los factores de exposición para cuantificar la vía de inhalación respiratoria son iguales en los tres escenarios y se resumieron en la Tabla 12.

Tabla 13: Factores de exposición para escenario conservador para el arsénico

		ARSÉNICO	**ARSÉNICO**
FACTORES DE EXPOSICIÓN: ESCENARIO CONSERVADOR	**UNIDADES**	**Adultos Residente**	**Niños Residente**
		Arsénico	Arsénico
Concentración total del contaminante	Cs (mg/Kg)	12,9	12,9
Peso corporal	BW P (Kg)	80	20,5
Tiempo promedio o período sobre el cual se promedia la exposición [días] máximo (70 años carcinogénico, 365 días)	AT (días) (Pe)	25.550	25.550
Duración de la exposición: Tiempo exposición por ingesta accidental	ED (años)	24	6
Frecuencia de la exposición [días / año]. Uso residencial .24 horas al día	EF (días/año)	350	350
Tiempo exposición efectivo (Frecuencia EF * duración ED)	Te (días)	8.400	2.100
Tasa de ingestión de suelo contaminado (mg/día)	Tis , CR tasa de contacto	100	200
RBA ~Bioaccesibilidad	%	80	80

Tabla 14: Factores de exposición para escenario probable para el arsénico

FACTORES DE EXPOSICIÓN: ESCENARIO PROBABLE	UNIDADES	ARSÉNICO Adultos Residente	ARSÉNICO Niños Residente
		Arsénico	Arsénico
Concentración total del contaminante	Cs mg/Kg	12,9	12,9
Peso corporal	BW P Kg	80	20,5
Tiempo promedio o período sobre el cual se promedia la exposición [días] máximo (70 años carcinogénico, 365 días)	AT días (Pe)	25.550	25.550
Duración de la exposición: Tiempo exposición por ingesta accidental	ED años	24	6
Frecuencia de la exposición [días / año]. Uso residencial para niños 6 horas al día y 16 horas al día adulto	EF días/año	233	88
Tiempo exposición efectivo (Frecuencia EF * duración ED)	Te (días)	5.600	525
Tasa de ingestión de suelo contaminado (mg/día)	Tis, CR tasa de contacto	50	100
RBA ~Bioaccesibilidad	%	80	80

Tabla 15: Factores de exposición para escenario realista para el arsénico

FACTORES DE EXPOSICIÓN: ESCENARIO REALISTA	UNIDADES	ARSÉNICO Adultos Residente	ARSÉNICO Niños Residente
		Arsénico	Arsénico
Concentración total del contaminante	Cs (mg/Kg)	12,9	12,9
Peso corporal	BW P (Kg)	80	20,5
Tiempo promedio o período sobre el cual se promedia la exposición [días] máximo (70 años carcinogénico, 365 días)	AT días (Pe)	25.550	25.550
Duración de la exposición: Tiempo exposición por ingesta accidental	ED (años)	24	6
Frecuencia de la exposición [días / año]. Uso residencial para niños 3 horas al día, 6 horas al día adulto	EF (días/año)	88	44
Tiempo exposición efectivo (Frecuencia EF * duración ED)	Te (días)	2.100	263
Tasa de ingestión de suelo contaminado (mg/día)	Tis, CR tasa de contacto	50	100
RBA ~Bioaccesibilidad	%	80	80

Utilizando estos valores se estimó la dosis de exposición como valores de ingesta oral accidental, exposición dérmica e inhalación respiratoria para el arsénico, en cada escenario propuesto, tanto para niños como adultos. Estos resultados se resumen en la Tabla 16 y en la Figura 10 se muestran gráficamente para facilitar su interpretación. Se observó que el escenario más negativo es el conservador (no real), en cambio el escenario más positivo es el realista y probable donde se incorporan los cambios observados durante el terreno realizado y que se detalló en la actividad 2 y 3 del Informe de avance III.

Tabla 16: Resultados dosis de exposición vía ingesta oral–dérmica-inhalación por presencia de arsénico en el polígono de intervención para cada escenario propuesto

	Arica polígono de intervención Año 2025		
Dosis por Ingesta + Dérmico+ Inhalación por Arsénico	Escenario Conservador	Escenario Probable	Escenario Realista
Adultos Residentes (mg/kg*día)	6,0,E-06	2,6,E-06	9,6,E-07
Niños Residentes (mg/kg*día)	1,0,E-05	1,5,E-06	7,4,E-07

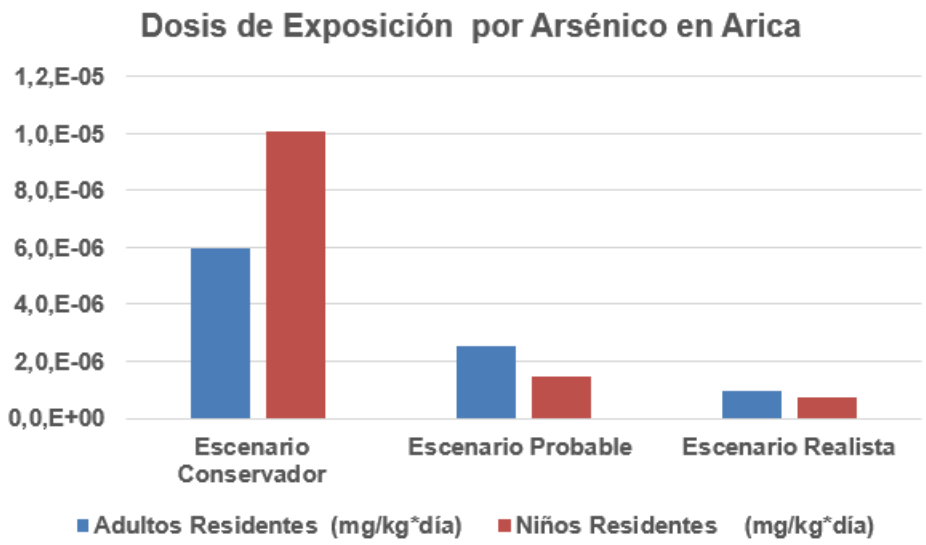


Figura 10: Dosis de exposición acumulada por vía ingesta oral, dérmica e inhalación por presencia de arsénico para cada escenario propuesto

8 Caracterización del Riesgo por Arsénico

8.1 Resultados de la evaluación de riesgos carcinogénico

La caracterización del riesgo carcinogénico se cuantificó mediante la estimación del Incremento del Riesgo de Cáncer durante la Vida ("*Incremental Lifetime Cancer Risk"*, ILCR), el cual representa la probabilidad adicional de desarrollar cáncer como consecuencia de la exposición crónica a un agente carcinogénico a lo largo de la vida. Para cada contaminante y vía de exposición, el ILCR se estimó multiplicando la dosis diaria promedio durante la vida (*"Lifetime Average Daily Dose"*, LADD) por el correspondiente Factor de Pendiente Cancerígeno (*"Slope Factor"*, SF), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$ILCR = LADD \times SFO$$

donde:

ILCR = Incremento del riesgo de cáncer durante la vida (Incremental Lifetime Cancer Risk), adimensional.

