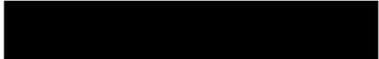


Aporte Norma Primaria CALidad de Suelos

Pablo Moya 

Jue 13-07-2023 15:31

Para:npcasuelos <npcasuelos@mma.gob.cl>

 1 archivos adjuntos (18 MB)

Tesis Moya_Pablo.pdf;

Buenos días,

Adjunto documento de investigación referente a contaminación de suelos en Copiapó.

Saludos,

Pablo Moya Arias



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**IDENTIFICACIÓN DE FUENTES
CONTAMINANTES EN SUELOS Y POLVOS
DE CALLE: EL CASO DE COPIAPÓ, CHILE**

PABLO MANUEL MOYA ARIAS

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
PABLO PASTÉN

Santiago de Chile, marzo, 2017

© 2017, Pablo Manuel Moya Arias



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

IDENTIFICACIÓN DE FUENTES CONTAMINANTES EN SUELOS Y POLVOS DE CALLE: EL CASO DE COPIAPÓ, CHILE

PABLO MANUEL MOYA ARIAS

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

PABLO PASTÉN

HÉCTOR JORQUERA

MARINA COQUERY

HERNÁN SANTA MARÍA

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería
Santiago de Chile, marzo, 2017

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Centro de Desarrollo Urbano Sustentable por apoyar y dar contexto a este proyecto de investigación y a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) por su financiamiento bajo el concurso FONDAP (15110020). También agradecer al *Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture* (IRSTEA) por su recibimiento y ayuda en mi investigación.

Agradezco a la Beca Arturo Cousiño Lyon otorgada por la Fundación San Carlos del Maipo, que me financió durante mi estadía en el programa de Magister en Ciencias de la Ingeniería y también a la beca de estadías cortas en el extranjero de CONICYT que financió mi estadía de investigación en los laboratorios de IRSTEА.

Agradezco encarecidamente a mi profesor Pablo Pastén por todos sus consejos, ayuda, apoyo y guía durante el desarrollo de esta tesis. También a Marina Coquery por su ayuda, consejos y hospitalidad en Francia. Extiendo mi agradecimiento a todo el equipo de trabajo CEDEUS, por su ayuda en las campañas a terreno, trabajo en laboratorio y análisis de resultados.

Por último me gustaría agradecer todo el apoyo que recibí en el Laboratorio de Calidad del Agua y Geoquímica Ambiental de la Pontificia Universidad Católica de Chile, en especial a Fernanda Carrasco, Felipe Medina, Mauricio Medel y Camila Espinoza. Finalmente quiero agradecer la ayuda y los consejos dados por el equipo de los laboratorios de IRSTEА, en particular a Ghislaine Grisot y Josiane Gahou.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xvi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Copiapó, una ciudad minera que busca un desarrollo sustentable en un ambiente semiárido.....	1
1.1.1 Minería, agricultura y aridez en Copiapó.....	1
1.1.2 Salud ambiental: una preocupación de la ciudadanía y del gobierno	3
1.2 Minería y sus efectos en la geoquímica urbana y periurbana.....	6
1.3 Antecedentes de screening geoquímico: un diagnóstico ambiental y de salud preliminar	11
1.4 Preguntas de investigación	13
1.5 Hipótesis.....	14
1.6 Objetivos generales y específicos.....	14
1.7 Objetivo interdisciplinario.....	15
2. METODOLOGÍA.....	16
2.1 Campaña noviembre 2014.....	17
2.1.1 Toma de muestras	17
2.1.2 Tratamiento de las muestras.....	21
2.1.3 Metodología de análisis.....	23
2.2 Campaña abril 2015.....	26
2.2.1 Toma de muestras	27
2.2.2 Preparación de muestras.....	31

2.2.3	Metodología de análisis.....	31
2.3	Campaña octubre 2015.....	32
2.3.1	Toma de muestras.....	34
2.3.2	Preparación de muestras.....	35
2.3.3	Metodología de análisis.....	35
2.3.4	Metodología de cálculo.....	35
2.4	Campaña agosto 2016.....	37
2.4.1	Toma de muestras.....	37
2.4.2	Preparación de muestras.....	38
2.4.3	Metodología de análisis.....	38
2.5	Métodos de caracterización de zonas enriquecidas.....	39
2.5.1	Factor de enriquecimiento.....	39
2.5.2	Mapas de enriquecimiento.....	39
2.6	Métodos para la caracterización de fuentes contaminantes.....	40
2.7	Métodos para la caracterización de mecanismos de transporte.....	41
2.7.1	Vientos.....	41
2.7.2	Aluviones.....	42
2.7.3	Lluvias.....	43
2.8	Métodos para la identificación de fuentes.....	43
2.8.1	Métodos estadísticos.....	43
2.8.2	Métodos de identificación físico-químicos y otros.....	50
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
3.1	Caracterización de fuentes contaminantes.....	51
3.2	<i>Background</i> geoquímico de la zona.....	71
3.3	Concentraciones elementales en matrices sólidas.....	75
3.4	Resultados de otros parámetros.....	101
3.5	Caracterización de mecanismos de transporte.....	103
3.6	Factores de enriquecimiento en la ciudad.....	115
3.7	Identificación de fuentes aportantes.....	132

3.8 Zonificación de la ciudad según aporte de fuentes	157
4. CONCLUSIONES	166
4.1 Calidad de análisis de laboratorio	166
4.2 Valores <i>background</i> para la región	166
4.3 Matrices sólidas urbanas	167
4.4 Pasivos ambientales y dispersión de material minero	168
4.5 Aluviones	169
4.6 Factores de enriquecimiento	169
4.7 Identificación de fuentes contaminantes	170
4.8 Métodos de identificación complementarios del efecto de fuentes contaminantes	172
4.9 Planificación urbana y grupos socioeconómicos	173
5. PERSPECTIVAS	174
BIBLIOGRAFÍA	175

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1-1: Metales pesados relacionados a la minería y sus consecuencias en la salud....	5
Tabla 2-1: Resumen de muestras obtenidas en campaña noviembre 2014.	20
Tabla 2-2: Descripción de tratamientos y análisis realizados a muestras sólidas.	22
Tabla 2-3: Metodología utilizada para medición con ICP-OES.	24
Tabla 2-4: LQ estimado para elementos validados del método p-XRF.	25
Tabla 2-5: Relaves muestreados en Campaña abril 2015.	30
Tabla 2-6: Métodos de cálculo de valores <i>background</i>	36
Tabla 2-7: Metodologías de caracterización según fuente aportante.	40
Tabla 2-8: Herramientas de análisis del ajuste de modelo PMF.	48
Tabla 2-9: Herramientas de análisis de la estabilidad del modelo PMF.	49
Tabla 2-10: Descripción de otros métodos de identificación.	50
Tabla 3-1: Valores promedio de pH, materia orgánica y granulometría para los 9 relaves muestreados.	51
Tabla 3-2: Concentración elemental de relaves en mg/kg mediante p-XRF.	52
Tabla 3-3: Concentración en mg/kg obtenida por en CENMA con ICP-OES en relaves.	53
Tabla 3-4: Concentración de Hg en mg/kg obtenido por CEDEUS e ISP mediante ICP-MS.	53
Tabla 3-5: Concentración de Hg en mg/kg para muestras de tres relaves en fracción menor a 2 mm y menor a 53 µm obtenida con DMA-80.	54
Tabla 3-6: Tipos de vehículos en Copiapó y a nivel nacional.	67
Tabla 3-7: Número de vehículos por 100 habitantes en ciudades de Chile.	68
Tabla 3-8: Número de muestras para el cálculo del valor <i>background</i> después del descarte correspondiente al método para cada elemento.	71
Tabla 3-9: Valores <i>background</i> para la zona de Copiapó según 6 métodos de cálculo.	73
Tabla 3-10: Límite de cuantificación estimado para cada elemento en mg/kg.	77
Tabla 3-11: Resumen de concentraciones elementales en muestras de suelo en mg/kg.	78
Tabla 3-12: Resumen de concentraciones elementales en muestras de polvos de calle en mg/kg.	83
Tabla 3-13: Resumen de concentraciones elementales en muestras de lodos aluvionales en mg/kg, para ambos flujos aluvionales principales.	88
Tabla 3-14: Resumen de concentraciones elementales en mg/kg para muestras <i>background</i> según formación geológica.	95
Tabla 3-15: Porcentaje de finos según matriz sólida.	101
Tabla 3-16: pH según matriz sólida.	102
Tabla 3-17: Materia orgánica (%) según matriz sólida.	103

Tabla 3-18: Número de muestras de suelo gruesas (< 2 mm) con FE en cada clasificación según metal.	116
Tabla 3-19: Número de muestras de suelo finas (< 53 µm) con FE en cada clasificación según metal.....	116
Tabla 3-20: Número de muestras de polvo de calles (< 2 mm) con FE en cada clasificación según metal.	122
Tabla 3-21: Número de muestras de polvo de calles finas (< 53 µm) con FE en cada clasificación según metal.	123
Tabla 3-22: Número de muestras de lodo gruesas (< 2 mm) con FE en cada clasificación según metal.....	128
Tabla 3-23: Número de muestras de lodo finas (< 53 µm) con FE en cada clasificación según metal.....	128
Tabla 3-24: Identificación de minerales característicos de relaves mediante XRD en muestras <i>background</i>	132
Tabla 3-25: Identificación de minerales característicos de relaves mediante XRD en muestras de suelo.	133
Tabla 3-26: Identificación de minerales característicos de relaves mediante XRD en muestras de polvo de calles.....	133
Tabla 3-27: Concentración elemental de filtros PM ₁₀ de Copiapó noviembre 2014.	136
Tabla 3-28: Concentración elemental de filtros PM ₁₀ de Copiapó abril 2015.	136
Tabla 3-29: Análisis de correlación de Pearson para muestras de polvo de calles.	138
Tabla 3-30: Análisis de correlación de Pearson para muestras de suelo.....	138
Tabla 3-31: Análisis de componentes principales para muestras de polvo de calles y de suelos.....	139
Tabla 3-32: Parámetros y calidad de modelación PMF para polvo de calles y suelos de Copiapó.	142
Tabla 3-33: Número de relaves en cada sector según grupo socioeconómico predominante.....	157
Tabla 3-34: Factor de enriquecimiento medio en sectores según grupo socioeconómico predominante.....	159
Tabla 3-35: Contribución media de cada fuente en sectores según grupo socioeconómico predominante.....	160

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1: Relaves y Fundición Paipote en Copiapó.....	3
Figura 1-2: Modelación de dispersión de emisiones desde la fundición Paipote.	4
Figura 1-3: Concentración media anual de arsénico en PM ₁₀ emitido por fundiciones.....	7
Figura 1-4: Modelo conceptual de exposición.....	12
Figura 2-1: Diagrama de metodología.	16
Figura 2-2: Muestras de suelo obtenidas en Campaña noviembre 2014.....	17
Figura 2-3: Muestras de polvo obtenidas en Campaña noviembre 2014.....	18
Figura 2-4: Muestras del relave Porvenir obtenidas en campaña noviembre 2014.	19
Figura 2-5: Muestras de PM ₁₀ obtenidas en Campaña noviembre 2014.....	20
Figura 2-6: Diagrama de tratamientos realizados a las muestras.....	21
Figura 2-7: Muestras de lodos obtenidas en la campaña abril 2015.	28
Figura 2-8: Sectores representativos de muestreo para los dos principales flujos aluvionales de la ciudad.	29
Figura 2-9: Relaves muestreados en campaña abril 2015.....	30
Figura 2-10: Muestras de PM ₁₀ obtenidas en campaña abril 2015.....	31
Figura 2-11: Formaciones geológicas de Copiapó y puntos de muestreo de campaña octubre 2015.....	33
Figura 2-12: Puntos de muestreo de campaña octubre 2015 formación geológica fluvial aguas arriba de Copiapó.....	33
Figura 2-13: Puntos de muestreo en (a) relave San Esteban y (b) relave Papapietro.	35
Figura 2-14: Muestreo de Polvos campaña agosto 2016.	38
Figura 2-15: Ubicación de estaciones meteorológicas en Copiapó.	42
Figura 3-1: Ubicación de Relaves muestreados por el CENMA.	52
Figura 3-2: Concentración de Hg en mg/kg para relaves muestreados en campañas y por CENMA.	55
Figura 3-3: Concentración de Cu en mg/kg para relaves muestreados en campañas y por CENMA.	55
Figura 3-4: Concentración de As en mg/kg para relaves muestreados en campañas y por CENMA.	56
Figura 3-5: Mapa de influencia potencial de los 12 relaves con concentraciones conocidas.....	57
Figura 3-6: Mapa de influencia potencial de todos los relaves cercanos a la ciudad.....	58
Figura 3-7: Transectos A, B, C establecido en la población El Palomar.....	59
Figura 3-8: Concentración de Cu en mg/kg en muestras de polvo y rosa de los vientos anual sobre relave Porvenir.....	59

Figura 3-9: Mapa de influencia estimado para todos los relaves cercanos a la ciudad....	61
Figura 3-10: Ubicación geográfica de Fundición Paipote y centro de Copiapó.	62
Figura 3-11: Rosas de los vientos para la fundición Paipote, en cada estación del año. .	64
Figura 3-12: Rosa de los vientos anual para la fundición Paipote.	65
Figura 3-13: Calles de la ciudad de Copiapó.	66
Figura 3-14: Calles del centro de Copiapó.....	67
Figura 3-15: Plano regulador de Copiapó.	70
Figura 3-16: Calculo del valor <i>background</i> para V según metodología de Lepeltier.	72
Figura 3-17: Calculo del valor <i>background</i> de V según metodología de frecuencia acumulada.	73
Figura 3-18: Concentración de Al en fracción fina y gruesa en muestras de suelo.	79
Figura 3-19: Concentración de As en fracción fina y gruesa en muestras de suelo.....	80
Figura 3-20: Concentración de Na por digestión con Agua Regia y con Ataque total en muestras de suelo.	81
Figura 3-21: Concentración de As por digestión con Agua Regia y con Ataque total en muestras de suelo.	81
Figura 3-22: Concentración de Al en fracción fina y gruesa en polvos de calles.	84
Figura 3-23: Concentración de As en fracción fina y gruesa en polvos de calles.	85
Figura 3-24: Concentración de Na por digestión con Agua Regia y con Ataque total en muestras de polvo de calles.....	86
Figura 3-25: Concentración de As por digestión con Agua Regia y con Ataque total en muestras de polvo de calles.....	86
Figura 3-26: Concentración de Al en fracción fina y gruesa en lodos.....	89
Figura 3-27: Concentración de As en fracción fina y gruesa en lodos.	90
Figura 3-28: Concentración de Na por digestión con Agua Regia y con Ataque total en muestras de lodos.	91
Figura 3-29: Concentración de As por digestión con Agua Regia y con Ataque total en muestras de lodos.	91
Figura 3-30: Formaciones geológicas y rosa de los vientos sobre fundición Paipote.	94
Figura 3-31: Concentración de Al en muestras <i>background</i> superficiales y profundas. .	96
Figura 3-32: Concentración de As en muestras <i>background</i> superficiales y profundas. .	97
Figura 3-33: Concentración de Al en fracción fina y gruesa en muestras <i>background</i> . ..	98
Figura 3-34: Concentración de As en fracción fina y gruesa en muestras <i>background</i> ...	98
Figura 3-35: Concentración de Na por digestión con Agua Regia y con Ataque total en muestras <i>background</i>	99
Figura 3-36: Concentración de As por digestión con Agua Regia y con Ataque total en muestras <i>background</i>	100
Figura 3-37: Rosa de los vientos de Estación Copiapó y modelada por el Explorador eólico, respectivamente.	104

Figura 3-38: Rosa de los vientos de Estación San Fernando y modelada por el Explorador eólico, respectivamente.	104
Figura 3-39: Rosa de los vientos de Estación Paipote y modelada por el Explorador eólico, respectivamente.	105
Figura 3-40: Rosa de los vientos sobre relave Porvenir.	106
Figura 3-41: Relave Porvenir en valle encajonado.	107
Figura 3-42: Mapa de Copiapó con las principales dirección de viento en puntos de interés en la ciudad.	109
Figura 3-43: Zona de Copiapó inundada por lodos aluvionales.	110
Figura 3-44: Relave Planta Matta erosionado por flujo aluvional.	111
Figura 3-45: Factor de enriquecimiento en sectores representativos de muestreo, flujo aluvional en quebrada de Paipote.	113
Figura 3-46: Factor de enriquecimiento en sectores representativos de muestreo, flujo aluvional en río Copiapó.	114
Figura 3-47: Mapa de FE para As en muestras de suelo.	118
Figura 3-48: Mapa de FE para Cu en muestras de suelo.	119
Figura 3-49: Mapa de FE para Hg en muestras de suelo.	120
Figura 3-50: Mapa de FE para Pb en muestras de suelo.	121
Figura 3-51: Mapa de FE para As en muestras de polvo de calles.	124
Figura 3-52: Mapa de FE para Cu en muestras de polvo de calles.	125
Figura 3-53: Mapa de FE para Hg en muestras de polvo de calles.	126
Figura 3-54: Mapa de FE para Pb en muestras de polvo de calles.	127
Figura 3-55: Mapa de FE para Hg en muestras de lodos.	129
Figura 3-56: Comparación entre porcentaje de muestras de suelo y polvo de calles en cada clasificación de FE para diversos elementos.	131
Figura 3-57: Imagen SEM de partícula esférica y su composición elemental encontrada en muestra de polvo P845.	134
Figura 3-58: Imagen SEM de partícula esférica y su composición elemental encontrada en muestra de suelo S125.	135
Figura 3-59: Perfil químico de los factores en modelo PMF para polvos de calles.	144
Figura 3-60: Perfil químico de los factores en modelo PMF para suelos.	145
Figura 3-61: Mapa de contribución del Factor Relaves ricos en Hg a muestras de polvos de calles.	147
Figura 3-62: Mapa de contribución del Factor Natural a muestras de polvos de calles.	148
Figura 3-63: Mapa de contribución del Factor Tráfico a muestras de polvos de calles.	149
Figura 3-64: Mapa de contribución del Factor Relaves de Cu a muestras de polvos de calles.	150
Figura 3-65: Mapa de contribución del Factor Procesos Mineros a muestras de polvos de calles.	152

Figura 3-66: Mapa de contribución del Factor Natural a muestras de suelos.....	153
Figura 3-67: Mapa de contribución del Factor Prácticas Agrícolas a muestras de suelos.	154
Figura 3-68: Mapa de contribución del Factor Relaves de Cu a muestras de suelos.....	155
Figura 3-69: Mapa de contribución del Factor Relaves ricos en Hg a muestras de suelos.	156
Figura 3-70: Relaves y grupos socioeconómicos predominantes en Copiapó.....	158
Figura 3-71: Zonas de la ciudad según nivel de aporte de la fuente Natural.....	161
Figura 3-72: Zonas de la ciudad según nivel de aporte de la fuente Procesos Mineros.	162
Figura 3-73: Zonas de la ciudad según nivel de aporte de la fuente Relaves de Cu.....	163
Figura 3-74: Zonas de la ciudad según nivel de aporte de la fuente Relaves ricos en Hg.	164
Figura 3-75: Zonas de la ciudad según nivel de aporte de la fuente tráfico.....	165

RESUMEN

En el árido Desierto de Atacama se emplaza la ciudad de Copiapó, que en su zona urbana y periurbana posee más de 30 relaves mineros, una fundición y alberga a 150.000 habitantes. El rápido desarrollo de la minería industrial durante el siglo XIX y el crecimiento urbano no planificado ha generado preocupación pública sobre la presencia de metales en suelos y polvos de calles de la ciudad. Se realizaron tres campañas de muestreo y se estudió la composición elemental de los suelos urbanos, los polvos de calle y muestras *background*. Se implementó un modelo de receptor, Matriz de Factorización Positiva (PMF), para relacionar el enriquecimiento de metales en los suelos urbanos y polvos de calles de la ciudad con las posibles fuentes de contaminación. Otras técnicas fueron utilizadas para complementar y evaluar el modelo: análisis de correlación (CA), difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM), factores de enriquecimiento (FE), mapas de distribución espacial, entre otros. Los resultados indican que los relaves y la fundición de cobre están relacionados con el enriquecimiento en metales de las matrices sólidas de la ciudad. El modelo PMF en polvos de calles estableció la contribución de cada fuente a las diferentes áreas de Copiapó. Se identificaron variadas fuentes de metales y se estimó su aporte a los polvos de calle: los procesos mineros (88% del Cu y 49% del As de las muestras), los antiguos relaves mineros ricos en Hg (88% del Hg), emisiones del tráfico vehicular (81% del Pb) y fuentes naturales (64% del Ca y 72% del Sr). El modelo PMF aplicado a suelos de la ciudad, estimó el aporte porcentual de los relaves (62% del Cu y 70% del Hg), las prácticas agrícolas (59% del Na) y la fuente natural (más del 52% de Al, Ca, Cr, Li, Mg y Ni). Los resultados de ésta investigación son necesarios para definir estrategias de planificación urbana, valores límites de metales para usos de suelo, apoyar la evaluación de riesgo a la salud y para establecer futuras prioridades de intervención.

Palabras Claves: polvo de calles, Matriz de Factorización Positiva, relaves mineros no contenidos, fundición de cobre, metales pesados.