LADD = Dosis diaria promedio durante la vida (Lifetime Average Daily Dose), expresada en (mg/kg·día).

SF = Factor de Pendiente Cancerígeno (Slope Factor), expresado en $(mg/kg \cdot día)^{-1}$

El riesgo extra se atribuye a una causa específica. Se denomina riesgo "extra" de cáncer porque es un riesgo asociado al problema de contaminación, por lo tanto, es "adicional" al riesgo normal basal de cáncer que tiene cada persona determinada o específica. Por tanto, el ILCR representa el riesgo adicional atribuible exclusivamente a la exposición evaluada, es decir, el incremento de la probabilidad de desarrollar cáncer por efecto de la contaminación, independiente del riesgo basal de cáncer presente en la población.

Así, por ejemplo, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (por sus siglas en inglés, USEPA) suele utilizar un rango de riesgo de referencia objetivo de $1x10^{-4}$ a $1x10^{-6}$ para los carcinógenos en el agua potable, criterio que es concordante con las directrices para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés), que basan los valores de referencia para los carcinógenos genotóxicos, en un exceso de riesgo de cáncer a lo largo de la vida de $1x10^{-5}$.

De acuerdo con la metodología de evaluación de riesgos, el Riesgo Extra Cáncer de por Vida (por sus siglas en español, RECV), equivalente al *Incremental Lifetime Cancer Risk* (ILCR) definido por la USEPA, corresponde a la probabilidad adicional de desarrollar cáncer durante la vida como consecuencia de la exposición crónica a un contaminante. El ILCR o RECV se estimó integrando las contribuciones de las tres vías de exposición evaluadas (ingestión oral, contacto dérmico e inhalación de material particulado re-suspendido) para cada escenario de exposición. En el presente estudio, la evaluación del riesgo carcinogénico se realizó únicamente para el arsénico, de acuerdo con los criterios toxicológicos adoptados y las observaciones de la Autoridad Sanitaria.

Los valores de RECV obtenidos para niños y adultos se encuentran dentro del rango de referencia utilizado para la interpretación y gestión del riesgo carcinogénico (10^{-6} a 10^{-4}), conforme a los criterios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Guía para la Evaluación del Riesgo para la Salud de la Población del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). En este contexto, los resultados corresponden a un riesgo carcinogénico de baja magnitud y compatible con un escenario en el cual la gestión del riesgo puede considerar medidas de seguimiento, monitoreo y control, de acuerdo con las características del sitio y los criterios definidos por la autoridad competente.

Los resultados presentados corresponden a la suma de las contribuciones derivadas de la Dosis Diaria Promedio durante la Vida (*Lifetime Average Daily Dose*, LADD) para las vías de ingestión oral, contacto dérmico e inhalación, considerando los tres escenarios de exposición evaluados para niños y adultos. Los valores obtenidos se resumen en la Tabla 17 y se muestran gráficamente para facilitar su interpretación en la Figura 11 para facilitar su interpretación.

Tal como era esperable, el escenario conservador presentó las mayores estimaciones de riesgo debido al uso de supuestos de máxima exposición. En contraste, el escenario realista presentó los menores valores de RECV, al incorporar las condiciones actualmente observadas en terreno durante la campaña realizada en Arica en 2025, incluyendo el alto grado de pavimentación y remediación del polígono de intervención, así como la reducción de las áreas con suelo expuesto, antecedentes descritos en las Actividades 2 y 3 del Informe de Avance III.

Tabla 17: Resultados riesgo extra-cáncer exposición vía ingesta oral, dérmica e inhalación, por presencia de arsénico

	Arica polígono de intervención Año 2025		
Riesgo Extra-Cáncer: Vías Ingesta + dérmico +inhalación para arsénico	Escenario Conservador	Escenario Probable	Escenario Realista
Adultos Residentes	8,9,E-06	3,8,E-06	1,4,E-06
Niños Residentes	1,5,E-05	2,2,E-06	1,1,E-06
Nivel de riesgo	Bajo	bajo	bajo

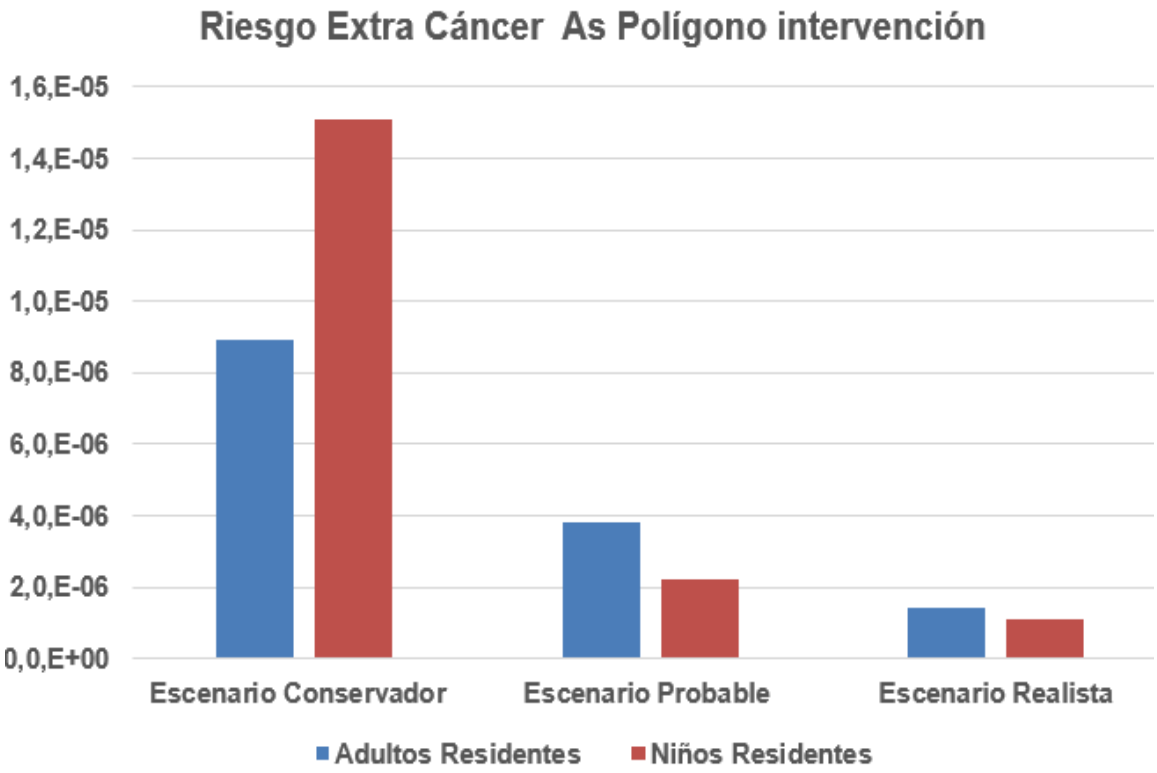


Figura 11: Resultados riesgo extra-cáncer exposición vía ingesta oral, dérmica e inhalación por presencia de arsénico para cada escenario propuesto

8.2 Resultados del Índice de Peligrosidad (efecto crónico)

La caracterización del riesgo no carcinogénico se realizó mediante el cálculo del Cociente de Peligro *("Hazard Quotient, HQ"*) para cada contaminante y cada vía de exposición evaluada (ingestión accidental de suelo, contacto dérmico e inhalación de material particulado re-suspendido). El "HQ" corresponde a la relación entre la dosis diaria promedio de exposición (Average Daily Dose, ADD) y la dosis de referencia (Reference Dose, RfD), según la siguiente expresión:

$$HQ = \frac{ADD}{RfD}$$

donde:

HQ = Cociente de Peligro (*Hazard Quotient*), adimensional.

ADD = Dosis diaria promedio de exposición (*Average Daily Dose*), expresada en mg/kg·día.

RfD = Dosis de Referencia (*Reference Dose*), expresada en mg/kg·día.

El HQ permite evaluar el riesgo potencial asociado a un contaminante específico y una vía de exposición determinada. Un valor HQ ≤ 1 indica que la exposición estimada se encuentra por debajo de la dosis considerada segura y, por tanto, no se esperan efectos adversos no carcinogénicos. En cambio, un valor HQ > 1 indica la posibilidad de ocurrencia de efectos adversos y justifica un análisis más detallado.

Posteriormente, los HQ obtenidos para todas las vías de exposición y contaminantes fueron integrados mediante el cálculo del Índice de Peligro (IP), denominado Hazard Index (HI) por la EPA. El IP representa la suma de los cocientes de peligro individuales y corresponde al indicador utilizado para la caracterización final del riesgo no carcinogénico:

$$IP = \sum HQ_i$$

donde:

IP = Índice de Peligro (*Hazard Index*), adimensional.

HQ_i = Cociente de Peligro correspondiente al contaminante y/o vía de exposición *i*.

En este estudio, el Índice de Peligro (IP) constituye el parámetro utilizado para la evaluación del riesgo no carcinogénico total, integrando los aportes de las vías de ingestión accidental de suelo, contacto dérmico e inhalación de material particulado resuspendido. De acuerdo con la metodología de la EPA, un IP ≤ 1

indica que no se esperan efectos adversos no carcinogénicos para la población expuesta, mientras que un IP > 1 sugiere la existencia de un potencial riesgo para la salud que requiere evaluación o medidas de gestión adicionales.

En este estudio se usó la dosis de exposición estimada para el arsénico, para cada vía y en tres escenarios, se sumaron los valores de las tres vías consideradas: ingesta oral, dérmica e inhalación, para cada escenario, de niños y adultos. Estos resultados se resumen en la Tabla 18 y en la Figura 12 se muestran gráficamente para facilitar su interpretación. Se observó que el escenario más negativo es el conservador, en cambio el escenario más positivo es el realista donde se incorporan los cambios observados durante el terreno realizado y que se detalló en la actividad 2 y 3 del Informe de avance III. En todos los escenarios los índices de peligrosidad, IP son muy inferiores a 1.

Tabla 18: Resultados índice peligrosidad vía ingesta oral, dérmica e inhalación por presencia de arsénico

	Arica polígono de intervención Año 2025		
Índice Peligrosidad (IP) Efecto crónico acumulado del arsénico	Escenario Conservador	Escenario Probable	Escenario Realista
Adultos Residentes	0,020	0,009	0,003
Niños Residentes	0,03	0,005	0,002

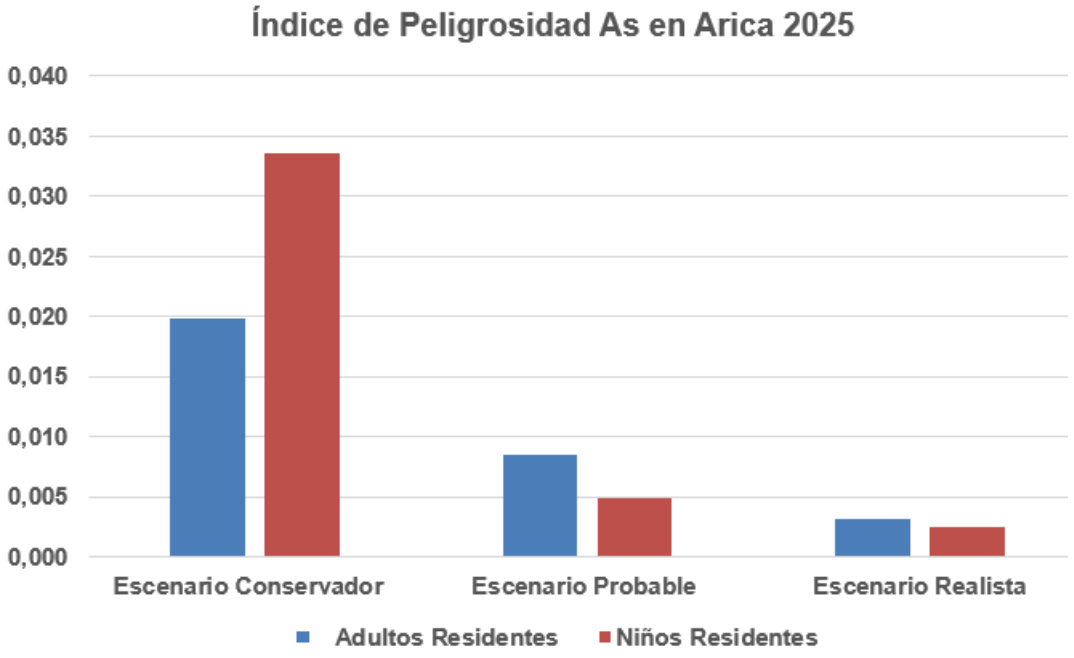


Figura 12: Resultados riesgo de índice peligrosidad por presencia de arsénico para cada escenario propuesto

9 Caracterización del riesgo por Plomo

9.1 Marco conceptual

Existen varios modelos toxico-cinéticos que permiten estimar la concentración de plomo sanguíneo asociada con exposición al plomo. Estos modelos consisten en predicciones de niveles de plomo sanguíneo en niños expuestos a plomo desde varias fuentes ambientales y por diversas rutas de exposición, predicciones que se basan en estimaciones del movimiento del plomo absorbido y distribuido en el organismo durante el tiempo y por procesos fisiológicos o bioquímicos. El modelo seleccionado fue el Modelo Biocinético Integrado de Exposición y Distribución para el Plomo en Niños (del inglés Integrated Exposure Uptake Biokinetic Model for Lead in Children, IEUBKwin, v.1.1, 2010). Con este modelo, la EPA regula la exposición al plomo mediante el uso de un biomarcador (concentración de plomo en sangre).