ABSTRACT

The urban and periurban area of Copiapó in the arid Atacama desert has more than 30 abandoned mine tailings, one active smelter, and 150,000 inhabitants. Fast development of the mining industry during the 19th century and unplanned growth has led to public concern about the presence of metals in urban and periurban soils and street dust. We conducted three sampling campaigns, we studied the elemental composition of urban soils, street dust and periurban geomaterials that represent of the local background. A Positive Matrix Factorization receptor model was used to connect observed metal enrichment in urban soils and street dusts with possible sources, complemented with correlation analyses (CA), X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), analysis of enrichment factors (FE) and spatial distribution maps of metals. Results showed that legacy mine tailings and the copper smelter emissions were related to urban metal enrichment. The PMF street dust model estimated the contribution of each source to different areas in Copiapó, estimating the apportionment of sources such as the copper smelter (88% of Cu and 49% of As), unconfined mine tailings (88% of Hg), traffic (81% of Pb) and crustal sources (64% of Ca and 72% of Sr). The PMF urban soil model estimated the contribution of tailings (62% of Cu and 70% of Hg), agricultural practices (59% of Na) and crustal sources (more than 52% of Al, Ca, Cr, Li, Mg and Ni). The information generated by this research will be a necessary input to defining urban planning strategies and land use guidelines, defining health risk assessment studies, and for future evaluation of intervention priorities.

Keywords: street dust, soil, Positive Matrix Factorization, mine tailings, copper smelter, heavy metals, urban geochemistry, Copiapó.

1. INTRODUCCIÓN

Esta tesis se enmarca en el Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) como parte del trabajo llevado a cabo por el grupo de geoquímica urbana del *cluster* de Recursos Críticos. El desarrollo urbano sustentable presenta múltiples desafíos para las ciudades, especialmente las ubicadas en sectores áridos, como el Desierto de Atacama. La escasez hídrica con que conviven y las actividades económicas como la minería y la agricultura, presentan problemas para ciudades en desarrollo. Una inadecuada planificación urbana ha contribuido en los problemas de enriquecimiento de metales dentro de las ciudades, creando un potencial riesgo a la salud para las personas. Este trabajo se enfoca en caracterizar la ocurrencia de contaminantes, comprender su dinámica, identificar las fuentes que los producen, para gestionarlas y a futuro influir en los instrumentos de planificación del territorio y así conducir estas ciudades a un desarrollo más sustentable. Este capítulo sintetiza y analiza las condiciones actuales e históricas de la ciudad de Copiapó, su estado medio ambiental, los efectos de la minería y los antecedentes de diagnóstico ambiental realizados en la zona, para finalizar con la hipótesis de estudio y preguntas de esta investigación.

1.1 Copiapó, una ciudad minera que busca un desarrollo sustentable en un ambiente semiárido

1.1.1 Minería, agricultura y aridez en Copiapó

La ciudad de Copiapó es la capital de la provincia de Copiapó y de la región de Atacama de Chile, tiene 166.751 habitantes y abarca una superficie de 47,77 km² (INE, 2005). El clima de Copiapó, se clasifica como semiárido con precipitaciones de 18 mm anuales y temperatura media de 16,1°C. El periodo seco se extiende desde agosto a mayo y las precipitaciones se concentran en los meses de junio y julio, con aproximadamente 6 mm en estos meses (DGA, 2004).

La cuenca del río Copiapó abarca una superficie total de 18.047 km². Este río tiene un largo de 162 km, se origina en la confluencia del río Jorquera y Pulido, su cauce luego

llega a la quebrada de Paipote de largo 90 km, donde finalmente alcanza la ciudad de Copiapó para luego desembocar en el mar (DGA, 2004).

Luego de la fundación de Copiapó en 1744, comenzó la explotación de minerales de plata, oro y cobre, que consecuentemente llevaron al crecimiento de la ciudad. En 1832 se descubre la veta Chañarcillo y el yacimiento Tres Puntas, ambos minerales de plata, lo que dio inicio a la etapa minera industrial de la ciudad. El desarrollo económico relacionado a las actividades mineras trajo consigo el crecimiento demográfico y físico de la ciudad, como también el aumento de los servicios públicos y la agricultura, para el sustento de la población (Programa de Naciones Unidas para el Medio ambiente América Latina y el Caribe, 2008).

Debido al decaimiento de estos dos yacimientos mineros, la población de Copiapó se desplazó a otras zonas con sectores económicos de interés para la época (salitre y agricultura), afectando así fuertemente la economía de la ciudad. El estado de Chile para incentivar la pequeña y mediana minería fundó en 1947 la fundición Paipote, se incrementó así aún más el crecimiento urbano y demográfico de la ciudad (Programa de Naciones Unidas para el Medio ambiente América Latina y el Caribe, 2008).

Históricamente la minería ha sido la principal actividad económica de la ciudad de Copiapó (45% del PIB regional y 10% de la mano de obra), seguida de la agricultura (11% del PIB regional) y del comercio (11% del PIB regional). Actualmente existen 54 faenas mineras activas, que explotan el mineral de cobre y oro; la principal faena es la minera Candelaria con 210.000 toneladas de concentrado de cobre al año. Por otro lado, la actividad agrícola se centra en la producción y exportación de frutos, exportando cerca del 85% de la producción total de la zona. La principal producción frutícola es la uva, que gracias a los avances en las tecnologías de riego ha logrado alcanzar mercados internacionales, también se producen otros frutos de exportación como limones, manzanas y clementinas (Programa de Naciones Unidas para el Medio ambiente América Latina y el Caribe, 2008).

1.1.2 Salud ambiental: una preocupación de la ciudadanía y del gobierno

A causa de la larga historia minera de Copiapó y de la nula regulación ambiental y territorial existente, hoy en día la zona urbana y periurbana de la ciudad posee más de 30 relaves mineros considerados como pasivos ambientales (Figura 1-1).

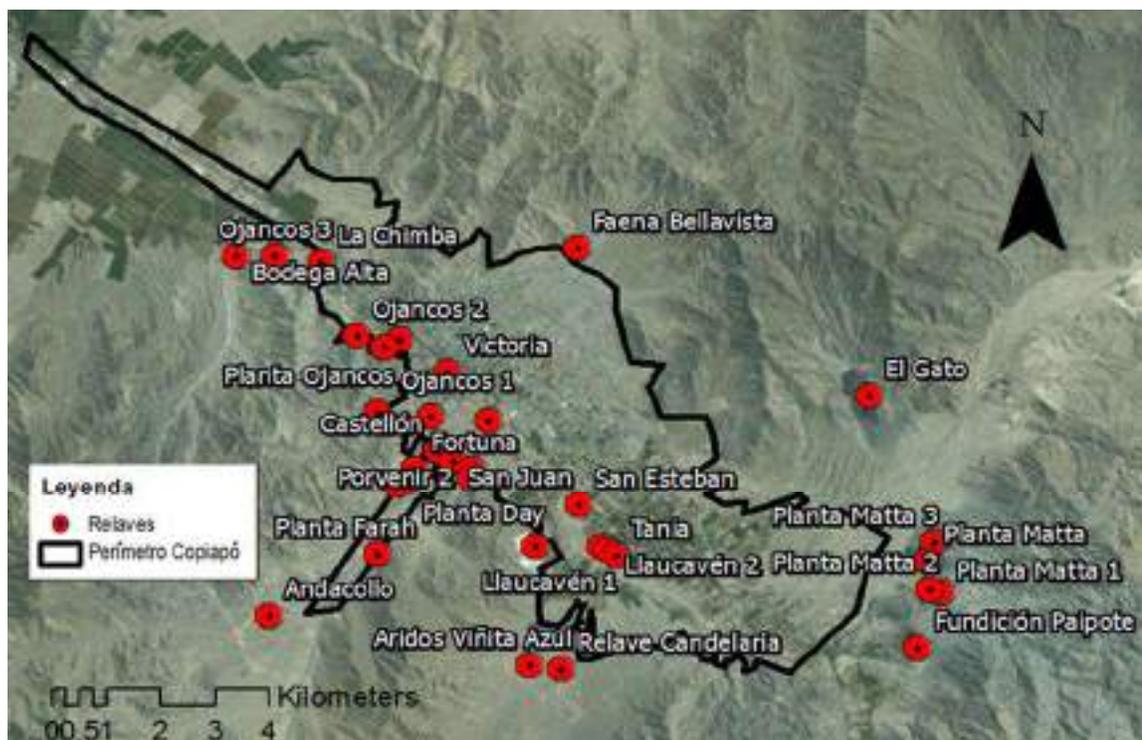


Figura 1-1: Relaves y Fundición Paipote en Copiapó. La mayor parte de los relaves mineros se encuentran dentro del perímetro urbano de Copiapó y la Fundición de cobre Paipote se ubica a 8 km del centro de la ciudad. Fuente: Elaboración propia.

Estos antiguos depósitos mineros, no poseen medidas de control de cierre y muchos simplemente se abandonaron. Dada las condiciones de aridez de la región, la erosión eólica es el principal mecanismo de transporte del material de relave (Comero, Servida, De Capitani, & Gawlik, 2012; Davies & White, 1981; Meza-Figueroa et al., 2009; Navarro et al., 2008; Sims, Hooda, & Gillmore, 2013), este se transporta hacia la ciudad y se deposita en todo tipo de superficies, calles, suelos, techos, jardines, plazas, etc. Se ha demostrado que el transporte de material de relave consecuencia de la erosión eólica, puede llegar a impactar a más de 1.8 km desde el depósito mineral (Davies & White, 1981),

esto torna la situación de Copiapó una preocupación debido a la potencial área afectada por los múltiples relaves dentro de la ciudad y la consecuente exposición a metales.

Por otro lado, modelaciones realizadas por Williams and Brown (1994), muestran que las emisiones de la Fundición de cobre Paipote principalmente se distribuyen hacia Tierra Amarilla, y que dependiendo de las condiciones de viento pueden alcanzar la ciudad de Copiapó. Estas modelaciones sugieren que las matrices sólidas de Copiapó son afectadas por las emisiones de la fundición al igual que los suelos naturales de los alrededores, debido principalmente a procesos de deposición atmosférica de material rico en metales pesados. En la Figura 1-2 se muestran cuatro condiciones de viento para la modelación realizada, la emisiones de la fundición alcanzarían la ciudad y las zonas aledañas dependiendo de las condiciones de viento.

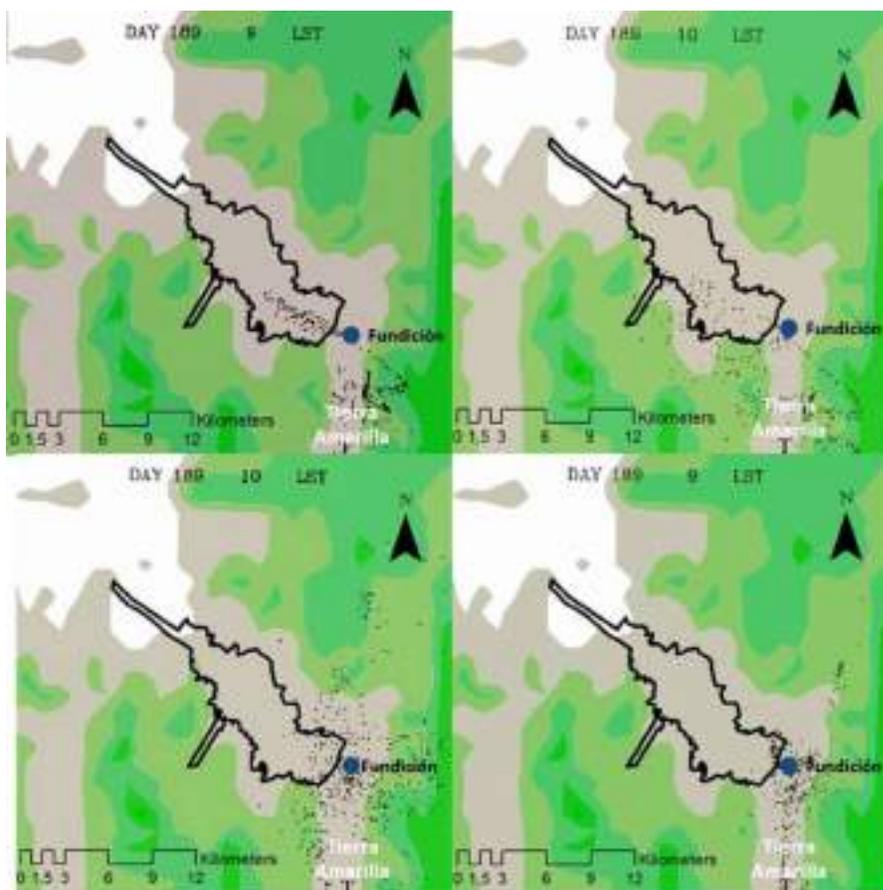


Figura 1-2: Modelación de dispersión de emisiones desde la fundición Paipote. Según sean las condiciones de viento durante la liberación de emisiones, las partículas pueden alcanzar Copiapó, Tierra Amarilla o el área natural. Fuente: Elaborado en base a Williams and Brown (1994).

El material arrastrado de los relaves y la deposición atmosférica proveniente de la fundición, puede contener diversos metales pesados que exponen a la población a diferentes problemas de salud. Algunos de los metales pesados más nocivos para la salud y que están asociados a procesos mineros se nombran en la Tabla 1-1

Tabla 1-1: Metales pesados relacionados a la minería y sus consecuencias en la salud.

Arsénico	Cuando existe una exposición aguda al arsénico, se producen diversos malestares, incluyendo problemas de presión sanguínea baja, dolor del tracto gastrointestinal y hemorragias, edemas pulmonares, anemia y destrucción de glóbulos rojos, necrosis del hígado y fallas renales. En el caso de exposiciones crónicas, se asocia con desordenes y cáncer a la piel, leucemia aguda, delirios, encefalopatías y neuropatías.
Cobre	A pesar de que el cobre es un elemento esencial y existe una ingesta diaria mínima recomendada, en caso de alta ingesta o inhalación pueden observarse inflamación intestinal y hepática, destrucción de las células sanguíneas e hiperglicemia.
Mercurio	El mercurio es uno de los elementos más tóxicos, la exposición crónica a este metal pesado puede conducir a temblores y otros desórdenes del sistema nervioso central. También causa daño a los riñones y pulmones. En casos de exposición aguda a este contaminante se puede producir daño severo al sistema nervioso central y periférico, daño al sistema gastrointestinal y falla renal. Por otro lado, el mercurio también es un teratógeno, es decir, produce mal formaciones en fetos si la madre es expuesta en periodo de gestación.
Plomo	El plomo es un metal muy tóxico en especial en fetos y niños. Es un neurotóxico y puede producir retraso mental. Además, se han observado malformaciones vertebrales, cardiacas, renales y en extremidades de recién nacidos. En personas adultas, el plomo puede aumentar la presión sanguínea y causar infertilidad, trastornos nerviosos, irritabilidad y afectar capacidades de concentración y memoria. Al ser ingerido o inhalado puede permanecer inmóvil por muchos años, acumulándose usualmente en los huesos, de modo que la intoxicación por plomo más frecuente es la crónica. La Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC) clasificó al plomo y sus compuestos inorgánicos como compuesto químico que puede causar cáncer en los humanos.

Fuente: Elaborado en base a Plumlee y Ziegler (2003)

1.2 Minería y sus efectos en la geoquímica urbana y periurbana

Aunque la minería es el principal sector económico de Chile, las consecuencias de esta actividad sobre la salud ambiental han sido frecuentemente un foco de interés. Dos procesos clave de la emisión de contaminantes son la fundición de los minerales y el depósito final de los residuos.

La contaminación originada en fundiciones, ha sido ampliamente estudiada en el mundo y en Chile. Un caso relevante de estudio es el de una fundición de hierro a 9 km de una ciudad; este complejo industrial ha contaminado con manganeso, zinc, cobre, plomo y hierro los suelos del centro urbano (Nezhad, Tabatabaii, & Gholami, 2015). Por otro lado, en Chile las fundiciones se han estudiado desde la perspectiva de sus emisiones atmosféricas: en 1999 las emisiones atmosféricas de arsénico representaron el 24% de las emisiones globales (Gidhagen, Kahelin, Schmidt-Thomé, & Johansson, 2002). Las emisiones de las fundiciones de cobre Caletones y Ventanas, se caracterizaron por altas concentraciones de arsénico, cobre, plomo y zinc (Hedberg, Gidhagen, & Johansson, 2005; Romo-Kröger, Morales, Dinator, Llona, & Eaton, 1994). Estas emisiones pueden impactar un radio desde 10 a 100 km dependiendo de las condiciones de viento (Gidhagen et al., 2002). La dispersión de las emisiones de siete fundiciones de cobre en Chile, incluida Paipote, se presenta en la Figura 1-3, donde los cuadros negros son ciudades o poblados de importancia.

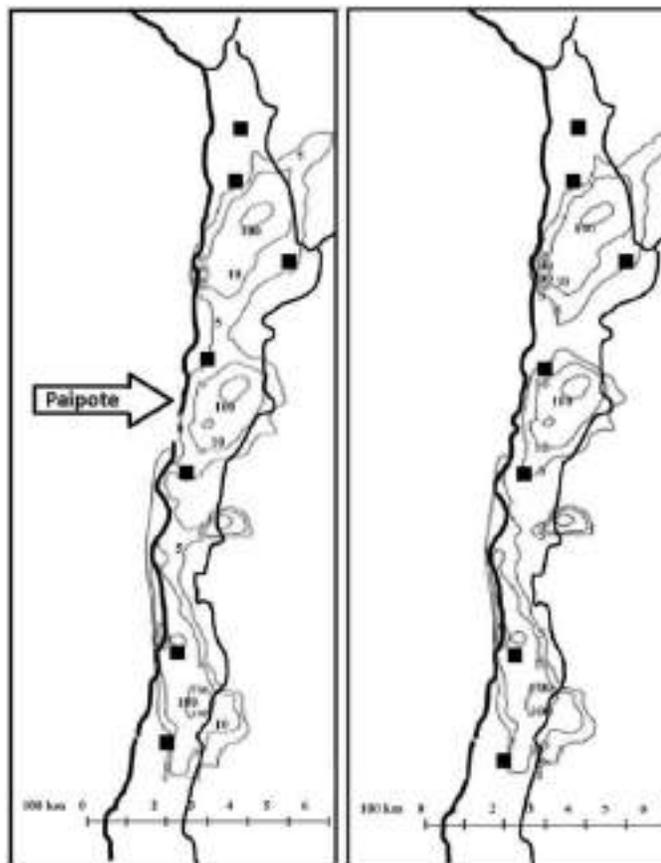


Figura 1-3: Concentración media anual de arsénico en PM_{10} emitido por fundiciones. Las emisiones de As de las fundiciones en el norte de país abarcan gran parte del territorio norte del país. Fuente: Elaborado en base a Gidhagen et al. (2002).

Las emisiones atmosféricas se depositan en superficies, incluidos los suelos, calles, estructuras y vegetación. En Chile el estudio de los suelos afectados por las emisiones de fundiciones de cobre se ha realizado para Ventanas en la zona central y la fundición de Chuquicamata en la Región de Antofagasta. Se encontró que los suelos se ven enriquecidos en mayor cantidad a medida que se acercan a las fundiciones y que el enriquecimiento se da principalmente en metales como arsénico, cobre, zinc, plomo, antimonio y mercurio (De Gregori, Fuentes, Rojas, Pinochet, & Potin-Gautier, 2003; Parra, Bravo, Quiroz, Querol, & Paipa, 2015; Rueda-Holgado, Calvo-Blázquez, Cereceda-Balic, & Pinilla-Gil, 2016; Salmanighabeshi et al., 2015).

El otro proceso minero de importancia para la contaminación ambiental, es el depósito adecuado de los residuos mineros. Antiguamente los relaves eran dejados a la intemperie

a la merced del clima, provocando el transporte de los contaminantes a zonas cercanas. Se han realizado estudios de sitios mineros abandonados y cómo estos afectan a los suelos y ríos cercanos, descubriendo que en la dispersión de material de relave predomina el efecto de la erosión del viento (Navarro et al., 2008). Por otro lado, se ha estudiado también el efecto de la antigua minería, la metalurgia y relaves cercanos en la geoquímica urbana, estudiando los suelos y polvos de las calles en cuanto a su carga de metales pesados. Se descubrió que las concentraciones de mercurio y arsénico en ambas matrices sólidas tenían altos valores y que se encontraban altamente relacionados a los relaves cercanos a la ciudad (Loredo, Ordóñez, Charlesworth, & De Miguel, 2003).

Un caso muy similar al de la ciudad de Copiapó se estudió en México, donde existen relaves mineros no confinados cercanos a áreas residenciales. Se analizó la composición elemental y mineralógica de suelos y polvos de calles, encontrando altas concentraciones de cobre y arsénico en los suelos más cercanos a los relaves. Por otro lado, se concluyó que el viento es el principal mecanismo de transporte asociado a las concentraciones de metales en ciudades de condiciones áridas (Meza-Figueroa et al., 2009).

Algunos otros casos nacionales que se encuentran relacionados a los relaves de la minería son por ejemplo el poblado de Andacollo que consta con 103 relaves en toda la comuna. Se han realizado estudio de la composición de estos depósitos de minerales (Leiva G. & Morales, 2013), de los efectos de salud que puede tener la minería artesanal en los mineros (Corral et al., 2013) y además del riesgo al que se expone la población (CENMA, 2011), concluyendo que la población de Andacollo posee consecuencias en su salud. De la misma manera, en Chañaral existe un monitoreo a lo largo de varios años donde se evaluó la cantidad de metales que pobladores expelen en su orina y que contienen en su sangre (Cortes, 2009), principalmente población que ha vivido en la ciudad durante años y se ha visto expuesta a uno de los más grandes pasivos ambientales de Chile.