El modelo IEUBKwin fue desarrollado por la USEPA y es apropiado para las necesidades y requerimientos del presente proyecto. El modelo consiste en un gran número de ecuaciones complejas que forman cuatro módulos interrelacionados (exposición, ingreso, biocinética, y distribución de probabilidad) para estimar los niveles de plomo sanguíneo en niños expuestos a plomo medio ambiental. El modelo permite estimar el riesgo de que un niño o una población de niños puedan exceder el nivel de preocupación de 5 µg/dL ya que los efectos negativos se han observado solamente con niveles de plomo sanguíneo superiores a este límite.

9.2 Resultados

Este modelo considera como riesgo “La probabilidad de tener efectos perjudiciales o adversos para la salud provenientes de niveles de plomo en el medio ambiente”

y se grafican en la Figura 13 y se detallan sus resultados en el Anexo 12. Para estimar el riesgo en el caso del plomo se usa el modelo IEUBKwin que requirió el uso de datos experimentales de concentración total y bioaccesible de plomo en suelo y para las matrices de aire, agua y dieta se usaron los datos por defecto de la EPA incluidos en el software. La forma de evaluar la exposición, mediante este software, incluyó la evaluación ambiental, la evaluación de biomarcadores de exposición y el uso de modelos de exposición, que se resumen en:

1. Uso de los datos experimentales para la concentración (total y bioaccesible) de plomo en el suelo. Por defecto se consideró constante en el tiempo (concentración total 50,23 ppm y bioaccesibilidad 97%)
2. No se consideró ingesta de plomo alimentaria o en agua potable (no existe evidencia para su inclusión).
3. Se consideró por defecto constante la concentración de plomo en el aire al interior y exterior de las viviendas e igual 0,1 µg/m^3N (EPA, 2010).
4. No se consideró aporte de plomo dietario (frutas, verduras, pescado, carne animal, agua de consumo) humano.
5. Se estimó el nivel de plomo sanguíneo exclusivamente atribuido al plomo en el suelo y en el aire ambiente considerando valores experimentales y sugeridos por la EPA, respectivamente.
6. Se consideró que la biodisponibilidad es aproximadamente igual a la bioaccesibilidad de la fase control gástrica, que es la más alta e igual a 97%.

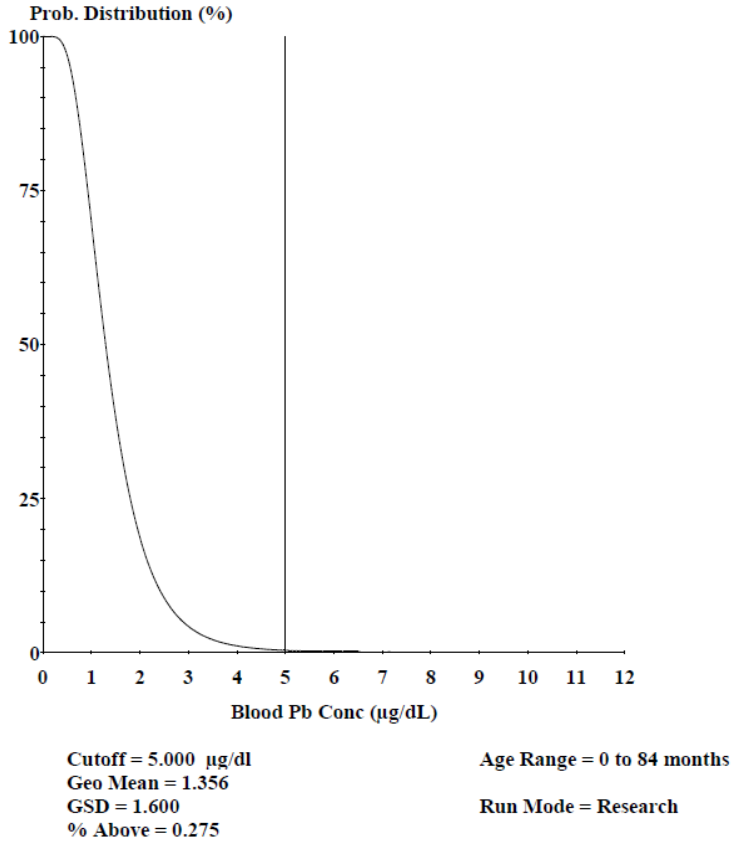


Figura 13 :Curva de densidad probabilística de incidencia de plomo en niños residentes en polígono de intervención de Arica

En la Figura 13, se muestra la curva de distribución de probabilidad de incidencia de los factores ambientales en estudio en función de la concentración de plomo en la sangre. Tiene como parámetros estadísticos:

1. Valor de corte máximo: 5 µ/dL
2. GSD =desviación estándar geométrica (definida por software)
3. Geo Mean= Media Geométrica que corresponde a una concentración promedio geométrica en µg/dL.
4. % Above =porcentaje de área bajo la curva sobre el nivel de corte máximo

5. Age Range= rango de edad en estudio biocinética

Los niveles de plomo sanguíneo estimados en niños entre 0 y 7 años son inferiores a 2 µg/dL. El modelo IEUBK muestra que la distribución de plomo en sangre se encuentra muy por debajo de los valores de referencia internacionales. Incluso utilizando un umbral conservador de 2 µg/dL —más estricto que los criterios de la OMS de 5 µg/dL , la probabilidad de excedencia teórica es inferior a 0,275 %, lo que evidencia un control robusto del riesgo. El valor central que se obtuvo de la distribución log-normal, corresponde a una concentración promedio geométrica de plomo en sangre en la población infantil modelada de 1,356 µg/dL .

9.3 Conclusión:

Para la evaluación del riesgo asociado a plomo en población infantil se utilizó el modelo biocinético IEUBK de la USEPA, aplicable a niños entre 0 y 7 años. Los resultados estimados indican una concentración promedio geométrica de plomo en sangre de 1,356 µg/dL, considerando una distribución log-normal de la población infantil modelada. Este valor se encuentra por debajo de los valores de referencia utilizados internacionalmente para la gestión sanitaria de la exposición infantil a plomo. Adicionalmente, al aplicar un umbral conservador de 2 µg/dL, más exigente que el valor de referencia de 5 µg/dL utilizado en guías sanitarias internacionales y nacionales, la probabilidad teórica de excedencia fue inferior a 0,275 %. Estos resultados indican que, bajo los supuestos de exposición considerados en el modelo, la exposición estimada a plomo no generaría una proporción relevante de niños con niveles sanguíneos superiores a los criterios de referencia evaluados.

En consecuencia, los resultados del modelo IEUBK sugieren que el escenario evaluado presenta un riesgo bajo para la población infantil respecto de la exposición a plomo, sin perjuicio de que, debido a la sensibilidad de los niños y a la ausencia de un nivel completamente seguro de exposición al plomo, se

recomienda mantener medidas preventivas de control de polvo, reducción de contacto con suelo expuesto y seguimiento ambiental cuando corresponda.

10 Análisis de Incertidumbre

10.1 Análisis de incertidumbre

La estimación del riesgo para la salud constituye una herramienta predictiva basada en modelos matemáticos, información experimental, parámetros toxicológicos y escenarios de exposición, por lo que los resultados obtenidos están sujetos a incertidumbres inherentes al proceso de evaluación. De acuerdo con la metodología de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Guía para la Evaluación del Riesgo para la Salud de la Población del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), la incertidumbre forma parte de toda evaluación cuantitativa de riesgos y no invalida los resultados del estudio, sino que debe ser identificada, analizada y considerada en su interpretación.

En el presente estudio se evaluaron tres herramientas complementarias para la caracterización del riesgo para la salud:

- **Riesgo Extra de Cáncer de por Vida (RECV)**, equivalente al *Incremental Lifetime Cancer Risk* (ILCR) de la USEPA, utilizado para estimar el riesgo carcinogénico asociado a la exposición al arsénico.
- **Índice de Peligro (IP)**, equivalente al *Hazard Quotient* (HQ) de la USEPA, utilizado para evaluar los potenciales efectos no carcinogénicos derivados de la exposición crónica al arsénico.
- **Modelo Biocinético Integrado de Exposición-Uptake (IEUBK)** desarrollado por la USEPA, utilizado para estimar la distribución probabilística de las concentraciones de plomo en sangre en niños entre 0 y

7 años, como consecuencia de la exposición ambiental al plomo presente en el suelo y material particulado.

Los resultados obtenidos representan estimaciones del riesgo bajo los escenarios de exposición definidos y no corresponden a una predicción exacta del comportamiento individual de cada persona expuesta.

10.2 Incertidumbre asociada al muestreo y análisis químico

Las concentraciones utilizadas en la evaluación provienen de campañas de muestreo ejecutadas bajo protocolos internacionales estandarizados, procedimientos de aseguramiento y control de calidad y análisis efectuados por laboratorios acreditados.

Las incertidumbres analíticas asociadas a la determinación de las concentraciones fueron evaluadas mediante blancos, duplicados, materiales de referencia certificados, análisis de precisión y exactitud, y análisis estadísticos, verificándose que los resultados obtenidos se encontraban dentro de los criterios de aceptación establecidos para este tipo de estudios.

10.3 Incertidumbre asociada a la caracterización de la exposición

Todo modelo de exposición constituye una representación simplificada de las condiciones reales del sitio, por lo que siempre existe incertidumbre respecto de la frecuencia, duración e intensidad con que las personas pueden entrar en contacto con los contaminantes ambientales. En el presente estudio dicha incertidumbre fue reducida mediante:

- utilización de concentraciones bioaccesibles determinadas experimentalmente;
- desarrollo de un modelo conceptual específico del sitio;
- incorporación de información obtenida durante las campañas de terreno;

- definición de tres escenarios de exposición (Conservador, Probable y Realista);
- utilización de factores de exposición recomendados por la USEPA y la ATSDR, ajustados a las condiciones observadas en el área de estudio.

Lo anterior permitió representar un rango razonable de exposición potencial de la población y evaluar la sensibilidad de los resultados frente a distintos supuestos de exposición.

10.4 Reducción de la incertidumbre mediante el uso de concentraciones bioaccesibles

Una de las principales fuentes de incertidumbre en las evaluaciones convencionales de riesgo para la salud corresponde al uso de concentraciones totales del contaminante presentes en el suelo para estimar la dosis de exposición, lo que puede conducir a una sobreestimación de la fracción realmente disponible para ser absorbida por el organismo. En el presente estudio esta fuente de incertidumbre fue reducida mediante la determinación experimental de la fracción bioaccesible de los contaminantes, obtenida a través de ensayos realizados bajo protocolos internacionalmente estandarizados. En consecuencia, las dosis de exposición utilizadas para la evaluación del riesgo fueron calculadas utilizando la fracción potencialmente disponible para la absorción gastrointestinal y no únicamente la concentración total presente en el suelo. La incorporación de la bioaccesibilidad constituye un refinamiento metodológico ampliamente reconocido en la evaluación cuantitativa del riesgo para la salud, ya que reduce la incertidumbre asociada a la estimación de la dosis absorbida y mejora la representatividad de los resultados respecto de las condiciones reales de exposición. Asimismo, disminuye el sesgo conservador asociado al uso exclusivo de concentraciones totales, manteniendo un criterio de protección de la salud sustentado en evidencia experimental específica del sitio.

10.5 Incertidumbre toxicológica

Los parámetros toxicológicos utilizados en la evaluación (Dosis de Referencia, RfD; Factor de Potencia Cancerígena, SF; y Factor de Riesgo Unitario por Inhalación, FRU) corresponden a valores desarrollados por organismos internacionales especializados, principalmente la USEPA. Estos parámetros incorporan factores de incertidumbre derivados del conocimiento toxicológico disponible y fueron desarrollados con un enfoque deliberadamente conservador, con el propósito de proteger a las poblaciones más sensibles. En consecuencia, su utilización tiende a sobreestimar el riesgo antes que subestimarlo, en concordancia con el principio precautorio adoptado por la USEPA y la ATSDR.

10.6 Variabilidad de la población

Existe variabilidad natural entre los individuos respecto de su edad, peso corporal, susceptibilidad biológica, hábitos de exposición y comportamiento. Esta variabilidad fue considerada mediante la utilización de parámetros de exposición recomendados por la USEPA y la ATSDR , así como mediante la evaluación independiente de niños y adultos y la definición de distintos escenarios de exposición representativos de las condiciones del sitio.

10.7 Incertidumbre asociada al modelo IEUBK

Para la evaluación del riesgo asociado al plomo se utilizó el modelo biocinético IEUBK desarrollado por la USEPA, el cual incorpora la variabilidad biológica de la población infantil mediante una distribución log-normal de las concentraciones de plomo en sangre. Como datos de entrada se utilizaron las concentraciones experimentales de plomo total y bioaccesible determinadas en el suelo del área de estudio. En ausencia de antecedentes experimentales específicos para otras

fuentes de exposición, se adoptaron los parámetros recomendados por la USEPA para la concentración de plomo en aire, pero no se incorporó el aporte potencial de plomo proveniente de alimentos ni del agua de consumo, debido a la inexistencia de antecedentes experimentales específicos que permitieran cuantificar dichas contribuciones para la población evaluada. En consecuencia, los niveles de plomo en sangre estimados corresponden exclusivamente al aporte atribuible al suelo y al aire considerados en el modelo. Los resultados obtenidos representan una estimación probabilística de la distribución de plomo en sangre en la población infantil y no una predicción individual del nivel de plomo sanguíneo de cada niño.