Otro caso nacional y emblemático fue el de “Polimetales de Arica”, donde el transporte de material minero contaminó amplios sectores de la ciudad. Esto implicó y obligó a las autoridades a trasladar a la población con mayor riesgo de salud debido a la potencial exposición a arsénico y plomo, como también a remediar los suelos que presentan una mayor contaminación (Agriquem América S.A., 2009; HABITERRA S.A, 2011).

En Copiapó, el Centro Nacional de Medio Ambiente (CENMA), ha realizado esfuerzos de caracterización de los relaves dentro de la ciudad. Se realizó una caracterización preliminar de 5 relaves en Copiapó, obteniendo sus concentraciones elementales, además se analizaron suelos cercanos a ellos para evaluar posible contaminación, exponiendo la problemática existente en la ciudad (CENMA, 2012). La dispersión de los metales dentro de la ciudad no ha sido abarcada en estudios, el único acercamiento existente es referente a la caracterización del material particulado sedimentable en las techumbres de Copiapó. En este estudio se detectaron altas concentraciones de plomo en algunos sectores de la ciudad, pero no se pudo establecer una relación real del efecto de los relaves en la contaminación en la ciudad (Villarroel et al., 2009).

En cuanto a la realización de diagnósticos ambientales en base a muestras de polvo de calles, en Chile, no existen estudios al respecto (además del trabajo realizado por equipo de geoquímica urbana de CEDEUS). El material que se deposita en las calles acumula y es el sumidero de todo el material erosionados de los relaves como también recibe el aporte de suelos potencialmente contaminados y la deposición atmosférica de las industrias, es también un indicador del enriquecimiento de metales y tiene la ventaja de ser representativo de un periodo de tiempo en el lugar (Acosta, Faz, Kalbitz, Jansen, & Martínez-Martínez, 2014; Salim & Madany, 1993; Wong, Li, & Thornton, 2006). A pesar de la falta de estudios en Chile, internacionalmente se ha correlacionado el daño a la salud de la población en base a la ocurrencia de metales pesados en polvos de calles (Benhaddya, Boukhelkhal, Halis, & Hadjel, 2016; Kim, Park, & Hwang, 2016; Sun et al., 2017) demostrando así como la toma de muestras es relevante para conocer la real exposición a metales pesados y cómo potencialmente podrían afectar la salud de la población.

Mundialmente se han realizado diversos esfuerzos para estimar la concentración de metales que naturalmente existen en cada país. El proyecto SURGE (*Soil Urban Geochemistry Project*) desarrollado en Europa ha tomado muestras de suelos urbanos con el objetivo de analizar y obtener la concentración de elementos para 10 ciudades y crear así mapas de distribución (Glennon, Harris, Ottesen, Scanlon, & O'Connor, 2014).

A nivel país en el año 2011 se inició el programa de cartografía geoquímica a cargo del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Se contempla la realización

de un mapa geoquímico de Chile que tiene como objetivo la búsqueda de anomalías geoquímicas y así generar una guía de las futuras exploraciones mineras como también utilizarlo como línea base para estudios medioambientales. (SERNAGEOMIN, 2014). Para lograr esto el país fue dividido en hojas de estudio, para luego realizar un muestreo de sedimentos en una grilla de 20 km² que se densifica en las redes de drenaje; en total se midieron 59 elementos en las muestras (SERNAGEOMIN, 2014). En base a los objetivos nombrados previamente la metodología utilizada por el SERNAGEOMIN es correcta, sin embargo no es útil para realizar estudios locales debido a la gran escala de muestreo. Para casos como el de Copiapó, o enfocados en otras ciudades, es necesario un nivel de muestreo más detallado y centrado en realizar una caracterización de las zonas aledañas a la ciudad.

La inexistencia de normas de calidad de suelos en Chile provoca una situación de desconocimiento en el ámbito nacional respecto a potenciales situaciones de contaminación o enriquecimiento de origen humano. Lo anterior debido a que los únicos niveles de referencia existentes, y que tienen un indicio referente a la contaminación, es el estudio de Polimetales de Arica donde se establecieron niveles de plomo y arsénico que son riesgosos para la salud. Por otro lado, el mapa geoquímico de Chile indica una alta heterogeneidad “natural” en todas las regiones que se han estudiado, lo que no permitiría establecer normas de suelo a nivel nacional.

Además de la inexistencia de la información referente a concentraciones de elementos en suelos naturales, tampoco se conoce el efecto de las acciones humanas en los suelos naturales del país. En el caso de la región de Atacama existen dos fundiciones mineras Potrerillos y Paipote, estudios que indican que las emisiones atmosféricas de ambas alcanzan un efecto a nivel regional (Gidhagen, Kahelin, Schmidt-Thomé, & Johansson, 2002) y debido a procesos de deposición atmosférica pueden enriquecer suelos que se creen no intervenidos por el ser humano. Estas emisiones pueden impactar un radio desde 10 a 100 km dependiendo de las condiciones de viento (Gidhagen et al., 2002). La dispersión de las emisiones de siete fundiciones de cobre en Chile, incluidas Paipote y Potrerillos, se presenta en la Figura 1-3, donde los cuadros negros son ciudades o poblados del norte del país.

A pesar de la amplia investigación que se ha realizado en torno a la contaminación de origen minero, no se ha investigado ningún caso como el de la ciudad de Copiapó, donde existen cerca de 30 relaves en la zona urbana y periurbana, y una fundición de cobre a menos de 10 km del centro de la ciudad.

1.3 Antecedentes de screening geoquímico: un diagnóstico ambiental y de salud preliminar

Un screening geoquímico es una metodología utilizada para realizar una caracterización rápida y preliminar del estado de la contaminación en un lugar de interés, en este caso, aplicado a las matrices sólidas de la ciudad de Copiapó. Con este estudio realizado en noviembre de 2014, se buscó evaluar la presencia de metales pesados en polvos de calles, suelos (agrícolas y de parques urbanos), muestras de agua (potable, natural y servida) y medición de material particulado menor a 10 μm (PM₁₀).

La concentración elemental de las muestras sólidas fue obtenida mediante la técnica de fluorescencia de rayos X portable (p-XRF), los resultados muestran que existen altas concentraciones de cobre (10.224 mg/kg), arsénico (489 mg/kg), zinc (2.743mg/kg), y plomo (417 mg/kg) en suelos y polvos de la ciudad. Con este estudio se expuso el enriquecimiento existente en las zonas residenciales, industriales y agrícolas. Además se observó que la distribución espacial de las concentraciones para estos metales es distinta, sugiriendo que poseen orígenes distintos, es decir, fuentes contaminantes diversas. Más detalles sobre esta campaña y sobre los resultados se pueden encontrar en el artículo científico “*Active and legacy mining in an arid urban environment: challenges and perspectives for Copiapó, Northern Chile*” recientemente publicado.

Además se estudió preliminarmente el riesgo potencial de los niños menores de 6 años en la ciudad de Copiapó, la población más expuesta a estos contaminantes. En la Figura 1-4 se indican las potenciales vías de exposición para la ciudad de Copiapó. Donde se destacan la ingestión de material o la inhalación como las principales vías por las que la población se expone al suelo o polvo de calles enriquecido en metales. El estudio de la biodisponibilidad de metales indicó que el Cd, Zn y Fe fueron los metales con más alta biodisponibilidad en las matrices sólidas urbanas (Calcagni, 2016). Debido a la falta de

regulación ambiental y de salud en Chile, con respecto al contenido de metales, se calculó un coeficiente de riesgo (HQ) el que compara una dosis estimada por la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) con una dosis calculada en base a las concentraciones ambientales de Copiapó. Se demostró que el Co, Cu y As son potencialmente un problema para la salud de niños menores de 6 años mediante la ingesta oral de material enriquecido (Calcagni, 2016).

Dada la situación anterior los principales desafíos a los que se expone Copiapó son a una planificación territorial adecuada y que considere el enriquecimiento de metales existente, estrategias de control de los pasivos ambientales y a normas de calidad de suelos inexistentes en el país. Además, algunas necesidades detectadas con esta primera campaña de screening geoquímico, fue la identificación de las fuentes que originan la contaminación, como también la diferenciación entre el aporte natural y antropogénico a las matrices sólidas de la ciudad.

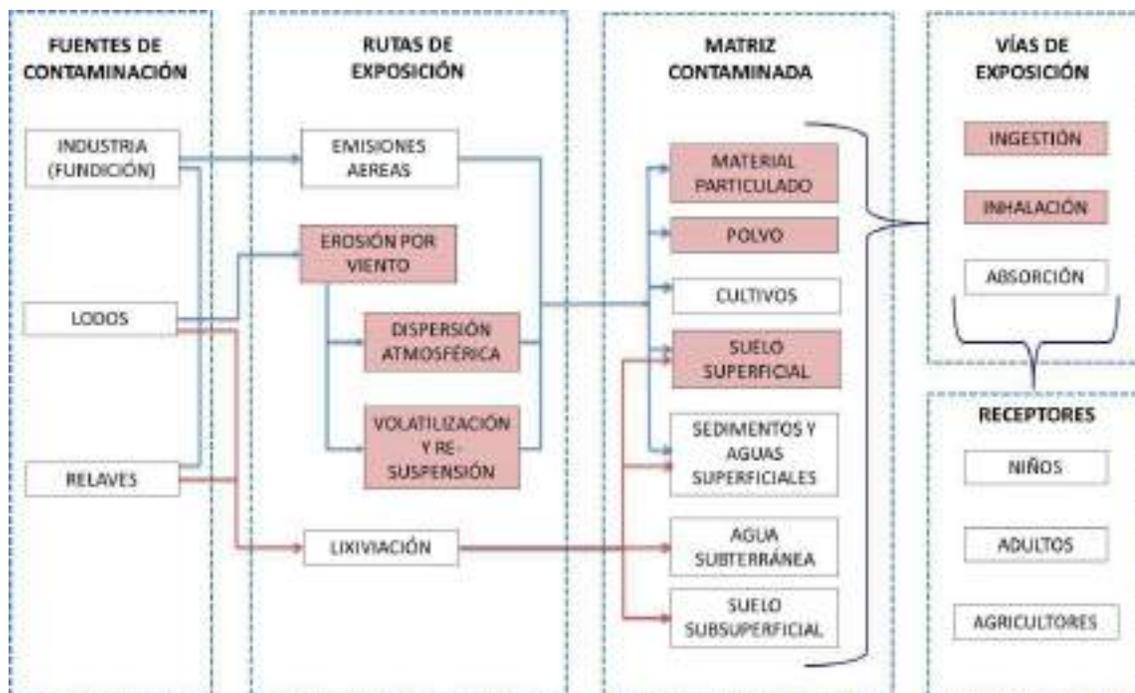


Figura 1-4: Modelo conceptual de exposición. Se indican las potenciales fuentes de contaminación, las rutas de exposición, posibles matrices contaminadas, vías de exposición y receptores. En rojo se destacan las secciones predominantes en Copiapó. Fuente: CEDEUS, 2015.

1.4 Preguntas de investigación

El desarrollo de áreas urbanas en zonas áridas impactadas por la minería presenta desafíos importantes de sustentabilidad. Algunas temáticas son la escasez hídrica, la mayor dispersión de contaminantes, la unión de zonas urbanas e industriales, potenciales peligros a la salud de la población, enriquecimiento de suelos y un desarrollo no planificado de la ciudad. Por otro lado, un aspecto que representa un potencial riesgo y todavía es desconocido en su dinámica y ocurrencia son los polvos de calles. Estos son buenos indicadores porque capturan la historia de la ciudad y pueden proveer un mejor acercamiento a los efectos que tienen las fuentes en la ciudad, a la conexión de la ocurrencia y la exposición y los efectos de salud en la población.

En el área de Copiapó existen muchos relaves y fuentes de emisiones atmosféricas, como también un alto componente natural. Se ha realizado un primer screening, pero falta por conocer la composición de los relaves a los que se expone la población, el efecto de las fuentes antropogénicas en la ciudad, las concentraciones naturales de metales en la región, el riesgo a la salud al que se expone la población, el efecto de los lodos aluvionales en las concentraciones de metales en la ciudad, cómo se realizará la integración del enriquecimiento en los instrumentos de planificación territorial, cómo controlar las fuentes de contaminación y las prioridades de intervención que deben establecerse, entre otros.

Diversas preguntas de investigación surgen en base a la discusión anterior:

- ¿Puede identificarse el efecto de las fuentes, naturales y antropogénicas, en las matrices sólidas de la ciudad?
- ¿Qué zonas son las más afectadas por el enriquecimiento de metales y cuáles tienen una causa predominantemente antropogénica?
- ¿Cuál es la concentración natural de metales en el área cercana a la ciudad?
- ¿Qué fuente es la de mayor aporte a las matrices sólidas?
- ¿Cómo afectaron los aluviones a las condiciones geoquímicas de la ciudad?
- ¿Existen desigualdades socioeconómicas que se relacionen con las fuentes de contaminación y el enriquecimiento de metales?

1.5 Hipótesis

El enriquecimiento de las matrices sólidas urbanas de Copiapó es consecuencia de las emisiones de origen antropogénico. A través de modelos de receptor, métodos estadísticos y diversos análisis físico-químicos, es posible realizar la identificación de las fuentes aportantes, naturales y antropogénicas, en las matrices sólidas urbanas.

1.6 Objetivos generales y específicos

El objetivo general de esta tesis es la identificación de las fuentes aportantes a las matrices sólida de Copiapó y las zonas de la ciudad que éstas se ven afectadas. Para la obtención de este objetivo se deben cumplir metas específicas que se listan a continuación:

- Estimación de los valores *background* de la zona en base a muestras no contaminadas del área.
- Determinación de los factores de enriquecimiento en las matrices sólidas de la ciudad en base a las condiciones naturales de la zona.
- Identificación del efecto antropogénico en la ciudad, a través de métodos y técnicas analíticas adecuadas.
- Estimación de las zonas antropogénicamente enriquecidas de la ciudad.
- Cuantificación de la contribución realizada por las fuentes aportantes a las matrices sólidas de la ciudad.
- Determinación de las zonas de Copiapó bajo la influencia de cada fuente aportante identificada.

Por otro lado, dada las circunstancias nacionales y los eventos ocurridos en marzo de 2015, un objetivo secundario de esta tesis es el estudio, evaluación, y análisis del cambio en la composición elemental de lodos aluvionales en la ciudad.

1.7 Objetivo interdisciplinario

El principal objetivo interdisciplinario es la determinación de las zonas de la ciudad de Copiapó que se ven afectadas por las diversas fuentes contaminantes y analizar si existe relación alguna con los grupos socioeconómicos y los niveles de pobreza del sector.

2. METODOLOGÍA

Las campañas a terreno descritas a continuación fueron llevadas a cabo por el grupo de geoquímica urbana del *cluster* de recursos críticos del Centro de Desarrollo Urbano Sustentable. Se obtuvieron muestras de distintas matrices sólidas en las cuatro campañas a terreno realizadas, suelos, polvos de calles, lodos, relaves y muestras *background*. Se realizaron análisis de composición para 19 elementos de interés, se obtuvieron los valores *background* base de la zona y en base a estos los factores de enriquecimiento en la ciudad. Por último, la modelación en base a métodos estadísticos permitió la identificación de las fuentes contaminantes como también las zonas que estas afectan dentro de Copiapó. En la Figura 2-1 se presenta un diagrama de las metodologías seguidas en esta tesis.

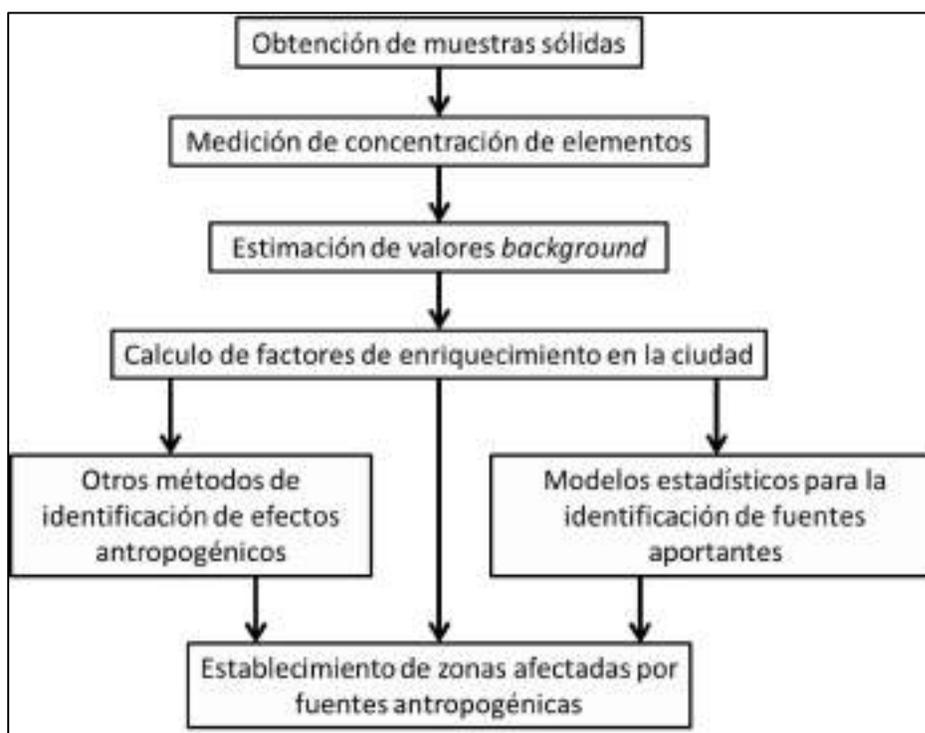


Figura 2-1: Diagrama de metodología. Diversas metodologías que se detallan en las secciones siguientes, fueron utilizadas para identificar las fuentes contaminantes y las zonas que estas afectan. Cabe destacar que la obtención de muestras sólidas constó de 4 campañas de muestreo en la ciudad.

Fuente: Elaboración propia.

2.1 Campaña noviembre 2014

2.1.1 Toma de muestras

a) **Muestras de Suelo:** Estas muestras se obtuvieron en zonas agrícolas (cercanas y lejanas de relaves), en parques de la población El Palomar y en parques en el resto de la ciudad. Fueron tomadas con un barreno de acero inoxidable y almacenadas en bolsas plásticas rotuladas y herméticas. Previo a tomar la muestra de suelo, se retiraba manualmente vegetación que podía cubrir los puntos de muestreo. El total de las muestras recolectadas fue de 168 muestras en 42 sitios de muestreo. La metodología propuesta por Li et al. (2001), se basa en recolectar 4 sub-muestras en los primeros 15 cm del suelo en cada sitio, para luego en laboratorio realizar la composición de una muestra representativa del lugar utilizando las 4 sub-muestras y un método de cuarteo. Los puntos georeferenciados de cada uno de los sitios de muestreo de suelos se indican en la Figura 2-2.

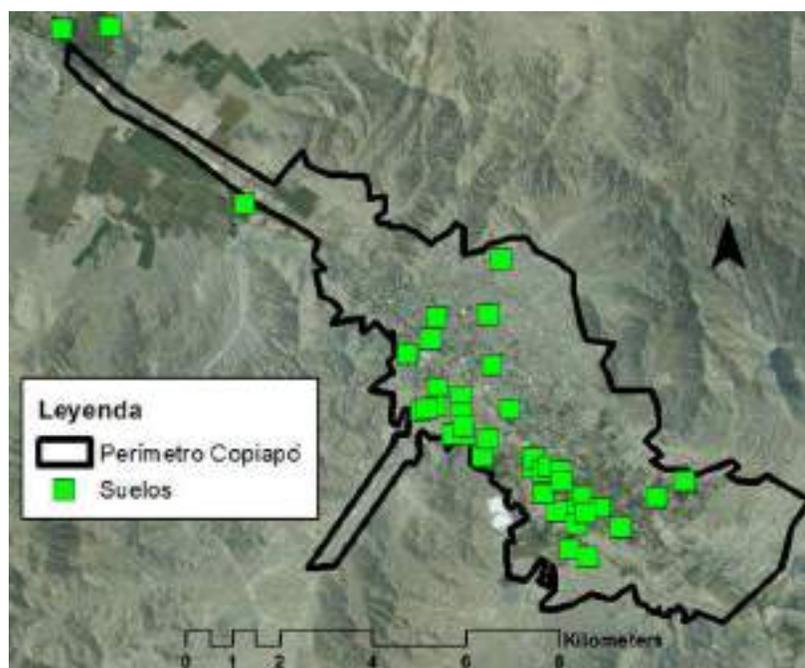


Figura 2-2: Muestras de suelo obtenidas en Campaña noviembre 2014. El muestreo de suelos se concentró en la zona agrícola de la ciudad y en los parques urbanos de la población el Palomar.
Fuente: Elaboración propia.

c) **Muestras de Polvo de calle:** Estas muestras se obtuvieron basándose en una grilla de muestreo de 1 km² sobre la ciudad, que se hizo más densa en la población El Palomar. También se obtuvieron muestras de polvo de calle cerca de establecimientos educacionales y plazas. El objetivo de esta forma de muestreo fue obtener la distribución espacial de los elementos en toda la ciudad. Las muestras de polvo se tomaron en base a la metodología sugerida por Banerjee (2003) y Al-Khashman (2007), en cada sitio de muestreo se obtuvo una muestra compuesta por el polvo recolectado a ambos lados de la calle. La recolección de la muestra se realizó utilizando brochas y palas plásticas para barrer aproximadamente 1 m² de pavimento a cada lado de la calle. El total de las muestras recolectadas fue de 71 muestras compuestas. Los puntos georeferenciados de cada una de las muestras de polvo se indican en la Figura 2-3.