10.8 Conclusión del análisis de incertidumbre

En conjunto, las incertidumbres identificadas fueron abordadas mediante la utilización de metodologías internacionalmente aceptadas, parámetros toxicológicos oficiales de la USEPA, procedimientos estandarizados de muestreo y análisis, campañas ejecutadas bajo estrictos criterios de aseguramiento y control de calidad, e incorporación de escenarios de exposición representativos de las condiciones actuales del área de estudio.

Adicionalmente, la utilización de concentraciones bioaccesibles determinadas experimentalmente permitió reducir una de las principales fuentes de incertidumbre presentes en las evaluaciones tradicionales basadas exclusivamente en concentraciones totales del suelo, proporcionando una estimación más representativa de la dosis potencialmente disponible para su absorción por la población expuesta.

En consecuencia, si bien toda evaluación cuantitativa del riesgo presenta incertidumbres inherentes a la caracterización de la exposición, la respuesta toxicológica y la variabilidad biológica de la población, las metodologías

empleadas, la calidad de los antecedentes experimentales y el refinamiento metodológico incorporado mediante la determinación de la bioaccesibilidad otorgan un adecuado nivel de confianza científica para la interpretación de los resultados y su utilización como base técnica para la gestión del riesgo y la toma de decisiones en materia ambiental y sanitaria.

11 Conclusiones del estudio

11.1 Generales

El plan de muestreo ejecutado dio una base sólida y confiable para la evaluación de la exposición a polimetales en suelos urbanos, garantizando la validez de los resultados obtenidos en el estudio de riesgo a la salud de la población. Al que se le agregó el sólido sistema de calidad de las cadenas de custodia y análisis realizados para asegurar que esta base de datos fuera de alta calidad y baja incertidumbre.

De los metales pesados y metaloides en estudio (cromo, cadmio, mercurio y arsénico), las concentraciones EMEG calculadas en base de las dosis de exposición establecidas por la Agencia de Protección Ambiental Norteamérica, se concluyó que el cadmio, mercurio y cromo no presentan niveles de preocupación ambiental para su estudio detallado de riesgo.

De las concentraciones bioaccesibles de exposición cuantificadas experimentalmente mediante el método UBM: a) para el caso del mercurio no se detecta ni cuantifica mercurio bioaccesible en ningún subsector; b) para el caso del cadmio se cuantifica cadmio bioaccesible en la fase gastrointestinal en valores inferiores al 8% de bioaccesibilidad; c) para el caso del cromo se detecta en algunos subsectores valores de concentraciones bioaccesibles en promedio igual a 2,8 ppm.

11.2 Evaluación de Riesgo

Se ingresó a evaluación detallada de riesgo el arsénico y plomo y se evaluó el riesgo extra-cáncer y el índice de peligrosidad bajo tres escenarios: conservador, probable y realista. Se identificó que la vía de exposición que genera mayor riesgo en la población lábil (niños) es la vía ingesta oral accidental, específicamente para el arsénico es de 8,3x 10^{-6} mg/kg*día) para el escenario conservador y de 5,2 x10^{-7} (mg/kg*día) para el escenario realista.

Se observó que el escenario más negativo fue el conservador para todas las evaluaciones realizadas para arsénico, en cambio el escenario más positivo fue el realista donde se incorporan las observaciones de campo durante el terreno realizado, los hábitos de los ciudadanos en los sitios efectivos, la reducción del polígono de intervención en un 90%, las recomendaciones de tasas de ingesta de la EPA actualizadas a esta realidad local, las recomendaciones de la EPA en que el arsénico presente en zonas con suelos áridos y con caliche , detallado en extenso en la actividad 2 y 3 del Informe de avance III presenta un riesgo moderado y controlado.

Considerando el escenario realista, el análisis de riesgo por exposición para el arsénico, se puede afirmar que el riesgo de probabilidad de aumento de cáncer, en las condiciones actuales del año 2025 de Arica, se encuentra dentro un rango aceptable de $1{,}1x10^{-6}$ para niños y $1{,}4\ x10^{-6}$ para adultos. Esto significa que el riesgo es bajo y se encuentra controlado. Para el escenario conservador los valores de riesgo igualmente dieron bajos para niños porque se estima en $1{,}5x10^{-5}$ y $8{,}9x10^{-6}$ para adultos. En conclusión, ambos casos, el riesgo dio dentro del rango de moderado según lo establecido por la EPA ($1x10^{-4}$ y $1x10^{-6}$) , por lo tanto, controlado.

Respecto a la evaluación de riesgo por exposición al plomo para los escenarios en estudio, se obtuvo que los niveles de plomo sanguíneo estimados en niños entre 0 y 7 años son inferiores a 2 µg/dL, específicamente se estimó que este biomarcador en sangre promedio como media geométrica es de 1,356 µg/dL y de acuerdo con la modelación con IEUBKwin, la mayor parte del área bajo la curva está muy por debajo del nivel de referencia igual a 5 µg/dL, con una probabilidad de excedencia mínima teórica del 0,252 %.

Considerando los posibles escenarios para los efectos crónicos del arsénico a los que están expuesta la población que vive en el polígono de intervención, se

observó que el escenario más negativo es el conservador, que es poco probable que ocurra, en cambio el escenario más positivo es el realista donde se incorporaron los cambios observados durante el terreno realizado, las recomendaciones de la EPA y que se detalló en la actividad 2 y 3 del Informe de avance III. En ambos casos, los índices de peligrosidad revelaron un riesgo bajo por exposición crónica a este analito. Específicamente del análisis bajo el escenario realista actual de Arica por exposición al arsénico, fue posible concluir que no habría efectos crónicos significativos en la salud de las personas asociados a la exposición ya que para el caso de los niños se obtuvo un índice de peligrosidad de 0,002 y para los adultos de 0,003.

De las tres vías de exposición incluidas, se observó que la más significativa bajo un escenario realista en los niños, es la ingesta oral accidental con una incidencia cercana al 69,5%, seguida por la vía dérmica con cerca de un 30% y finalmente la inhalación respiratoria inferior al 0,03%. Esto se replica en todos los escenarios para adultos y niños donde la vía de inhalación en todos sus casos tiene una incidencia inferior al 1%.

De esta los resultados indicaron que la dosis por inhalación de material particulado re-suspendido se encuentra en el orden de 10^{-10} mg/kg-día, generando el riesgo cancerígeno estimado se ubica por debajo de 1×10^{-6} para adultos y niños; y el índice de peligrosidad es significativamente inferior a la unidad, tanto en la población adulta como infantil.