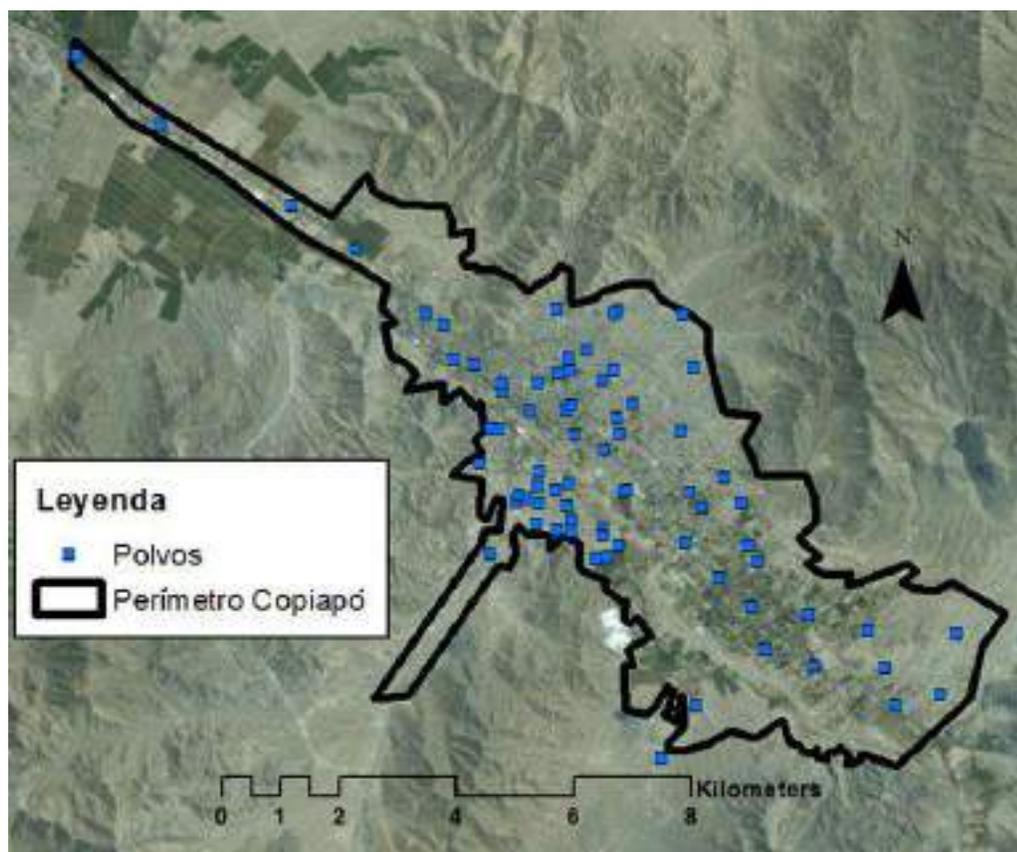


Figura 2-3: Muestras de polvo obtenidas en Campaña noviembre 2014. Las muestras se obtuvieron en base a una grilla de 1 km² para una obtener una caracterización homogénea de la ciudad. Fuente: Elaboración propia.

d) Muestras de Relave Porvenir: Estas muestras se obtuvieron sobre el relave y en la base de este. Cada una de estas muestras fue tomada con un barreno de acero inoxidable. No se realizó composición de las muestras, en el lugar y tampoco en el laboratorio. Las muestras fueron obtenidas en los primeros 15 cm de la superficie del relave. En esta campaña el total de las muestras recolectadas fue de 30 muestras del relave Porvenir. Los puntos georeferenciados de cada una de las muestras de relave se indican en la Figura 2-4.

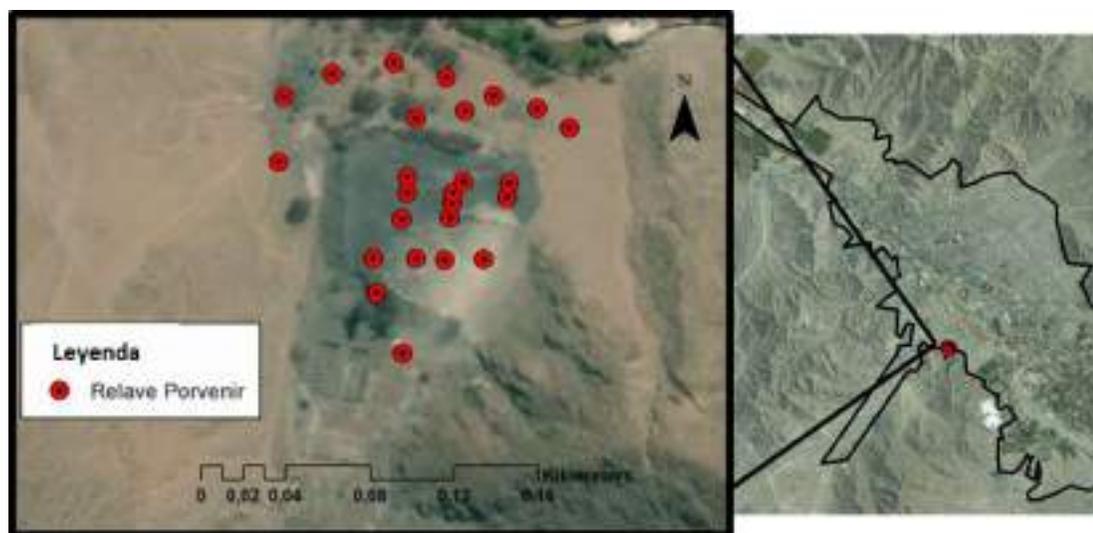


Figura 2-4: Muestras del relave Porvenir obtenidas en campaña noviembre 2014. Las muestras se obtuvieron en 25 puntos sobre el relave, para incluir en la caracterización del material la heterogeneidad de estos residuos mineros.

Fuente: Elaboración propia.

e) Muestras de PM₁₀: Se realizaron muestreos de material particulado durante 3 días en 5 puntos de la ciudad. Estos se realizaron con equipos TAS, que se componen de un filtro que atrapa las partículas menores a 10 μm y una bomba que hace fluir el aire. Los filtros son cambiados cada 24 horas y almacenados en recipientes herméticos. Estos equipos se ubicaron en techos de diferentes lugares de la ciudad indicados en la Figura 2-5.

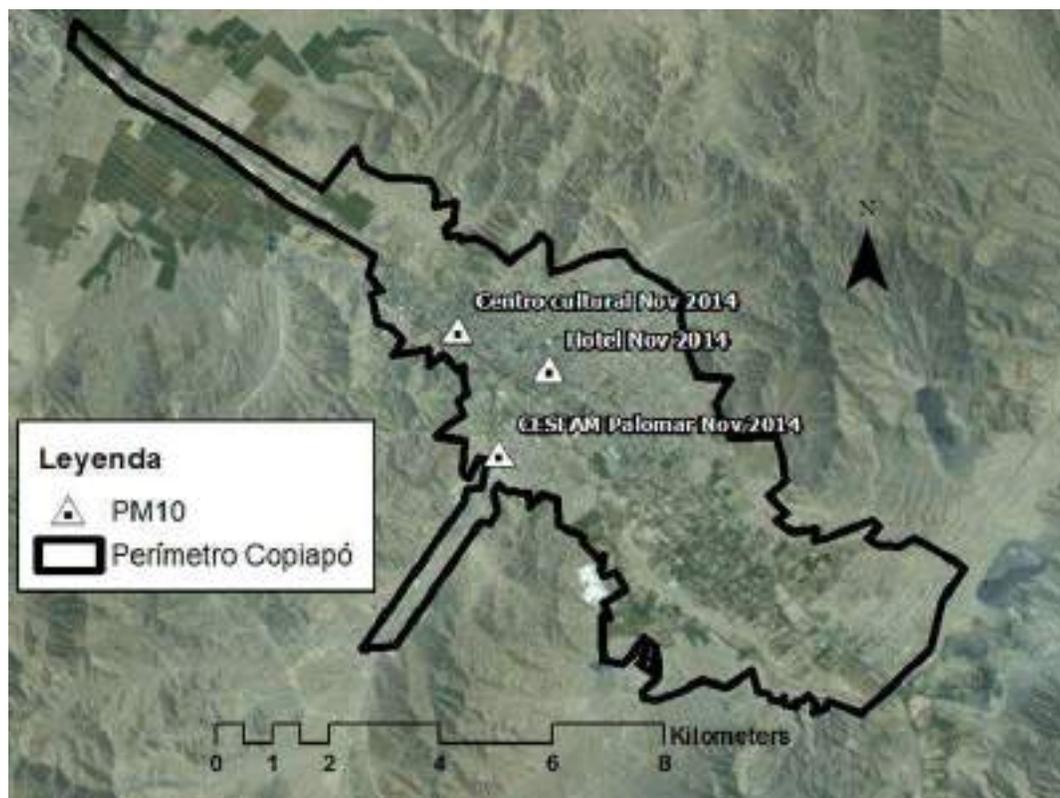


Figura 2-5: Muestras de PM₁₀ obtenidas en Campaña noviembre 2014. Puntos de instalación de equipos TAS para el muestreo de PM₁₀, ubicaciones seleccionadas en base a disponibilidad de espacio y por seguridad del equipo. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2-1 se resume la cantidad de muestras por cada matriz de estudio. En la Tabla A-1 del Anexo A se detallan cada una de las muestras obtenidas en esta campaña con sus respectivos puntos georreferenciados.

Tabla 2-1: Resumen de muestras obtenidas en campaña noviembre 2014.

	Tipo de muestra	Total	Sub-muestras	Composición de la muestra
Matrices sólidas	Suelo	42	168	En laboratorio
	Polvo calles	71	142	En terreno
	Relave	30	No aplica	No aplica
Aire	PM ₁₀	3	No aplica	No aplica

Fuente: Elaboración propia.

2.1.2 Tratamiento de las muestras

Las muestras sólidas fueron tratadas según el procedimiento indicado en la Figura 2-6 y descrito en la Tabla 2-2.

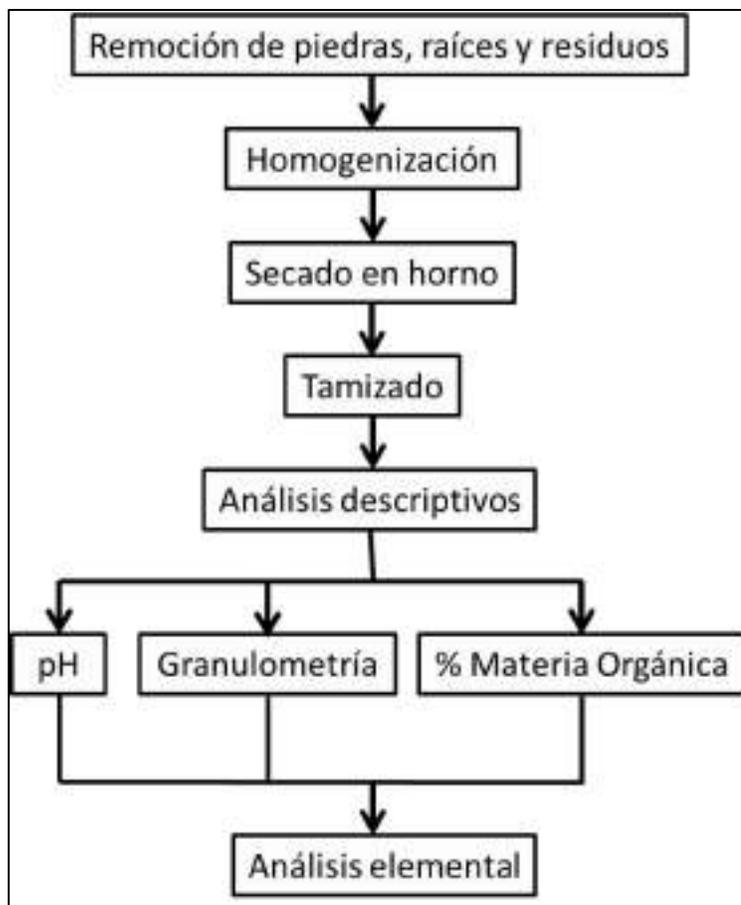


Figura 2-6: Diagrama de tratamientos realizados a las muestras. Previo a la realización de los análisis descriptivos y elementales se realiza la homogenización, secado y tamizado de la muestra para disminuir la heterogeneidad propia de la muestra sólida. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2-2: Descripción de tratamientos y análisis realizados a muestras sólidas.

Proceso	Descripción
Remoción de piedras, raíces y residuos	Proceso manual de remoción de residuos, con la utilización de guantes plásticos para evitar la contaminación de las muestras.
Homogenización	En el caso de que la muestra no supere un kilogramo de masa, se pasa directamente al secado. En el caso contrario, se realiza un proceso de cuarteo para homogenizar la muestra, este proceso consta de la desagregación de terrones y luego la división de la muestra en 4 partes iguales, se seleccionan dos de estas partes para la muestra final. Este proceso se repite hasta tener la masa requerida para el secado, aproximadamente 500 gr.
Secado en horno	El proceso comienza con el pesaje de la muestra, esta se deposita en potes de aluminio desechables, que son colocados en el horno a 40°C. Luego de 24 horas se retiran los potes del horno y se vuelve a masar la muestra, si el peso ha disminuido más del 5% de la masa inicial, se vuelve a colocar en el horno. En caso contrario la muestra se considera seca.
Tamizado	Se realiza un tamizado de 2 mm, con un tamiz de acero inoxidable y palas plásticas. Y para las muestras seleccionadas para el análisis de la fracción fina se tamizaron también a 53 μ m.
Análisis descriptivos	Se realizó medición de pH, porcentaje de materia orgánica y granulometría a cada una de las muestras, las metodologías se describen en la sección siguiente.

Análisis elemental	<p>Para las muestras de suelo y polvos de calle, se realizó medición de 18 elementos, Al, As, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Sr, Ti, V y Zn por medio de un <i>Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy</i> (ICP- OES 700 Series, Agilent Technologies, Estados Unidos) y de Hg con un <i>Direct Mercury Analyzer</i> (DMA-80, Milestone, Italia), ambos instrumentos en los laboratorios de IRSTEA en Francia. Para el caso de las muestras de relave, se utilizó un portable <i>X-Ray Fluorescence Spectroscopy</i> (p-XRF Innov-X Delta DS6000, Olympus, Canadá) considerando solo los elementos que fueron validados en trabajos anteriores (Carkovic et al., 2016), que corresponden a As, Co, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn, también Al, Ca y Si de forma referencial. De forma exploratoria se seleccionaron 6 muestras del relave Porvenir para medir Hg en los laboratorios de IRSTEA y de la Universidad de Burdeaux en Francia, medido por los instrumentos DMA-80 y AMA-454, respectivamente. Las metodologías correspondientes a cada medición se describen en la sección siguiente.</p>
---------------------------	---

Fuente: Elaboración propia.

2.1.3 Metodología de análisis

En esta sección se presenta el detalle de los análisis químicos y físicos realizados para las muestras obtenidas en esta campaña de muestreo.

2.1.3.1 Análisis elemental

El análisis elemental se realizó por medio de tres métodos distintos, dependiendo del objetivo buscado. Se utilizó ICP-OES para medir 18 elementos, DMA-80 para medir mercurio y p-XRF para obtener la concentración preliminar de 7 elementos.

2.1.3.1.1 ICP-OES

La medición de los 18 elementos se realizó según el proceso descrito en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3: Metodología utilizada para medición con ICP-OES.

Descripción de metodologías utilizadas	
<p>Digestión ácida: Se utilizaron dos tipos de digestión dependiendo del objetivo buscado. Para la todas las muestras de polvo (71) y suelos (42) se utilizó Agua Regia, debido a que se busca estudiar los metales más disponibles (Chen & Ma, 2001). Por otro lado se utilizó Ataque Total para conocer la concentración total de los elementos en una selección de las muestras (10 muestras de polvo y 10 muestras de suelo). Se realizó un análisis de la calidad de los resultados a través de triplicados aleatorios, análisis de blancos y materiales de referencia certificados. Para cada matriz de estudio (suelos y polvos de calle), se analizó la desviación estándar relativa como también el ajuste a los valores certificados.</p>	<p>Agua Regia: Este proceso comienza con el pesaje de aproximadamente 300 mg de muestra, que se depositan en los tubos reactores de 75 ml, luego se agregan 6 ml de ácido clorhídrico y 2 ml de ácido nítrico; los reactores son sellados. Estos se colocan en el microondas, en el programa de digestión de sólidos. Al finalizar, se retira los reactores y se dejan enfriar a temperatura ambiente. Cuando se encuentran fríos, los reactores se abren y se agrega agua mili Q hasta alcanzar los 50 ml.</p> <p>Ataque Total: Esta digestión se realiza con 30 mg de muestra, que se depositan en un reactor de teflón de 50 ml. Luego se agregan 1.5 ml de ácido clorhídrico, 0.5 ml de ácido nítrico y 2 ml de ácido fluorhídrico. Los reactores se cierran y se calientan a 125°C, luego se realiza el proceso de evaporación con los reactores abiertos, bajo campana y a 130°C. Se agregan 0.25 ml de ácido nítrico y 5 ml de agua ultra pura, se vuelven a calentar a 100 °C, al enfriarse se extraen 3.5 ml de la solución digerida y se ajusta hasta los 10 ml con agua ultra pura. El objetivo de este proceso es destruir la matriz sólida, disolver los carbonatos, óxidos de hierro y manganeso, oxidar la materia orgánica y disolver los silicatos.</p>
<p>Dilución y preparación de muestras de calibración: Para medir distintos elementos en las muestras se necesita tener distintas diluciones, debido a las diferentes magnitudes entre elementos. En este caso se eligió realizar diluciones de 2, 20 y 100 veces. Estas se preparan manteniendo una matriz de agua regia de 10%, agregando la muestra necesaria y diluyendo con agua mili Q en tubos de 10 ml. Las muestras de calibración, se prepararon en base a una solución multi-elemental de 10.000 ug/l, y luego diluyendo hasta obtener las siguientes concentraciones 0; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200 y 500 µg/L. Para los macro elementos Al, Fe, Ca, Mg y P se realizaron muestras de calibración de 1.000, 2.000, 5.000, 10.000, 20.000 y 100.000 ug/L a partir de muestras mono-elementales de cada uno de estos. Estas muestras son utilizadas para calibrar el ICP-OES y también para verificar si las concentraciones medidas son las correctas.</p>	
<p>Medición de elementos: Para la medición de cada elemento se eligieron entre 2 y 3 longitudes de onda a detectar por el equipo, para después poder seleccionar la que tenga un mejor ajuste y evitar longitudes de onda con interferencias. Se realizaron series de medición, compuestas por 5 muestras con sus tres diluciones, más una curva de calibración de verificación y blancos para el lavado del equipo y así evitar contaminación entre muestras.</p>	
<p>Tratamiento de datos: Luego de obtenidas las mediciones de longitudes de ondas, en el programa ICP-Expert II se ajustan los <i>peaks</i> ideales con los reales y luego se realizan las curvas de calibración para la serie. Después se exportan los datos y se tratan en Excel, en éste se busca analizar las variaciones entre las 4 repeticiones que hace el equipo para cada muestra y también estimar la concentración real en base a las diluciones realizadas. Por otro lado también se analizan los triplicados de las muestras, estudiando las variaciones entre ellos. Se verifica también el ajuste de los valores obtenidos a los valores de los materiales de referencia certificados, como también de las muestras de calibración y verificación.</p>	

Fuente: Elaboración propia.

2.1.3.1.2 DMA

Para la medición del Hg se masan aproximadamente 30 mg de muestra seca y tamizada, a 2 mm o a 53 μm según sea el caso, y se coloca dentro del envase de medición del equipo. Luego el DMA automáticamente mide el mercurio a través de un proceso de amalgamación con oro.

Para garantizar una buena calidad de los resultados los instrumentos utilizados fueron de plástico, limpiados después de cada muestra y lavados al terminar cada día de medición. También se realizaron triplicados de muestras al azar y medición de 2 materiales de referencia certificados cada 15 muestras.

2.1.3.1.3 p-XRF

Se obtuvo la concentración elemental midiendo cada una de las muestras, que se encontraban secas a 40 °C y tamizadas a 2 mm. La muestra se coloca en un recipiente estándar y luego se mide por los dos métodos que ofrece el instrumento *Soil 3 Beam* y *Two Beam Mining*. La principal consideración con este instrumento, es que para los elementos validados existe un límite de cuantificación (LQ) estimado, que se presenta en la Tabla 2-4. Si las mediciones se encuentran sobre este valor son válidas, si no es el caso, se reemplazan por el valor de LQ/2.

Tabla 2-4: LQ estimado para elementos validados del método p-XRF

	As	Co	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
LQ Estimado (mg/kg)	36	12	12	35.000	276	22	103

Fuente: Elaboración propia.

2.1.3.2 Caracterización química y física de muestras

2.1.3.2.1 pH

La medición de pH se realizó según el método sugerido por Zagal y Sadzwaka (2007), este consiste en tomar 20 gr de la muestra seca y tamizada a 2 mm, se agregan 50 ml de agua desionizada, se agita y luego se deja reposar de 2 a 24 horas. La medición de pH se realiza luego de calibrar correctamente el pH-metro.

2.1.3.2.2 Porcentaje de materia orgánica

La medición del porcentaje de materia orgánica (%MO), se realizó por el método sugerido por Sadzwaka et al. (2006), este consiste en pesar 1 a 2 gr de muestra seca y tamizada a 2 mm, se agregan 10 ml de dicromato de sodio, luego se agregan 20 ml de ácido sulfúrico, posteriormente se agita y se deja reposar por 30 minutos. Se agregan 70 ml de agua y se deja reposar durante la noche. Al día siguiente, utilizando el espectrofotómetro Hach DR2800, se mide la absorbancia del sobrenadante a una longitud de onda de 600 nm, con este valor se calcula el carbono orgánico de la muestra y luego la materia orgánica.

2.1.3.2.3 Granulometría

El primer paso es tomar aproximadamente 50 gr de la muestra seca y tamizada a 2 mm, luego se realiza un tamizado en seco a través de un tamiz de apertura de 53 μm (ASTM, N° 270). Este tamiz permite diferenciar las partículas gruesas (arena y agregados) de las más finas (limo, arcilla y agregados pequeños) (Gee y Bauder, 1986). Luego se masa ambas partes y se calcula el % de finos de la muestra.

2.2 Campaña abril 2015

Entre el 24 y el 27 de marzo de 2015, un evento hidrometeorológico extraordinario en la Región de Atacama desencadenó procesos de remoción en masa y aluviones en los cauces de la ciudad de Copiapó, siendo la ciudad una de las localidades más afectadas. Esto se

produjo debido a precipitaciones en las zonas altas de las cuencas en conjunto con una isoterma cero alta, produciendo así los procesos de remoción en masa que terminaron afectando las ciudades de la región. Se produjo una alta pérdida de infraestructura como también un riesgo debido al arrastre de material de origen industrial, minero, agrícola y natural, exponiendo a la población a un potencial riesgo para su salud. Por otro lado, la emergencia en la región afectó a 29.741 personas, se destruyeron 2.071 viviendas y 6.254 tuvieron daño mayor. Además se reportaron 25 personas fallecidas y 101 personas desaparecidas (CIGIDEN, 2015).

Entre los días 8 y 10 de abril de 2015, se realizó un muestreo de los lodos en la ciudad. La metodología utilizada fue en sistema de transectos perpendiculares al flujo de los aluviones ocurridos. En Copiapó existieron dos flujos principales de aluviones, uno por el cauce del río Copiapó y el otro por la quebrada de Paipote; que luego desembocó en las principales calles de la ciudad. También se tomaron muestras de material particulado en 5 puntos de la ciudad. Por otro lado, se realizó una inspección visual de los relaves que se encontraban posiblemente afectados por los flujos aluvionales, como también un muestreo de estos.

2.2.1 Toma de muestras

Muestras de Lodo: Muestras obtenidas con el objeto de evaluar el cambio en las concentraciones elementales a lo largo de los flujos aluvionales, por esta razón el muestreo realizado fue en forma de transectos perpendiculares al flujo. Estas muestras fueron tomadas con palas de acero inoxidable y almacenadas en bolsas plásticas rotuladas y herméticas. Para este muestreo se realizó una composición en terreno de las muestras, tomando 4 sub-muestras en los primeros 15 cm de lodo, separadas por al menos 1 m entre ellas. El total de las muestras recolectadas fue de 53 muestras compuestas. Los puntos geo-referenciados de cada una de las muestras de lodos se indican en la Figura 2-7.

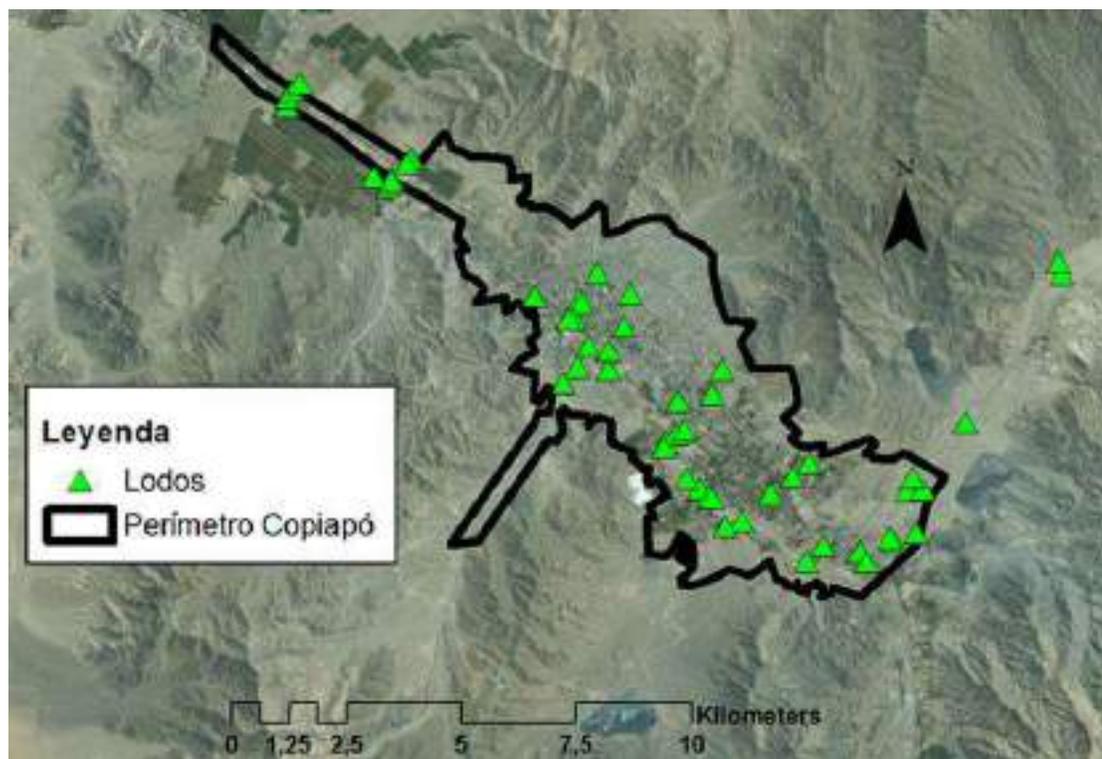
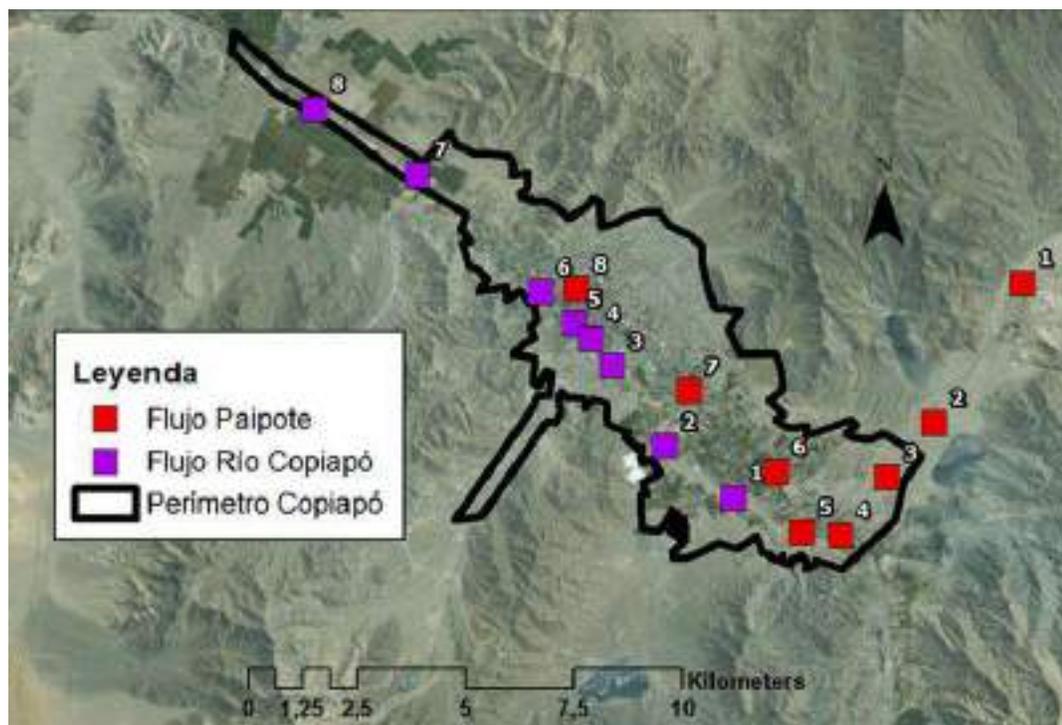


Figura 2-7: Muestras de lodos obtenidas en la campaña abril 2015. Se recolectaron en base a transectos perpendiculares al flujo de los aluviones, para caracterizar el cambio en las concentraciones de metales a lo largo de la ciudad. Fuente: Elaboración propia.

Se identificaron las muestras que se encontraban en los flujos aluvionales del Río Copiapó y la Quebrada de Paipote, en total 41 muestras de lodo fueron seleccionadas. Estas se agruparon según proximidad y se establecieron puntos representativos para todos los sectores de muestreo (Figura 2-8). La medición de parámetros descriptivos y de composición elemental se realizó, para efectos de esta tesis, en las 41 muestras seleccionadas. El detalle de las muestras seleccionadas se indica en la Tabla B-1 en el Anexo B. Como resultado se obtuvieron 8 puntos representativos del flujo aluvional del río Copiapó y 8 puntos para el flujo de la Quebrada de Paipote.



**Figura 2-8: Sectores representativos de muestreo para los dos principales flujos aluvionales de la ciudad. Los puntos representativos se seleccionaron en base a la cercanía de las muestras de lodo.
Fuente: Elaboración propia**

Muestras de Relaves: Se realizó una inspección visual del estado de los relaves después del paso de los aluviones. Además en 8 de ellos se tomaron muestras para tener una caracterización preliminar de su composición elemental. Dependiendo de la dureza del relave, las muestras fueron tomadas con palas de acero inoxidable o barreno y luego almacenadas en bolsa plásticas selladas y rotuladas. Las muestras fueron obtenidas en los primeros 15 cm de la superficie del relave. En esta campaña el total de las muestras recolectadas fue de 53 muestras, los relaves muestreados y el detalle de las muestras se indica en la Tabla 2-5. La ubicación de los relaves muestreados se indican en la Figura 2-9.

Tabla 2-5: Relaves muestreados en Campaña abril 2015.

Relave	Número de muestras
Bodega Alto	13
Llaucavén	6
Ojancos	16
Papapietro	2
Planta Matta	2
San Esteban	10
Santa Blanca	2
Victoria	2

Fuente: Elaboración propia.

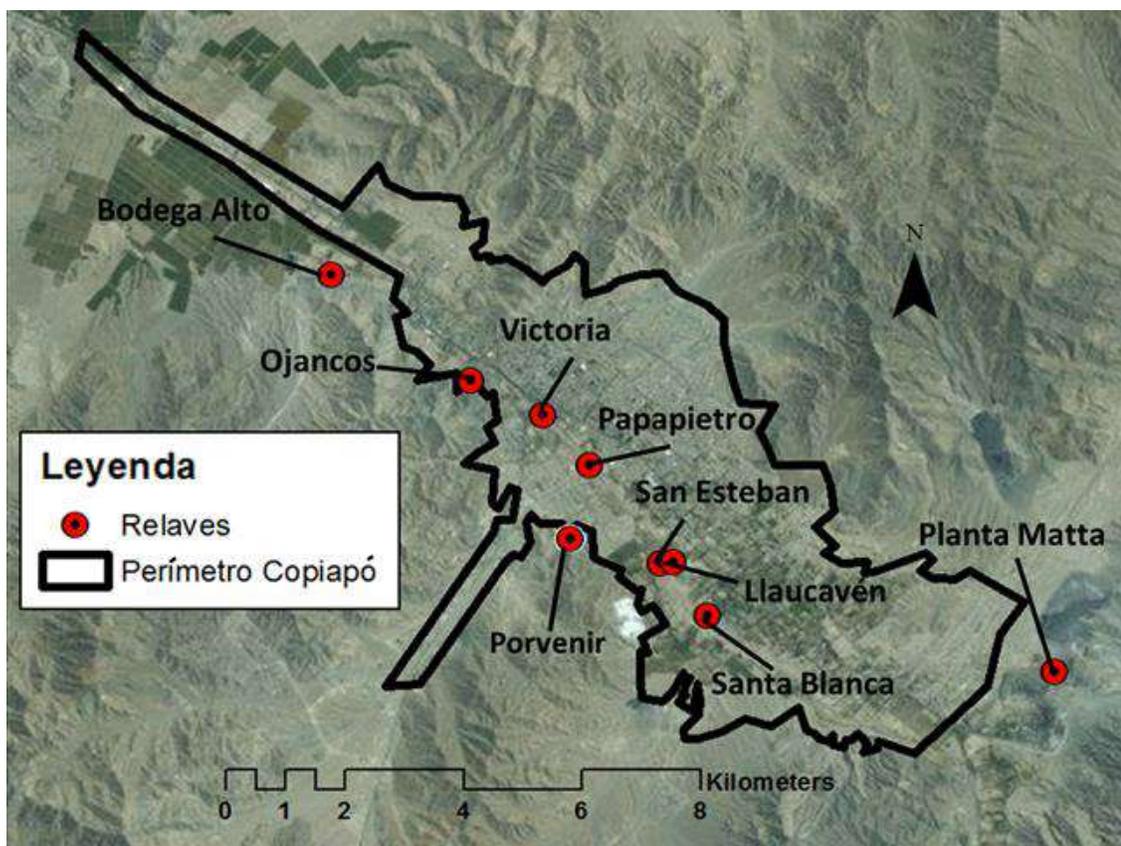


Figura 2-9: Relaves muestreados en campaña abril 2015. Se recolectaron muestras en los relaves en que se evaluó el arrastre de material por el flujo de los aluviones. Fuente: Elaboración propia

Muestras de PM₁₀: Se realizaron muestreos de material particulado durante 2 días en 5 puntos de la ciudad. Se realizó la misma metodología utilizada en la campaña noviembre

2014 (Sección 2.1.1). Estos 5 equipos se ubicaron en diferentes lugares de la ciudad indicados en la Figura 2-10.

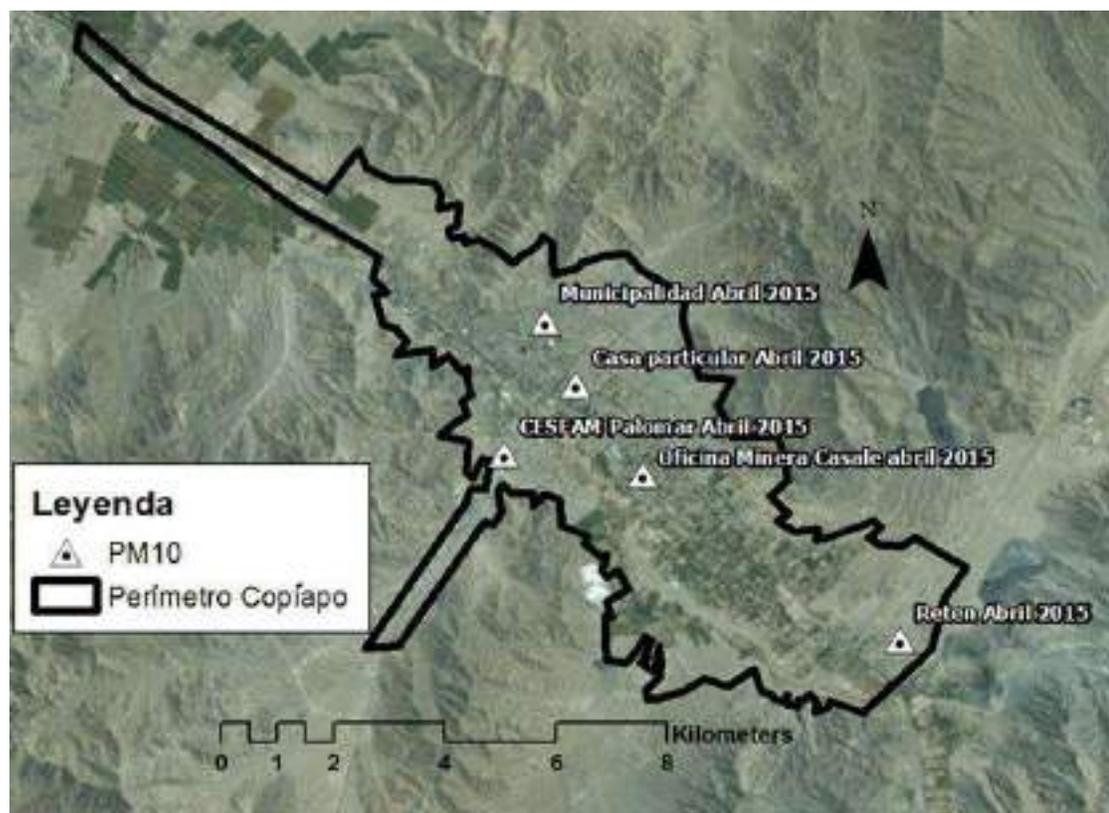


Figura 2-10: Muestras de PM₁₀ obtenidas en campaña abril 2015. Puntos seleccionados en base a los sectores de interés para evaluar el material particulado y disponibilidad de espacio para la instalación de los equipos. Fuente: Elaboración propia

2.2.2 Preparación de muestras

Para las muestras de lodo se utilizó la misma preparación que en suelos y polvos de Copiapó noviembre 2014 (Ver sección 2.1.2).

2.2.3 Metodología de análisis

Se utilizó la misma metodología que en suelos y polvos de Copiapó noviembre 2014. Realizando mediciones de pH, porcentaje de materia orgánica, granulometría y análisis elemental con ICP-OES, para 41 muestras de lodo; y con p-XRF para las 53 muestras de relaves (Ver sección 2.1.3). Se seleccionaron 4 muestras del relave Ojancos y 4 muestras del relave Bodega Alto para realizar mediciones de Hg en los laboratorios de IRSTEa en Francia.

2.3 Campaña octubre 2015

Esta campaña realizada entre los días 26 y 31 de octubre de 2015, tuvo como objetivo obtener valores base para la comparación con las matrices sólidas de la ciudad de Copiapó, es decir, para obtener el *background* geoquímico de la zona. Para esto se tomaron muestras en las seis zonas geológicas de mayor magnitud del sector, cinco de estas ubicadas en los alrededores de Copiapó y una a más de 55 km aguas arriba de la ciudad (Figura 2-11 y Figura 2-12). La descripción geológica de los sectores se presenta en la Tabla C - 1 en el Anexo C. Para la selección de estas zonas se tomaron en cuenta las sugerencias planteadas por la *Environmental Protection Agency* (US EPA) en 1995:

- 1) Elegir más de un sitio de muestreo por zona
- 2) Los sitios seleccionados deben encontrarse fuera del rango de efecto de las fuentes contaminantes
- 3) Elegir sitios de muestreo en altura, así se evita la contaminación por material particulado y por escorrentía superficial
- 4) Las muestras para *background* deben ser similares en propiedades físicas con las muestras de suelo, además deben ser muestreadas con el mismo método que el resto de las muestras.

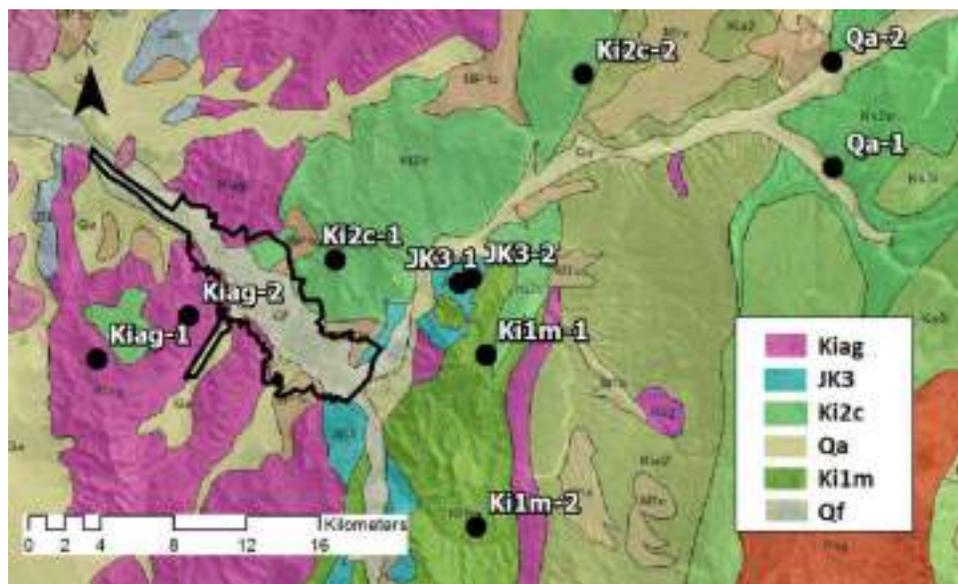


Figura 2-11: Formaciones geológicas de Copiapó y puntos de muestreo de campaña octubre 2015. Los sectores seleccionados se basaron en las principales formaciones geológicas del sector y la lejanía respecto a posibles fuentes de contaminación. Fuente: Elaboración propia en base a Sernageomin (2003).