12 Análisis de riesgo del Hotspots

1. Metodología de muestreo adaptativo al estudio de riesgo

El plan de muestreo de hotspots definido para la determinación de concentraciones de exposición a Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Plomo (Pb) y Mercurio (Hg) en suelos de la comuna de Arica fue desarrollado bajo un enfoque progresivo, validado en terreno y sujeto a ajustes operativos, en concordancia con las buenas prácticas de técnicas experimentales , la normativa nacional vigente (Ley 20.590 y su reglamento) y los principios de seguridad para el personal en estudios ambientales urbanos.

a) Definición inicial de Hotspots: Con fecha 3 de enero de 2025, se presentó a la contraparte técnica un primer conjunto de puntos de muestreo (hotspots), definidos a partir de: Antecedentes históricos de presencia de polimetales en suelos urbanos; Información cartográfica y análisis espacial preliminar y Criterios de exposición potencial asociados a uso de suelo y cercanía a zonas habitadas. Estos puntos constituyeron una propuesta preliminar, cuyo carácter exploratorio contemplaba explícitamente su validación posterior en terreno, práctica habitual en estudios de esta naturaleza (Ver Figura 14).



Figura 14: Esquema de puntos Hotspots propuestos en enero 2025

b) **Reajustes derivados del pre-terreno:** Durante la campaña de pre-terreno realizada en marzo de 2025, se efectuó una evaluación directa de las condiciones reales de accesibilidad y seguridad en los sectores definidos inicialmente. En esta instancia se constató que el sector Quebrada Encantada correspondía a un barrio con alta peligrosidad desde el punto de vista de seguridad pública, caracterizado por: a) Presencia de factores de riesgo para el personal técnico durante actividades de campo prolongadas; b) Condiciones que dificultan la ejecución segura, continua y controlada del muestreo; c) Limitaciones para garantizar la integridad física del equipo y la protección del

equipamiento técnico. Dado que los estudios de exposición ambiental deben desarrollarse bajo condiciones que resguarden la seguridad del personal, se resolvió descartar la colecta de muestras en dicho sector, priorizando criterios de seguridad operacional sin afectar el objetivo del estudio. En consecuencia, se procedió a un reajuste de los hotspots, relocalizándolos en sectores equivalentes en términos de exposición potencial, pero con condiciones adecuadas para la ejecución del trabajo de campo. Este reajuste fue documentado y presentado en el informe de pre-terreno, donde se indicó que es de interés empezar hacer un seguimiento en los sectores aguas abajo donde está depositado los residuos de Promel para futuros análisis de nuevos posibles mecanismos de exposición a demostrar (Ver Figura 15).

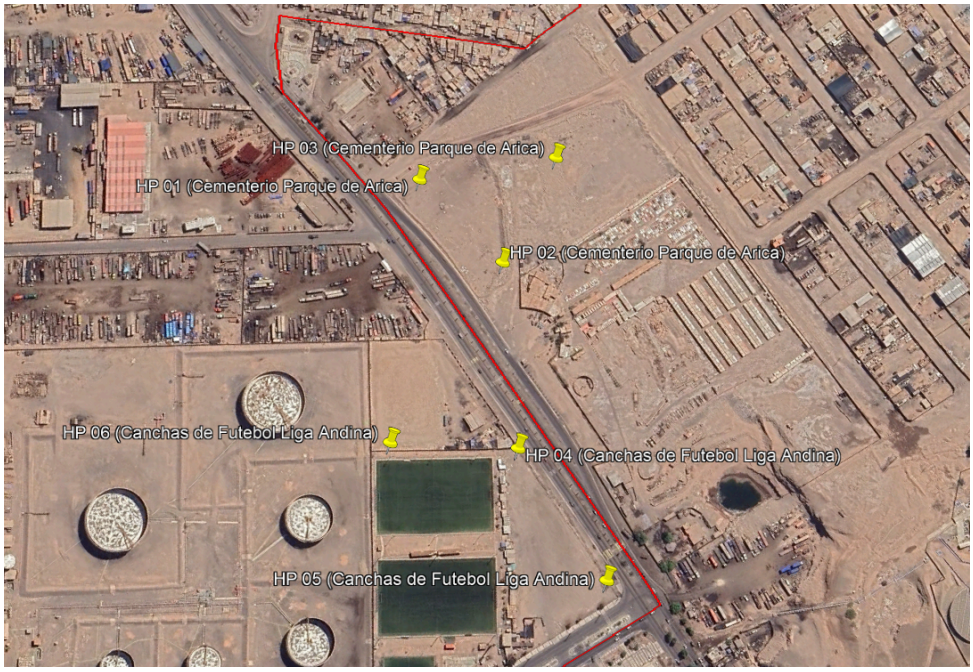


Figura 15: Punto propuestos en pre-terreno, en marzo 2025

c) **Ajustes operativos durante la campaña de muestreo:** Finalmente durante la campaña de colecta de muestras realizada en mayo de 2025, se verificó que algunos de los puntos definidos en el pre-terreno se encontraban pavimentados o intervenidos, lo que impidió la extracción directa de suelo superficial conforme a los protocolos técnicos del estudio. En especial, algunos

de ellos se habían transformado en canchas recreativas. En estos casos, se realizaron ajustes mínimos de reubicación, desplazando los puntos dentro del mismo sector urbano y contexto ambiental, con el fin de: a) mantener la representatividad espacial de los puntos Hotspots; b) garantizar la correcta obtención de muestras de suelo y c) evitar introducir sesgos asociados a cambios de uso de suelo.

Cabe destacar que estos ajustes no alteraron la lógica general del muestreo ni la cobertura territorial previamente validada (Ver Figura 8).

2. Resultados

Los antecedentes de concentraciones totales y bioaccesible del sector Hotspots se resumen en la *Tabla 19*, que se cuantificaron de manera equivalente al resto del polígono. Es de interés su análisis para ver e identificar zonas perimetrales al polígono para ver el comportamiento de los contaminantes en la comuna.

Tabla 19: Resultados de las concentraciones totales y bioaccesibles de arsénico y plomo en Zona perimetral Hotspot

			Arsénico		
Sector	Subsector	Correlativo	Concentración Total, Arsénico [mg/kg]	% Bioaccesibilidad Fase control Arsénico	Concentración Exposición [mg/kg] Arsénico
Zona Arica Perímetro	**Hotspot**	**HP-MR**	**18,25**	**54%**	**9,9**
			Plomo		
Sector	Subsector	Correlativo	Concentración Total, Plomo [mg/kg]	% Bioaccesibilidad Fase control Plomo	Concentración Exposición [mg/kg] Plomo
Zona Arica Perímetro	**Hotspot**	**HP-MR**	**50,35**	**56%**	**28,0**

Con estos datos de las muestras obtenidas en los sitios hotspots, se cuantifica el riesgo bajo el escenario realista y muestran en la *Tabla 20* .