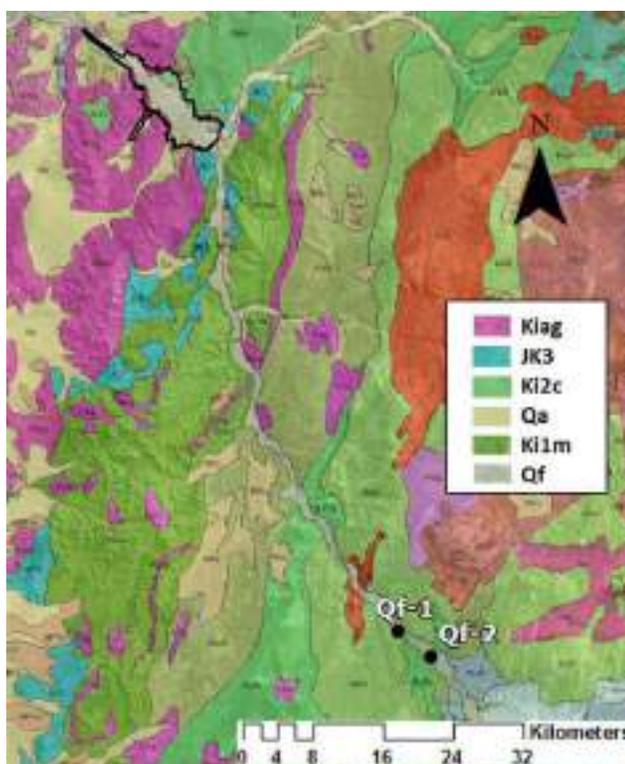


Figura 2-12: Puntos de muestreo de campaña octubre 2015 formación geológica fluvial aguas arriba de Copiapó. Puntos seleccionados para eliminar el efecto de los principales sectores poblados de la cuenca. Fuente: Elaboración propia en base a Sernageomin (2003).

2.3.1 Toma de muestras

Muestras *background*: Se tomaron muestras en dos sitios distintos para cada una de las formaciones seleccionadas. En cada uno de estos sitios se obtuvieron 5 muestras, separadas entre sí por al menos 100 m. Estas fueron compuestas en terreno por 4 sub-muestras, tomadas dentro de un círculo de radio al menos 3 m, las muestras se obtuvieron de los 0 – 20 cm de profundidad (Chirenje et al., 2001; Matschullat, Ottenstein, & Reimann, 2000; Navarro et al., 2008; Shomar, Müller, & Yahya, 2005). Además para cada zona geológica se eligió un sector de muestreo, donde se tomó una muestra superficial, en los primeros 3 cm de suelo, y una muestra en profundidad, bajo los 20 cm desde la superficie. En ambos casos las muestras fueron compuestas en terreno por dos puntos distanciados al menos por 2 metros lineales entre sí.

Todas las muestras de *background* geoquímico fueron obtenidas utilizando palas de acero inoxidable y luego almacenadas en bolsas de plástico herméticamente selladas. En total se recolectaron 60 muestras *background* y 13 pares de muestras superficiales y profundas.

Muestras de relave: También se muestrearon los relaves San Esteban y Papapietro, con el objetivo de caracterizarlos de forma detallada en cuanto a su composición. Para el relave San Esteban se tomaron 30 muestras que se indican en la Figura 2-13a y para el relave Papapietro se tomaron 28 muestras que se indican en la Figura 2-13b. Los detalles de las muestras obtenidas en estos dos relaves se indican en la Tabla A-1 del Anexo A.

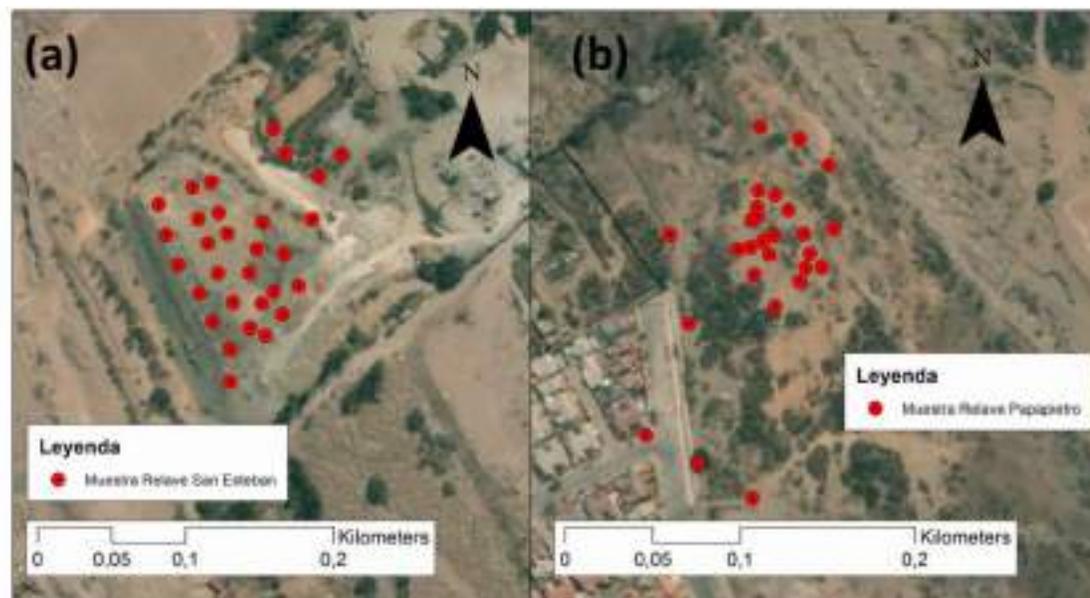


Figura 2-13: Puntos de muestreo en (a) relave San Esteban y (b) relave Papapietro. Se decidió estudiar en detalle ambos relaves debido a la cercanía con sectores agrícolas y sectores poblados, respectivamente. Fuente: Elaboración propia

2.3.2 Preparación de muestras

Se utilizó la misma preparación que en los suelos y polvos de noviembre 2014 (Ver sección 2.1.2).

2.3.3 Metodología de análisis

Se utilizó la misma metodología que en suelos y polvos de Copiapó noviembre 2014. Realizando mediciones de pH, porcentaje de materia orgánica, granulometría y análisis elemental con ICP-OES para las 81 muestras *background* y con p-XRF para las 58 muestras de relave (Ver sección 2.1.3).

2.3.4 Metodología de cálculo

Se utilizaron 6 métodos estadísticos que permiten obtener valores estimados del *background* geoquímico. Estos se basan en un set de al menos 50 muestras no influenciadas por la acción antropogénica. En la Tabla 2-6 a continuación se describen los métodos utilizados.

Tabla 2-6: Métodos de cálculo de valores *background*.

Método de cálculo	Descripción del método
Método de Lepeltier	Método sugerido en 1969 por Lepeltier, supone una distribución log-normal de las concentraciones de los elementos traza. Se grafica la frecuencia relativa acumulada en escala logarítmica, las desviaciones de un comportamiento log-normal se observaran como una desviación de la curva, estas desviaciones pueden considerarse como contaminación de las muestras. Se determina la sección de las muestras no influenciadas a partir de las desviaciones en el gráfico, se considera que las muestras no influenciadas van desde el valor mínimo hasta el punto en que se observa la primera desviación de consideración. El <i>background</i> se obtiene mediante el cálculo de la media de la distribución no influenciada y la desviación estándar correspondientes, luego el valor <i>background</i> corresponde al valor de “media + 2 σ ”. En resumen este método descarta las posibles muestras contaminadas y luego calcula el valor <i>background</i> .
Curva de frecuencia acumulada	Método gráfico similar al de Lepeltier, se grafica la frecuencia relativa acumulada en un gráfico lineal y no se asume ningún tipo de distribución de los datos. La primera desviación de la pendiente en la curva, es el límite superior de los datos <i>background</i> , es decir, es el valor <i>background</i> establecido. Por otro lado, desviaciones en la parte superior de la curva pueden interpretarse también como muestras contaminadas antropogénicamente.
Rango normal de una muestra	Se establece como el límite superior del <i>background</i> , el 97,5 percentil de las muestras que no han sido influenciadas por actividades humanas o también el valor correspondiente a “media + 2 σ ”. El problema con este método es que no existe ningún criterio que permita saber previamente si una muestra se encuentra o no contaminada. Por lo tanto se necesita de un set de datos completamente no influenciado por actividades humanas.
Test 4σ outliers	Se asume una distribución normal de los elementos traza en las muestras, se requiere un número de muestras apropiado, sobre 10 y bajo 1.000. Se realiza un test de <i>outliers</i> con un criterio de 4 σ desde la media, eliminando los datos que superen este rango. El <i>background</i> se calcula a partir del valor “media + 2 σ ” del nuevo conjunto de datos que no considera outliers. Este método establece un valor del <i>background</i> de mayor valor debido a que solo elimina los outliers más extremos en los datos.
Técnica 2σ iterativa	El objetivo de este método es formar una distribución normal, para lograrlo se eliminan iterativamente los valores que se encuentre más allá de dos veces la desviación estándar desde la media. Este proceso se repite hasta que todos los valores se encuentren dentro de este rango. Luego el <i>background</i> es calculado como “media + 2 σ ” de los valores restantes.
Función distribución calculada	Se establece que los valores más bajos de una distribución debiesen ser las muestras que están libres de la influencia humana. Bajo esta suposición se selecciona el set de datos que va entre el mínimo y la mediana. Este nuevo set de datos es reflejado frente a la mediana para obtener una nueva distribución, esto corresponde a sumar la distancia entre cada punto y la mediana, a la mediana (mediana + valor - mediana). Para la nueva función creada se calcula la media y la desviación estándar, con estos parámetros se establece el valor <i>background</i> como “media + 2 σ ”.

Fuente: Elaborado en base a Matschullat et al. (2000)

Los métodos de Lepeltier, curva de frecuencia acumulada, técnica 2 σ iterativa y función distribución calculada son los métodos mejor preparados en caso de tener muestras

contaminadas en el set de muestras. En cambio los métodos de rango normal de una muestra y de test 4σ *outliers* son altamente sensibles a la presencia de muestras contaminadas. Por otro lado cabe destacar también que estos métodos no sirven para elementos halógenos, alcalinos y alcalinos térreos. Dado que su comportamiento no concuerda con las suposiciones iniciales de estos métodos (Matschullat et al., 2000), por esta razón se excluyen del cálculo el Ca, Li, Mg, Na y Sr.

2.4 Campaña agosto 2016

Esta campaña realizada entre los días 02 y 04 de agosto del 2016, tuvo como objetivo obtener muestras de polvo de calles en forma de transectos para evaluar el cambio de concentraciones al alejarse de fuentes contaminantes y así identificar la dispersión del material de relave en los polvos de calle de la ciudad

2.4.1 Toma de muestras

Muestras de polvo: Utilizando el método de muestreo de polvo de calles descrito en la sección 2.1.1, se obtuvieron 19 muestras de polvo en las tres calles cercanas al relave Porvenir. Las muestras se obtuvieron aproximadamente cada 50 m alejándose del relave (Figura 2-14).

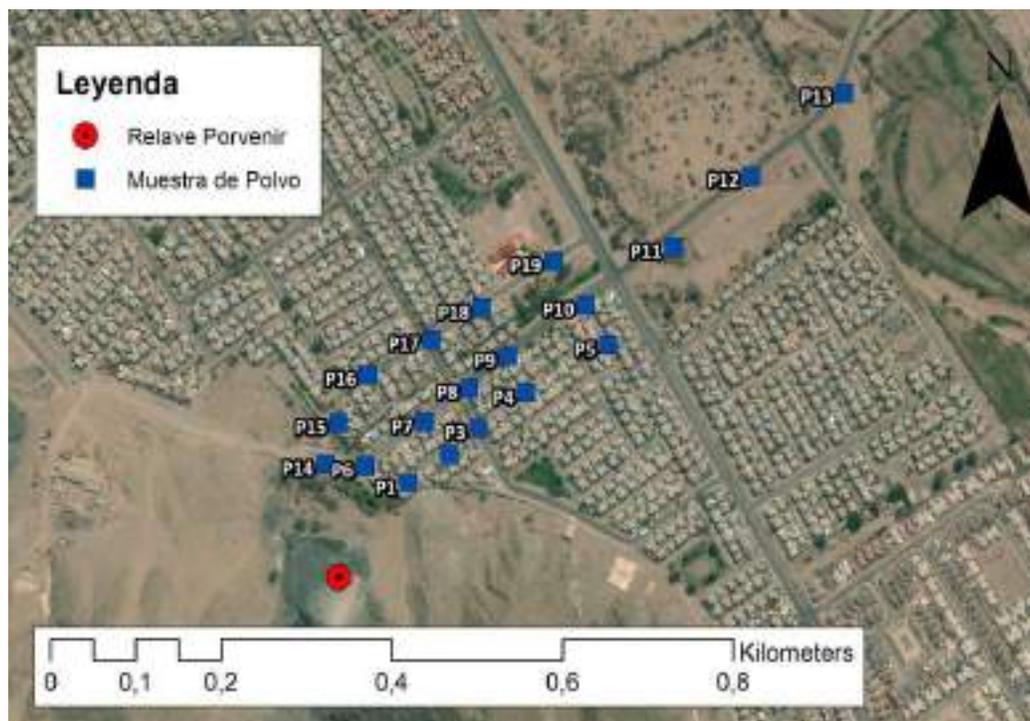


Figura 2-14: Muestreo de Polvos campaña agosto 2016. Muestras obtenidas en base a transectos perpendiculares a la dirección de viento principal sobre el relave Porvenir. Fuente: Elaboración propia

2.4.2 Preparación de muestras

Se utilizó la misma preparación que en polvos de noviembre 2014 (Ver sección 2.1.2).

2.4.3 Metodología de análisis

Se utilizó la misma metodología que en suelos y polvos de Copiapó noviembre 2014. Realizando mediciones de pH, porcentaje de materia orgánica y análisis elemental por el método de p-XRF para las 19 muestras de polvo de calles (Ver sección 2.1.3).

2.5 Métodos de caracterización de zonas enriquecidas

2.5.1 Factor de enriquecimiento

Este factor es una forma de identificación de una zona enriquecida, al normalizar por la concentración natural, se descarta el aporte natural a las muestras destacando el aporte antropogénico a estas. Se utilizó la Ecuación 1 para el factor de enriquecimiento (Sutherland, 2000).

Ecuación 1:

$$FE = \frac{\left(\frac{C_{Elemento}}{C_{Elemento\ Norm}}\right)_{muestra}}{\left(\frac{C_{Elemento}}{C_{Elemento\ Norm}}\right)_{Background}} \left\{ \begin{array}{l} FE < 2 \text{ Sin enriquecimiento o enriquecimiento mínimo} \\ 2 < FE < 5 \text{ Enriquecimiento moderado} \\ 5 < FE < 20 \text{ Enriquecimiento significativo} \\ 20 < FE < 40 \text{ Muy alto enriquecimiento} \\ 40 < FE \text{ Extremadamente enriquecido} \end{array} \right.$$

Donde $C_{Elemento}$ es la concentración del elemento de estudio en la muestra y en los valores *background*; $C_{Elemento\ Norm}$ es la concentración del elemento de normalización en la muestra y en el *background*. El elemento de normalización utilizado debe ser aquel que no se vea influenciado por fuentes antropogénicas, en general se utiliza el Aluminio, pero también puede utilizarse el Estroncio o el Titanio (Masson, Blanc, & Schafer, 2006; Salmanighabeshi et al., 2015).

2.5.2 Mapas de enriquecimiento

Por medio de la utilización de herramientas de sistema de información geográfica se puede caracterizar las zonas de la ciudad que se encuentran más enriquecidas, por medio del uso del software ArcGIS 10.1 (ESRI, Redlands CA), se generarán mapas de factores de enriquecimientos de metales para las matrices sólidas de la ciudad.

2.6 Métodos para la caracterización de fuentes contaminantes

Tipo de fuente y caracterización: Para efecto de identificación de las fuentes contaminantes y sus aportes a las matrices sólidas es de importancia considerar qué metales son representativos de cada fuente emisora. En el caso de la ciudad de Copiapó existen numerosas fuentes que pueden influenciar las matrices sólidas del sector, detalladas en la Tabla 2-7.

Tabla 2-7: Metodologías de caracterización según fuente aportante.

Fuente	Metodología de caracterización
Natural	Es el aporte no antropogénico proveniente del material original de la corteza terrestre, este se caracterizó por medio de las muestras no contaminadas o muestras <i>background</i> de la zona.
Relaves	Estos aportan material a los suelos y polvos por la erosión eólica. En las campañas a terreno se caracterizaron 9 relaves de los que no se contaba información. Además existen otros estudios que han caracterizado 5 relaves de la ciudad (CENMA, 2012), por lo que se cuenta con una bibliografía de apoyo para la determinación de la composición.
Tráfico	Esta fuente ha sido ampliamente estudiada en todo el mundo, por lo que se cuenta con una amplia gama de bibliografía para identificar su perfil químico.
Fundición	El aporte de esta fuente es principalmente a través de la deposición atmosférica, el estudio de fundiciones de cobre y sus emisiones ha sido realizado en todo el mundo y también dentro de Chile. La caracterización de las emisiones se realizó en base a la variada bibliografía existente.
Agricultura	El aporte es principalmente a los suelos, que son fertilizados con diversos compuestos que pueden encontrarse enriquecidos en metales. La caracterización de esta fuente se realizó en base a bibliografía.

Fuente: Elaboración propia.

Ubicación: Dependiendo del tipo de fuente es importante conocer su ubicación espacial. En el caso de los relaves la ubicación preliminar se obtuvo en base al catastro de relaves del SERNAGEOMIN del año 2015, que luego fue confirmado en las campañas a terreno. La ubicación de la fundición de cobre Paipote, se verificó en terreno luego de estimar su ubicación en base a imágenes satelitales. En cuanto al aporte natural y el tráfico, corresponden a fuentes difusas por lo que su ubicación no puede estimarse, pero sus aportes pueden centrarse en áreas específicas. Como por ejemplo el tráfico, que puede tener más aportes en el centro de la ciudad. Por otro lado, la fuente relacionada a la

agricultura puede relacionarse principalmente a actividades en predios agrícolas y de la misma forma, el uso de fertilizantes en jardines y parques.

2.7 Métodos para la caracterización de mecanismos de transporte

Dependiendo de las condiciones climáticas del lugar existen diversos factores a considerar en el transporte de contaminantes, para el caso de Copiapó el viento y los aluviones son los dos más importantes.

2.7.1 Vientos

Existen dos formas de considerar la influencia del viento en las fuentes de contaminación. La primera es cualitativamente, es decir, considerar las condiciones de viento en cada fuente, la dirección y la velocidad según rosas de los vientos anuales. Estos datos se obtienen del explorador eólico (Departamento de Geofísica, 2012), en donde se puede obtener todos los parámetros de viento a 5,5 metros de altura, en una grilla de resolución de un 1 km sobre todo Chile.

Otra fuente de información es también utilizar como referencias las estaciones meteorológicas dentro de Copiapó, existen 5 estaciones dentro de la ciudad, 3 de ellas tienen disponibles datos de dirección y velocidad del viento para el año 2009. En la Figura 2-15 se muestra la ubicación geográfica de las tres estaciones meteorológicas de las que se disponen datos.



Figura 2-15: Ubicación de estaciones meteorológicas en Copiapó. Seleccionados en base a la disponibilidad de datos de vientos dentro de la ciudad. Fuente: Elaboración propia

La segunda forma de considerar la acción del viento, es realizar una modelación de la dispersión de los contaminantes, existen muchos software que realizan este proceso y como resultado se obtiene un mapa de concentraciones alrededor de la fuente de estudio, un ejemplo de modelo existente es AERMOD. La desventaja de estos modelos, es la necesidad de inventarios de emisiones y condiciones meteorológicas, en el caso de Copiapó existe una gran cantidad de fuentes lo que puede ser un problema para la modelación. Estas modelaciones se encuentran fuera del alcance de esta tesis.

2.7.2 Aluviones

A pesar de ser situaciones excepcionales, los aluviones de marzo del 2015 expusieron el alto riesgo que existe respecto al arrastre de material de origen minero en toda la Región de Atacama. Para evaluar el efecto del arrastre de contaminantes por el lodo aluvional, se evaluó el cambio en las concentraciones químicas en los lodos antes y después de la ciudad y a lo largo de los principales cauces de aluviones, la quebrada de Paipote y el río Copiapó.

Para esto se utilizarán las muestras de lodo obtenidas en la campaña de abril de 2015. Por otro lado, el transporte de material minero se evaluó en terreno durante la campaña de abril 2015 y también por medio de comparación de imágenes satelitales.

2.7.3 Lluvias

Las lluvias principalmente afectan a los relaves, produciendo lixiviación de sus componentes y contaminando cuerpos de aguas superficiales cercanos o también aguas subterráneas (Sims et al., 2013). En el caso de Copiapó, las lluvias son muy escasas y por lo tanto para efectos de esta tesis no se toma en consideración como mecanismo de transporte de magnitud.

2.8 Métodos para la identificación de fuentes

Existen tres líneas para la identificación de fuentes, los métodos estadísticos que ocupan relaciones y comportamientos similares de los elementos para determinar relaciones entre metales y con esto identificar las fuentes. Por otro lado los métodos físicos-químicos que por medio de características comunes entre las muestras contaminadas y sus fuentes originarias, se pueden relacionar entre sí. Y por último, existen métodos de rastreadores con isotopos que utilizan la energía irradiada por estos, para detectar los puntos en que se está generando contaminación desde la fuente de estudio. Para esta tesis se utilizaron los métodos estadísticos y los métodos físicos-químicos.

2.8.1 Métodos estadísticos

2.8.1.1 Análisis de correlación (CA)

Se analiza la relación de los componentes de la muestras entre sí, se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson para grupos de muestras con condiciones similares. Este análisis

se realizó con el software XLStat adjunto a Microsoft Excel. La identificación de fuentes mediante este método se basa en las relaciones entre elementos y en conjunto con la bibliografía existente, se puede concluir respecto a fuentes en común entre elementos (Ajmone-Marsan et al., 2008; Cai et al., 2012; Meza-Figueroa et al., 2009; Y. Wang et al., 2015).

2.8.1.2 Análisis de componentes principales (PCA)

Este análisis es ampliamente utilizado en diversos estudios para la identificación de fuentes contaminantes, se basa en buscar factores que representen de mejor manera la variabilidad de los datos considerando las correlaciones entre estos, de esta forma se puede identificar orígenes en común entre elementos (Cai et al., 2012; Comero et al., 2012; Dordević, Mihajlidi-Zelić, & Relić, 2005; Meza-Figueroa et al., 2009; Parra, Bravo, Quiroz, Moreno, Karanasiou, Font, Vidal, & Cereceda-Balic, 2014; Y. Wang et al., 2015; Y. Zhang et al., 2015). Por ejemplo, si algún elemento se ve muy asociado al aluminio y el silicio, podría preliminarmente concluirse que este es un metal proveniente de la geología del lugar ya que está asociado a los aluminosilicatos naturales. Para identificar las fuentes contaminantes de la ciudad los análisis se realizaron para las matrices sólidas de polvo de calles y suelos. Este análisis se realizó con el software XLStat adjunto a Microsoft Excel. Se consideraron los factores con mayor explicación de la varianza total de los datos y que posean valores propios mayores que 1; se utilizó la opción *Varimax rotation* para mejorar la identificación de los factores. Para determinar los elementos representativos de cada factor se tomó en cuenta factores de carga mayores a 0.6 que son valores considerados como buenos y sobre 0.7 como excelentes (Cai et al., 2012; Comero et al., 2012; Meza-Figueroa et al., 2009).

2.8.1.3 Matriz de factorización positiva (PMF)

Es un modelo de análisis de factores que apunta fundamentalmente a identificar fuentes y contribuciones en un conjunto de muestras. Esta técnica es ampliamente utilizada en conjuntos de datos ambientales, ya que puede incorporar las incertidumbres asociadas a cada medición como también puede forzar a que la solución no tenga factores negativos, lo que carece de sentido físico e interpretación; a diferencia del método de análisis de componentes principales (Reff, Eberly, & Bhave, 2007). Para resolver el modelo se utilizara el programa gratuito “EPA PMF 5.0” otorgado por la *Environmental Protection Agency* de Estados Unidos.

Esta técnica fue presentada por Paatero y Tapper en 1994 y desde entonces se utiliza en diversos conjuntos de datos ambientales. Su mayor uso es en la identificación de fuentes aportantes en muestras de material particulado en suspensión (Jorquera & Barraza, 2013; Song et al., 2006). Donde se obtiene un gran número de muestras en un mismo sector, que luego son analizadas para identificar las contribuciones de las fuentes cercanas. Estos estudios identifican diversas fuentes, entre ellas emisiones de vehículos, quema de biomasa, fundiciones y aportes de la corteza terrestre.

Por otro lado, esta técnica también se ha utilizado en otras matrices, la única suposición implicada es que las mismas fuentes contribuyen a todas las muestras. Teniendo en cuenta esto, se ha utilizado por ejemplo, en muestras de sedimento en donde se han identificado las fuentes de hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs) (Yu, Liu, Wang, Xu, & Shen, 2015). También se ha utilizado en otras matrices sólidas, como suelos, donde existen diversos estudios en que se identifican fuentes contaminantes para distintos componentes como PAHs y metales (Vaccaro et al., 2007; X. T. Wang et al., 2013; Xue et al., 2014). Se ha realizado también la identificación de fuentes contaminantes en polvos de calle, donde por medio de la medición de PAHs y el uso del modelo, se identificaron las fuentes aportantes a los polvos de calle (J. Zhang, Wang, Hua, & Krebs, 2015).

En el ámbito de interés para la ciudad de Copiapó, existen estudios donde se ha utilizado esta técnica para la caracterización geoquímica de un sector minero abandonado y también el aporte espacial de metales a los suelos cercanos (Comero et al., 2012). También se realizó un estudio de PAHs en suelos urbanos de la ciudad de Shanghai, para determinar las fuentes aportantes y la ubicación espacial de estas (X. T. Wang et al., 2013). Por último, esta técnica también ha sido utilizada para identificar el efecto de fundiciones de cobre en el valle de Puchuncaví, pudiendo satisfactoriamente identificar 3 factores en las muestras de suelo obtenidas, la fundición de cobre, sulfatos secundarios relacionados a la fundición y el aporte natural de la corteza terrestre (Parra, Bravo, Quiroz, Moreno, Karanasiou, Font, Vidal, & Cereceda-Balic, 2014).

2.8.1.3.1 Modelo PMF

Este modelo resuelve el balance de masa químico entre las concentraciones de las especies medidas y los perfiles de las fuentes, como se indica en la Ecuación 2.

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde, x_{ij} es la matriz de concentraciones con i muestras y j especies químicas, p es el número de factores elegidos, g_{ik} es la matriz de contribución de masa, f_{kj} es la matriz de perfiles de factores y e_{ij} es la matriz de residuales para cada muestra y especie (EPA, 2014).

Para resolver este balance, el programa necesita las concentraciones de las especies y las incertidumbres asociadas a cada una de las mediciones. Estos datos son utilizados para ponderar cada uno de los valores y la influencia que puede tener en la solución. Luego para obtener la contribución de los factores el modelo PMF minimiza la Q en la Ecuación 3:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj}}{u_{ij}} \right]^2 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde u_{ij} es la matriz de incertidumbres para cada muestra y especie en estudio.

El modelo se considerará minimizado si Q se aproxima al valor teórico de Q (Reff et al., 2007) establecido por la Ecuación 4. Este ajuste se realiza variando la incertidumbre adicional agregada al modelo.

$$Q_{teo} = i * j - p * (i + j) \text{ (Ecuación 4)}$$

Donde i corresponde a la cantidad de muestras, j la cantidad de especies utilizadas y p la cantidad de factores usados en el modelo.

2.8.1.3.2 Inputs y Outputs

Los inputs del modelo son los nombrados previamente, una matriz de concentraciones en donde las filas son las muestras y las columnas son las especies; y otra matriz de incertidumbre estructurada de la misma forma anterior.

La incertidumbre también puede ser calculada por el programa con los límites de detección e incertidumbre analítica para cada especie. El programa utiliza las siguientes ecuaciones (Polissar, Hopke, Paatero, Malm, & Sisler, 1998):

Si la concentración de la muestra i y la especie j se encuentra sobre el límite de detección:

$$X_{ij} = X_{ij} \qquad Inc_{ij} = u_{ij} + \frac{LD_{ij}}{3}$$

Si la concentración se encuentra bajo el límite de detección:

$$X_{ij} = \frac{LD_j}{2} \qquad u_{ij} = \frac{5}{6} LD_{ij}$$

Si la concentración de un elemento es un dato perdido:

$$X_{ij} = \frac{\sum_{j=0}^n X_{ij}}{n} \qquad u_{ij} = 4 \frac{\sum_{j=0}^n X_{ij}}{n}$$

Donde Inc es la incertidumbre estimada, LD_j es el límite de detección para la especie j , u_{ij} es la incertidumbre analítica de la muestra i en la especie j y X_{ij} es la concentración de la especie j en la muestra i .

Los outputs del modelo son los perfiles de las fuentes, las contribuciones de cada factor a las muestras y los residuales (diferencia entre mediciones observadas y modeladas).

2.8.1.3.3 Análisis de ajuste del modelo

Para el análisis del ajuste del modelo se disponen de tres herramientas descritas en la Tabla 2-8.

Tabla 2-8: Herramientas de análisis del ajuste de modelo PMF

Herramienta de análisis de ajuste del modelo	Descripción
Gráficos <i>Scatter</i>	Estos gráficos entregados por el programa, se utilizan para comparar entre los valores observados y los predichos por el modelo. De esta forma si alguna variable no se ajusta de buena manera, pueda ser excluida del análisis o también modificada para que no influya de gran manera en la solución.
Series de tiempo	Son gráficos de serie, en donde se compara la muestra observada con la predicha por el modelo, son de utilidad para observar las muestras anormales que no son bien predichas por el modelo.
Gráficos de residuales	Estos gráficos indican la cantidad de muestras con un valor residual determinado. Cuando los valores residuales son muy altos (> 3) significa que el modelo no es bueno como también puede demostrar la presencia de muestras con valores <i>outliers</i> (EPA, 2014).

Fuente: Elaboración propia.

2.8.1.3.3 Análisis de estabilidad

Dado que este programa resuelve ecuaciones matriciales, pueden existir múltiples soluciones que minimicen de igual forma Q . Para esto el programa EPA PMF 5.0 proporciona 4 funciones para el análisis de estas situaciones, se describen a continuación en la Tabla 2-9.

Tabla 2-9: Herramientas de análisis de la estabilidad del modelo PMF

Herramienta de análisis de estabilidad	Descripción
<i>Bootstrap</i> (BS)	Herramienta proporcionada por el programa que se basa en determinar si pequeños grupos de mediciones influyen desproporcionalmente en la solución. Para esto el programa realiza la determinación de los factores con pequeños grupos de datos. Si los resultados son similares con los distintos conjuntos de datos, en cuanto a factores, indica que la solución no está siendo afectada por <i>outliers</i> y es estable e independiente del conjunto de datos utilizado para la modelación.
<i>Displacement</i> (DISP)	Herramienta con el objetivo de ayudar a determinar la sensibilidad a los cambios que tiene la solución. Para esto cada uno de los factores es modificado, aumentando y disminuyendo las concentraciones de su perfil químico para cada elemento. Luego se realiza un análisis del cambio que tiene la solución respecto al tamaño del desplazamiento realizado. Una solución ideal no debiese tener cambios bajo ningún desplazamiento, pero se aceptan cambios en los rango de desplazamiento mayores.
BS-DISP	Herramienta que utiliza BS y DISP para hacer un análisis más completo de la solución, desplazando y realizando <i>bootstrap</i> en cada desplazamiento.
<i>Rotational</i> (FPEAK)	Esta herramienta rota la base inicial para analizar la ambigüedad rotacional que puede existir, es decir, las múltiples soluciones. La base es rotada en distintas magnitudes, buscando eliminar relaciones entre los factores que se expresan en los gráficos llamados <i>G-Space</i> . Se debe seleccionar la base con la menor ambigüedad determinado por los resultados de las rotaciones y los gráficos de comparación. Estos muestran puntos cercanos a los ejes cuando no hay relación entre los factores; en el caso de existir una relación entre factores debiese observarse puntos cercanos a la línea 1:1 del gráfico.

Fuente: Elaboración propia.

2.8.2 Métodos de identificación físico-químicos y otros

En la Tabla 2-10 se describen otros métodos utilizados para justificar la identificación de fuentes contaminantes.

Tabla 2-10: Descripción de otros métodos de identificación.

Método	Descripción
Difracción de rayos X (XRD)	La difracción de rayos X permite identificar fases cristalinas en las muestras tanto de las fuentes contaminantes (relaves) como en las muestras de suelos, polvos de calle, lodos y <i>background</i> . Esta información respalda los análisis estadísticos, es decir, si formaciones cristalinas están presentes en fuentes y en las matrices sólidas de la ciudad, se justifica la influencia de esta fuente sobre la matriz sólida en estudio. El análisis de XRD se realizó con un difractómetro (D2 Phaser, Bruker AXS, Alemania) a 30 kV y 10 mA usando radiación Cu-K α en las muestras secas, tamizada y micronizadas.
Microscopio electrónico de barrido (SEM)	El microscopio electrónico de barrido, mediante el uso de un haz de electrones, realiza una imagen detallada de la muestra en estudio. Con esta técnica se pueden identificar estructuras morfológicas que son características de fuentes antropogénicas, en general el material de origen natural no posee formas definidas, a diferencia de las emisiones de fundiciones que en general son partículas esféricas (Balladares, Kelm, Helle, Parra, & Araneda, 2014; Marrero et al., 2007; Zdanowicz, Banic, Paktunc, & Kliza-Petelle, 2006). Por otro lado, estas morfologías pueden ser caracterizadas elementalmente con un <i>Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> (EDX) acoplado al equipo, verificando su composición y por lo tanto su origen. Las muestras de suelos, polvos de calles y relaves que se utilizaron en este instrumento se encontraban secas a 40°C y tamizadas a 53 μ m.
Filtros de aire	Los filtros de aire para captura de PM ₁₀ utilizados en las campañas a terreno, nos otorgan una visión preliminar de la composición del material suspendido, pudiendo identificar posibles fuentes emisoras debido a la composición elemental del material y las concentraciones detectadas en él. Estos filtros son enviados al laboratorio Chester LABnet ubicado en Tigard, Estados Unidos donde por medio de la técnica XRF (<i>X-Ray Fluorescence</i>) se miden 28 elementos (Ag, Al, As, Ba, Ca, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, Sn, Sr, V y Zn).
Sistemas de información geográfica	La georreferenciación de cada una de las muestras da la posibilidad de tener una idea de la distribución espacial de las concentraciones elementales, en polvos y suelos de la ciudad. Estas herramientas permiten identificar zonas de mayor o menor enriquecimiento. Por medio de estos sistemas es posible identificar zonas posiblemente afectadas por fuentes cercanas. Se utilizará la información generada en las campañas a terreno (ubicación georreferenciada de muestras y fuentes), para establecer mapas de concentración utilizando el software ArcGIS 10.1 (ESRI, Redlands CA), como también identificar las zonas que estén más enriquecidas dentro de la ciudad y las fuentes contaminantes cercanas a ellas.
Estudios previos y relaciones de elementos	Existen múltiples estudios que han estudiado las fuentes emisoras de contaminantes, caracterizando elementalmente sus emisiones e identificando cuales de los elementos son los principales identificadores de cada fuente. Se utilizará bibliografía para establecer y verificar relaciones encontradas entre elementos, para así justificar las posibles fuentes contaminantes presentes en la ciudad.

Fuente: Elaboración propia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de fuentes contaminantes

En las siguientes secciones se presenta la caracterización de las distintas fuentes contaminantes de origen antropogénico existentes en la ciudad.

3.1.1 Relaves

Ubicación y composición elemental: En las diversas campañas a terreno se obtuvieron muestras de 9 relaves, indicados en la Tabla 3-1, los que se caracterizaron a través de ensayos físico-químicos. Los resultados para pH, materia orgánica y porcentaje menor a 53 μm , se presentan en la Tabla 3-1. Además, la concentración elemental promedio de las muestras se presenta en la Tabla 3-2, concentraciones obtenidas mediante la técnica de p-XRF.

Tabla 3-1: Valores promedio de pH, materia orgánica y granulometría para los 9 relaves muestreados.

	n	pH	% M.O.	% < 53 μm
Bodega Alto	13	7,16	1,46	29,95
Llaucavén	6	8,30	0,62	12,29
Ojancos	16	6,91	0,68	16,66
Papapietro	30	7,56	0,65	21,95
Planta Matta	2	7,99	1,33	11,59
Porvenir	31	7,07	0,72	24,00
San Esteban	40	8,00	0,99	16,19
Santa Blanca	2	8,00	0,20	13,48
Victoria	2	7,75	1,28	11,67

Fuente: Elaboración propia.

Para estos 9 relaves es una característica común tener poca materia orgánica, como también altos porcentajes de material fino. Dos características muy importantes para la erosión eólica, ya que a mayor cantidad de materia orgánica menor es la erosión provocada por viento y mientras más fino sea el material más fácilmente es transportado por los vientos (Sims et al., 2013). Por otro lado, el pH es cercano al neutro lo que indica en algunos casos presencia de cal para neutralizar los posibles drenajes ácidos. Cabe destacar

también que la variabilidad entre las muestras es muy alta, debido a que los relaves son muy heterogéneos.

Tabla 3-2: Concentración elemental de relaves en mg/kg mediante p-XRF

	N° de muestras	Al*	As	Ca*	Co	Cu	Fe	Mn	Pb	Si*	Zn
Bodega Alto	13	27.415	80	118.294	74	3.020	200.305	1.707	60	150.223	167
Llaucavén	6	44.750	26	21.760	70	2.523	203.759	743	235	265.317	429
Ojancos	16	28.494	138	99.827	89	4.165	265.908	1.383	94	162.413	206
Papapietro	30	18.303	63	18.380	34	2.265	83.545	698	11	186.287	114
Planta Matta	2	40.000	153	34.937	43	2.443	147.907	5.161	170	221.000	390
Porvenir	31	22.024	40	47.800	105	1.341	322.000	1.465	46	136.374	575
San Esteban	40	21.270	28	93.424	25	905	97.864	5.293	11	113.707	51
Santa Blanca	2	59.550	18	39.668	14	90	26.818	871	11	245.150	51
Victoria	2	50.150	196	58.904	13	1.017	29.480	1.817	130	239.950	424

*Elementos de concentraciones referenciales, fines comparativos solamente

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado el Centro Nacional del Medio Ambiente de la Universidad de Chile caracterizó 5 relaves de la zona (Figura 3-1) mediante la técnica de ICP-OES para 15 elementos y DMA para el Hg. Las concentraciones obtenidas para 7 elementos de relevancia se presentan en la Tabla 3-3.

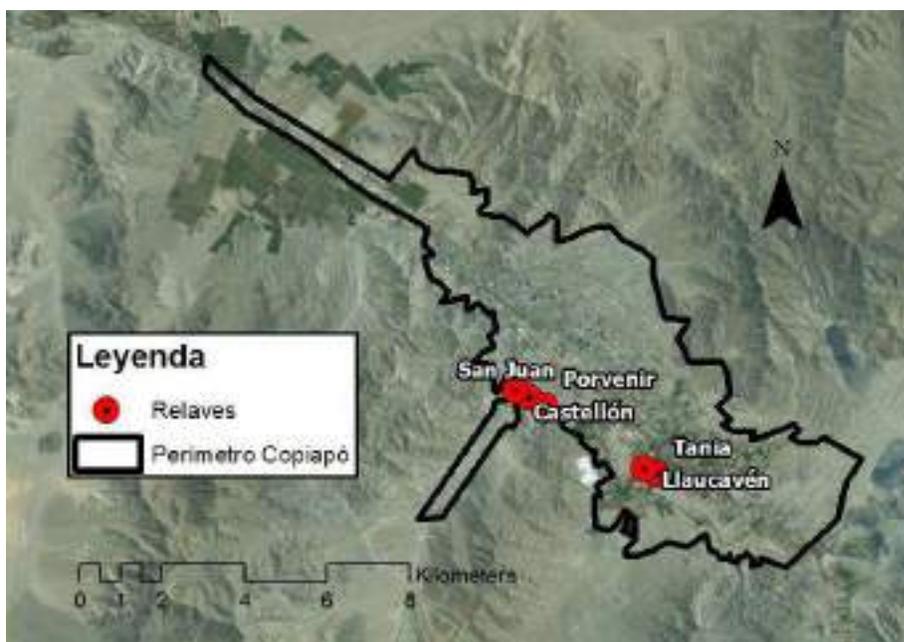


Figura 3-1: Ubicación de Relaves muestreados por el CENMA. Estos relaves fueron seleccionados en base a la potencial presencia de contaminantes y peligro que pueden presentar para la población.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-3: Concentración en mg/kg obtenida por en CENMA con ICP-OES en relaves

	As	Cd	Cu	Fe	Hg	Pb	Zn
Castellón	*	3	3.095	52.173	0,98	14	57
San Juan	*	5	1.190	95.951	1,19	133	77
Porvenir	**	6	881	137.699	0,49	24	77
Tania	87	7	3.126	87.089	0,65	97	339
Llaucavén	138	9	6.903	86.449	0,38	321	113

* Más del 50% de las muestras <LD (LD As = 2.33 mg/kg)

** Todas las muestras <LD

Fuente: Elaboración propia en base a CENMA, 2012.

El mercurio en los relaves es de vital importancia para identificar el efecto de éstos sobre las matrices sólidas de la ciudad, ya que en la zona no existen otras fuentes significativas de mercurio, como lo son las termoeléctricas a carbón (Salmanighabeshi et al., 2015). Como se indicó en la Tabla 3-3, el CENMA midió el mercurio para estos cinco relaves. Y en el marco de los aluviones y la catástrofe ocurrida en la Región de Atacama, CEDEUS y el Instituto de Salud Pública (ISP) realizaron análisis de elementos en relaves con la técnica de ICP-MS, obteniendo valores para mercurio en 7 relaves, los valores se presentan en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4: Concentración de Hg en mg/kg obtenido por CEDEUS e ISP mediante ICP-MS.