Tabla 20: Resultados Riesgo incremental e índice de peligrosidad por presencia de arsénico en Zona Hotspot

Riesgo Acumulado	Total, Vías Exposición: ingesta oral - exposición dérmica-inhalación
	Adultos Residentes
Riesgo Carcinógeno Extra-Cáncer (As)	1,4 E-06
Índice Peligrosidad (IP) Efecto crónico acumulado (As)	0,003
Escenarios	Niños Residentes
Riesgo Carcinógeno Extra-Cáncer (As)	1,1 E-06
Índice Peligrosidad (IP) Efecto crónico acumulado (As)	0,002

De esta forma se observan valores de riesgo ligeramente menores, en un 4% respecto a los del polígono de intervención, lo que se puede explicar debido a la obtención de valores de bioaccesibilidad inferiores a los obtenidos al interior del polígono de intervención (reducción del 33%).

Respecto a la evaluación de riesgo por exposición al plomo para este sector específico, se obtuvo que los niveles de plomo sanguíneo estimados en niños entre 0 y 7 años son inferiores a 2 µg/dL. Específicamente se estimó que será de 1,338 µg/dL y de acuerdo con IEUBKwin, la mayor parte del área bajo la curva está muy por debajo del nivel de referencia igual a 5 µg/dL, y con una probabilidad del 0,252 % de exceder el nivel de referencia teórico.

Esta reducción se explica que en este sector por el menor porcentaje de bioaccesibilidad que la estimada para el polígono completo (reducción del 43%). Estos resultados se muestran en la Figura *16*.

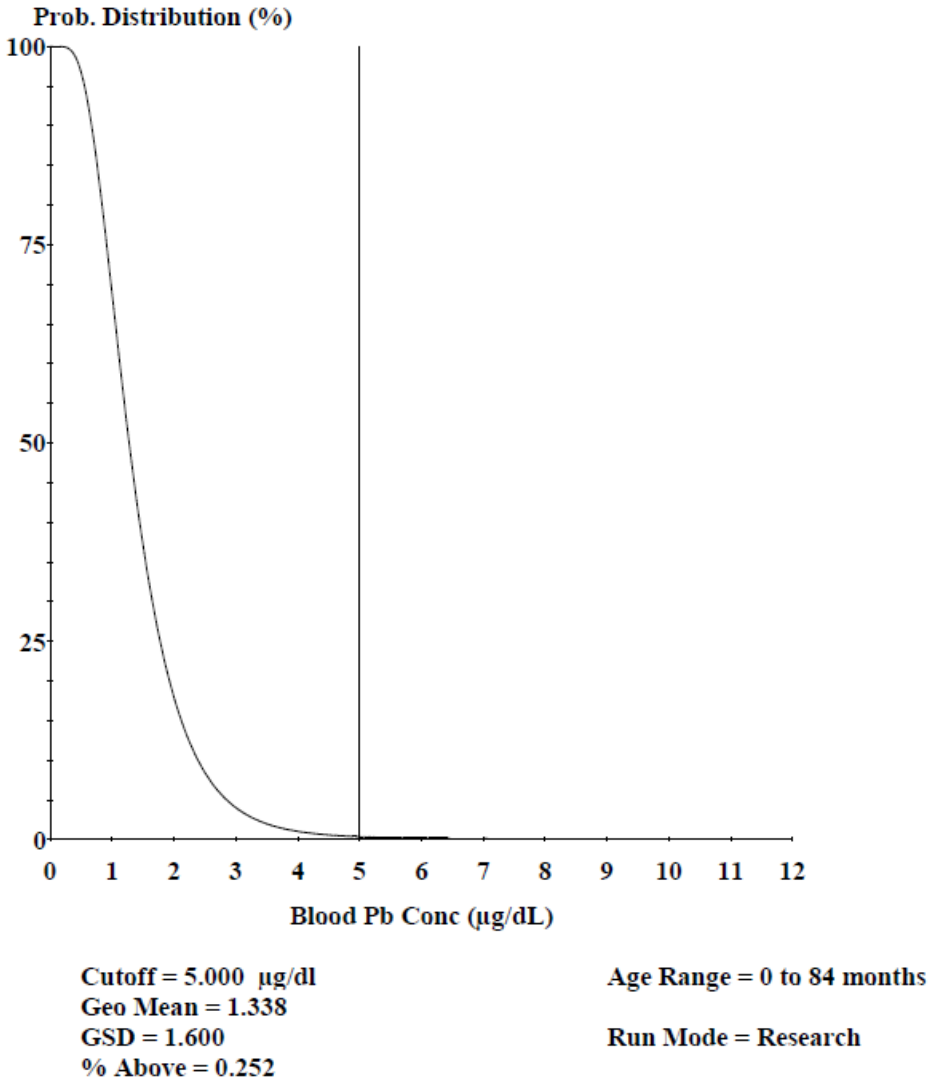


Figura 16 :Curva de distribución de probabilidad de incidencia de plomo en niños sector perimetral, hotspot de Arica

13 Lista de Anexos

Anexo 0 Reunión de reunión de arranque enero 2025 y medios de verificación

Anexo 1.1 Valorización de actividades enviado en enero 2025 planilla excel

Anexo 1.2 Informe comité de Bioseguridad UTEM (informe en pdf)

Anexo 2 Plan de Trabajo y Mapas preliminares previo al pre terreno enero 2025, entregado en reunión de arranque en enero 2025

Anexo 3 Bibliografía

Anexo 4.1 Informe Pre terreno

Anexo 4.2 Medios de verificación visita pre terreno (ppt en JJVV marzo 2025, resoluciones de permisos de salidas, mails de coordinación de actividades, mapas de zonas de muestreo)

Anexo 4.3 Requisitos Técnicos Laboratorio móvil

Anexo 5 La Bioaccesibilidad y su Impacto en la evaluación de riesgos.

Anexo 6 Convenio de transferencia UTEM -MMA

Anexo 7 Convenio de transferencia UTEM -UTA

Anexo 8.1 Ejecución del plan de muestreo en el polígono intervención en Arica
Anexo 8.2 Detección y cuantificación de concentraciones ambientales totales presentes Terreno Arica

Anexo 8.3 Determinación de la distribución espacial de los contaminantes

Anexo 8.4 Análisis de Concentraciones promedio totales, Análisis de Calidad y Análisis estadístico de muestras representativas PXRF y por ICP Óptico

Anexo 8.5 Resultados de Informes de Laboratorio SGS Minerals

Anexo 8.6 Respaldo Capacitación Arqueológica

Anexo 8.7 Resultados de Informes de Laboratorio Silob Chile

Anexo 8.8 Acreditación de Laboratorios externos

Anexo 9 Trabajo con la Comunidad

Anexo 10 Justificación Conceptual Plan de Muestreo Arica

Anexo 11 Ejemplo de Cálculo Bioaccesibilidad

Anexo 12 Análisis de Riesgo