	Muestras	Hg (mg/kg)	
		Media	Máximo
Porvenir	6	1,2	5,8
Santa Blanca	1	6,5	6,5
Victoria	3	0,3	0,3
San Esteban	3	0,3	0,3
Llaucavén	3	0,3	0,3
Ojancos	5	6,5	31,5

*LQ del Hg para ICP-MS es de 0,62 mg/kg, valores igual a 0,3 mg/kg corresponden a LQ/2.

Fuente: Elaboración propia.

Las mediciones de Hg en muestras de relaves obtenidos en los laboratorios IRSTE A y de la Universidad de Bordeaux se presentan en la Tabla 3-5. Además para analizar la fracción más enriquecida se midió la concentración de Hg en la fracción menor a 2 mm y en la fracción menor a 53 µm. Cabe destacar que los valores de Hg en los tres relaves son muy diversos. El relave Porvenir posee concentraciones bajo los valores *background* calculados (Ver sección 3.2.1). Por el contrario, el relave Ojancos posee altos valores de

Hg y posee a la vez alta heterogeneidad entre las muestras obtenidas. El relave Bodega Alto posee valores levemente elevados con respecto al valor *background* calculado.

La fracción fina analizada indica que existe un alto enriquecimiento para el relave Ojancos, a diferencia de los relaves Porvenir y Bodega Alto que no muestran enriquecimiento en la parte fina (< 53 μm) con respecto a la parte gruesa (< 2 mm). Cabe destacar que al ser la parte fina es también la que presentará una mayor dispersión por acción de la erosión eólica (Davies & White, 1981) y que es a la vez la más enriquecida en Hg.

Tabla 3-5: Concentración de Hg en mg/kg para muestras de tres relaves en fracción menor a 2 mm y menor a 53 μm obtenida con DMA-80.

Relave	n	Hg promedio (mg/kg)	Desviación estándar (mg/kg)	Máximo (mg/kg)	Mínimo (mg/kg)
Bodega Alto	7	0,25	0,300	0,882	0,053
< 2 mm	4	0,3	0,4	0,88	0,05
< 53 μm	3	0,19	0,17	0,38	0,06
Ojancos	7	18,95	33,10	87,22	0,128
< 2 mm	4	10,38	18,59	38,21	0,13
< 53 μm	3	30,38	49,25	87,22	0,27
Porvenir	9	0,200	0,091	0,318	0,020
< 2 mm	6	0,2	0,11	0,32	0,02
< 53 μm	3	0,2	0,06	0,26	0,15

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 3-2 y Tabla 3-3, los principales elementos que destacan son el Cu y el Fe, las altas concentraciones indican que son una fuente de material enriquecido en estos metales para las zonas aledañas. Como se dijo anteriormente el mercurio tiene como fuente principal los relaves y como se observa en la Tabla 3-4 y Tabla 3-5, dentro de los relaves existe alta heterogeneidad llegando a valores tan altos como 87 mg/kg en el relave Ojancos, en comparación a los 0.2 mg/kg del valor *background* calculado. Para observar de forma gráfica donde existen fuentes con mayor concentración de cada elemento, se realizaron mapas de concentración en los relaves. A continuación se indican los mapas de Hg, Cu y As en las Figura 3-2, Figura 3-3 y Figura 3-4 respectivamente. En estas figuras se establecieron tres niveles de concentración, donde el primer nivel comienza en los valores *background* calculados en la sección 3.2.1.

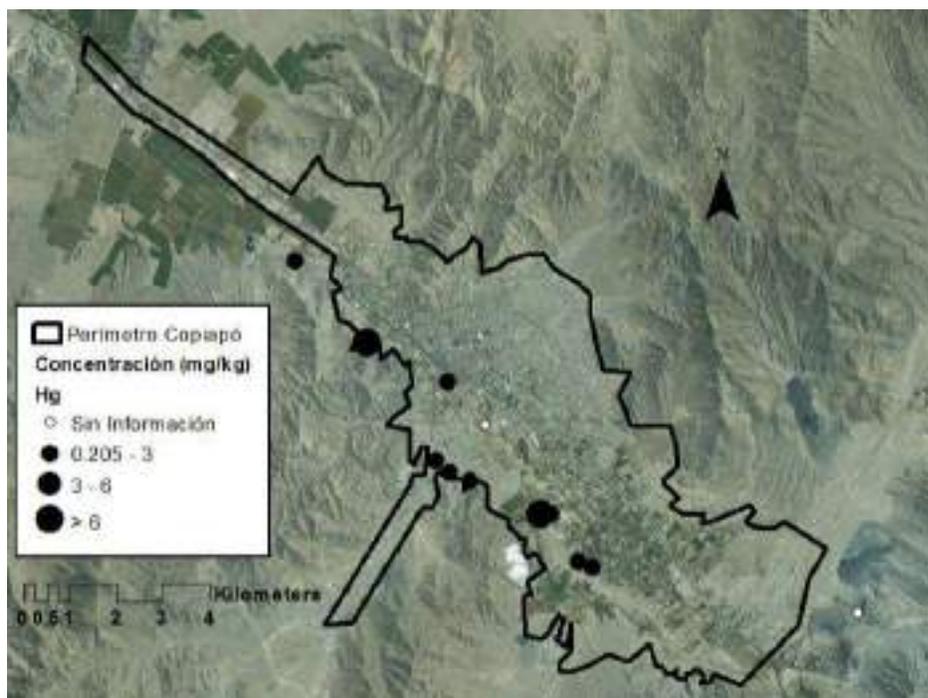


Figura 3-2: Concentración de Hg en mg/kg para relaves muestreados en campañas y por CENMA. Los relaves presentan valores de Hg sobre el valor *background*, existiendo mayor concentración en los relaves Ojancos y Santa Blanca. Fuente: Elaboración propia

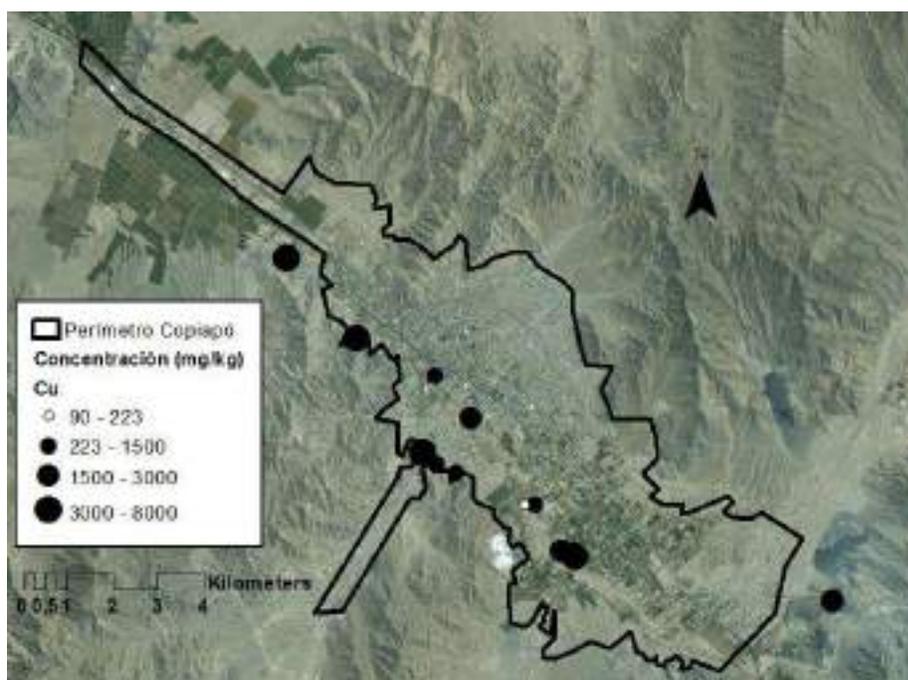


Figura 3-3: Concentración de Cu en mg/kg para relaves muestreados en campañas y por CENMA. La mayor parte de los relaves posee altas concentraciones de Cu, correspondiente con el tipo de mineral que se explota en la zona. Fuente: Elaboración propia

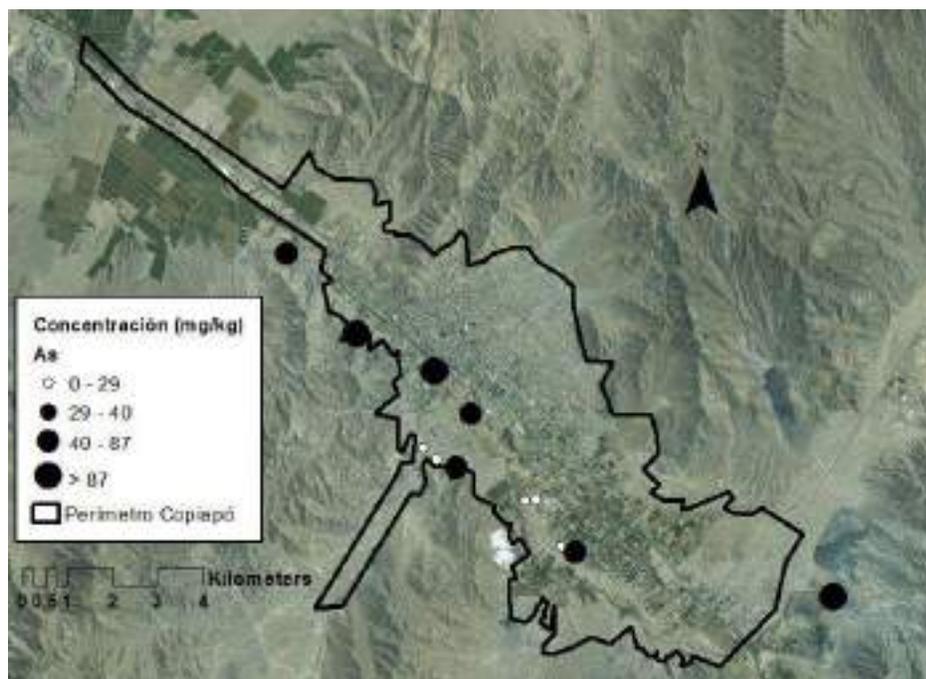


Figura 3-4: Concentración de As en mg/kg para relaves muestreados en campañas y por CENMA. Relaves relacionados a la minería del cobre tienden a poseer más As que los relacionados a la minería del oro. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 3-2 no se posee información referente a las concentraciones de Hg para los relaves Papapietro y Planta Matta. La Figura 3-3 y la Figura 3-4 nos indican que el Cu y el As se encuentran presentes en altas cantidades en gran parte de los relaves y en el caso específico del Cu las concentraciones son altamente elevadas a excepción del relave Santa Blanca, esto debido a que este relave proviene de la minería del oro, que a la vez es la razón de sus altos valores de Hg. Los mapas de concentración para el resto de los elementos se presentan en el Anexo D.

Trasporte asociado: El principal mecanismo de transporte asociado a los relaves es la erosión eólica que puede transportar material enriquecido a más de 1,8 km desde el relave, en la dirección del viento predominante (Davies & White, 1981). Este mecanismo se ve intensificado en áreas donde existen periodos de aridez extendidos (Sims et al., 2013), como en el caso de la ciudad de Copiapó ubicada en el Desierto de Atacama donde llueve aproximadamente 2 días en el año. Para ejemplificar el posible efecto de los relaves en la ciudad se estimó, en base al rango de dispersión propuesto por Davies y White (1981), un

radio de influencia de 1.800 metros para cada uno de los relaves. En la Figura 3-5 se indica el rango de efecto del conjunto de relaves que han sido caracterizados, tanto en este estudio como en otros realizados en la zona. En la Figura 3-6, se indica el efecto que podrían tener todos los relaves existentes en la ciudad, en este caso la zona potencialmente afectada abarca 40,5 km² lo que corresponde a más de 75% del área urbana de Copiapó. Cabe destacar que las zonas que no se ven afectadas según esta estimación son zonas industriales y de poca densidad poblacional.

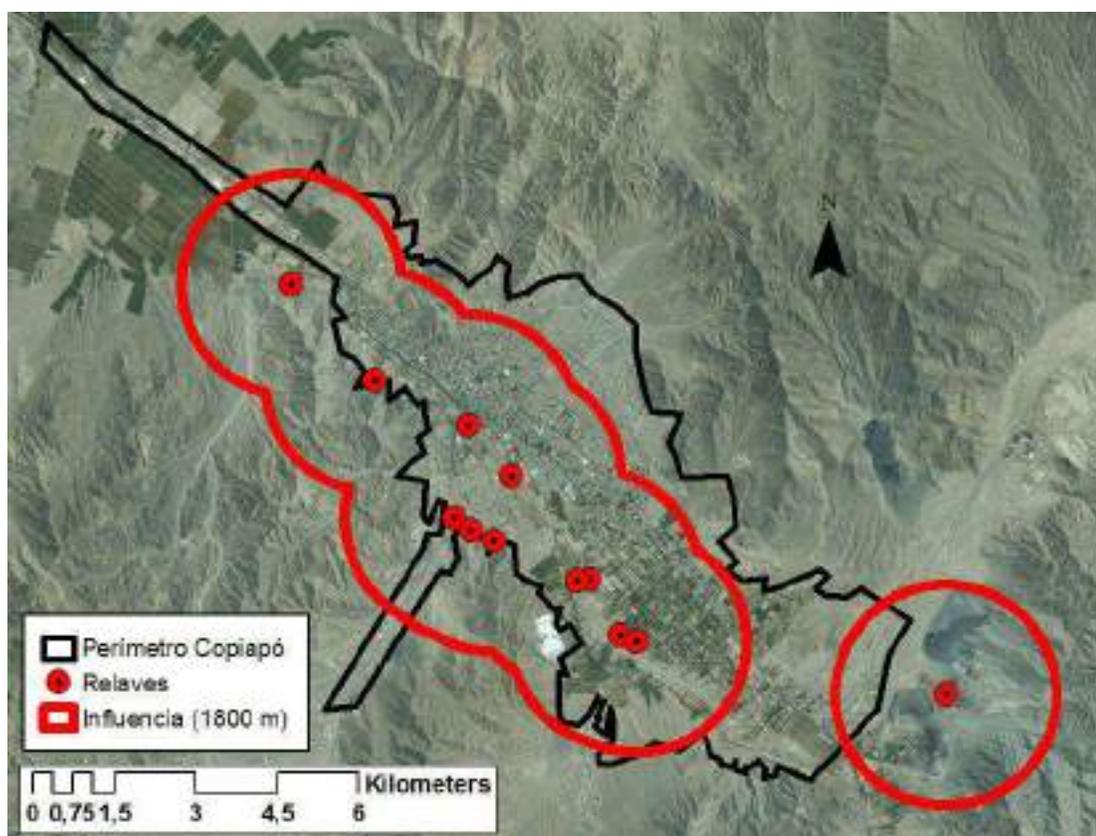


Figura 3-5: Mapa de influencia potencial de los 12 relaves con concentraciones conocidas. Rango de influencia calculado en base a otros estudios, con una distancia de 1.800 m de dispersión desde cada relave estudiado. Fuente: Elaboración propia

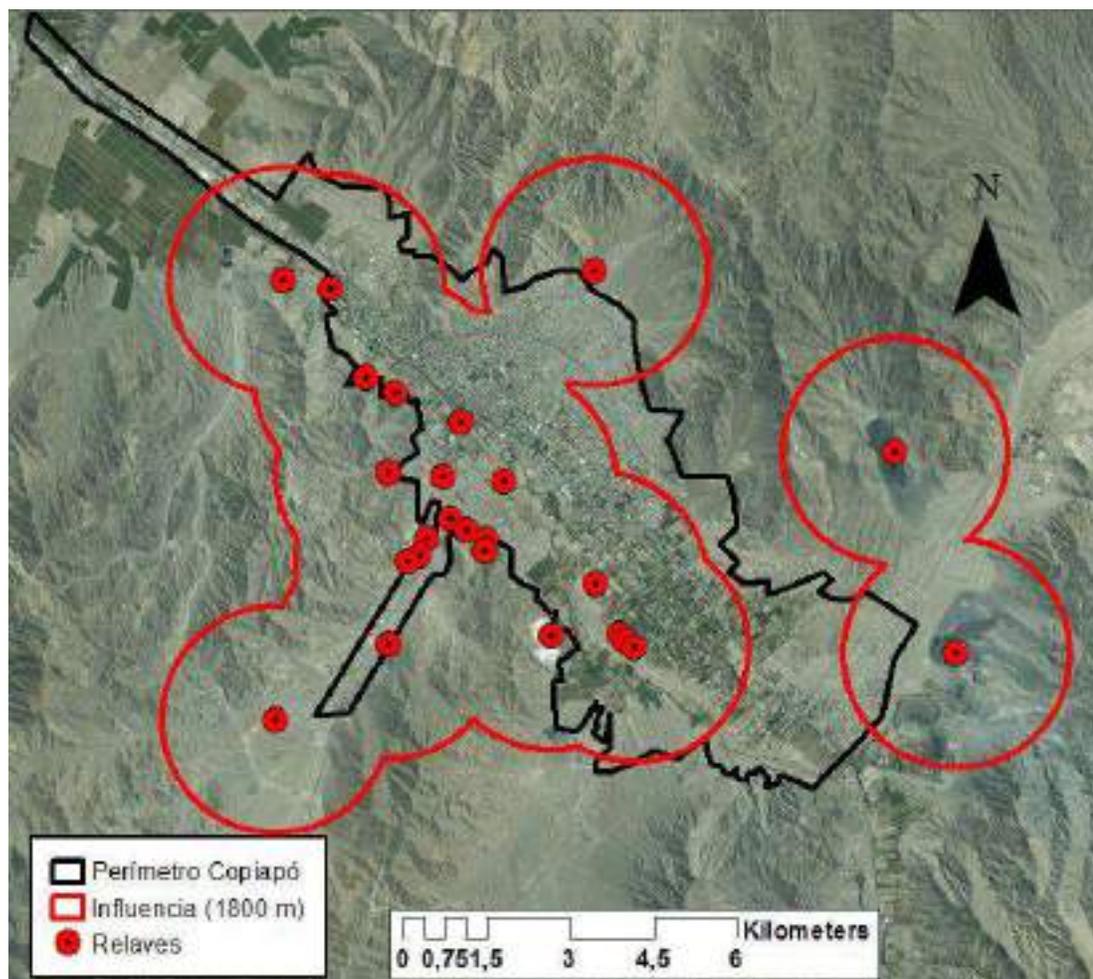


Figura 3-6: Mapa de influencia potencial de todos los relaves cercanos a la ciudad. Rango de influencia calculado en base a otros estudios, con una distancia de 1.800 m de dispersión desde cada relave en la ciudad. Fuente: Elaboración propia

En agosto de 2016 se evaluó la variabilidad espacial de las concentraciones de metales en muestras de polvo, alejándose del relave Porvenir. Como se indica en la Figura 3-7 se realizaron tres ejes de muestreo en las tres calles principales cercanas al relave, estos transectos fueron denominados Transectos A, B y C. En la Figura 3-8 se indica la concentración de Cu en los tres transectos realizados y la rosa de los vientos anual sobre el relave Porvenir.

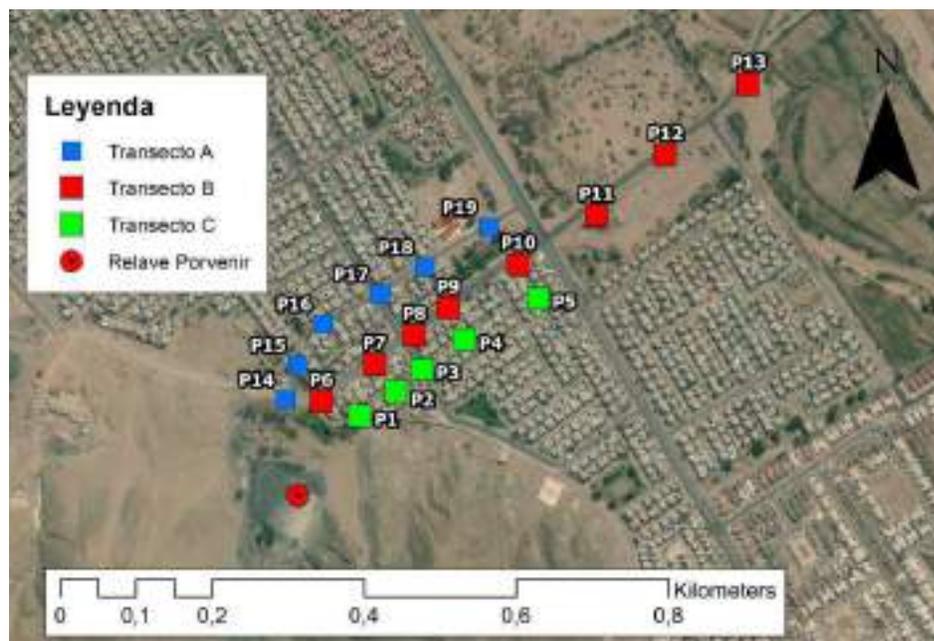


Figura 3-7: Transectos A, B, C establecido en la población El Palomar. Ejes de muestreo seleccionados para la evaluación del cambio de las concentraciones de metales al distanciarse del relave Porvenir. Fuente: Elaboración propia

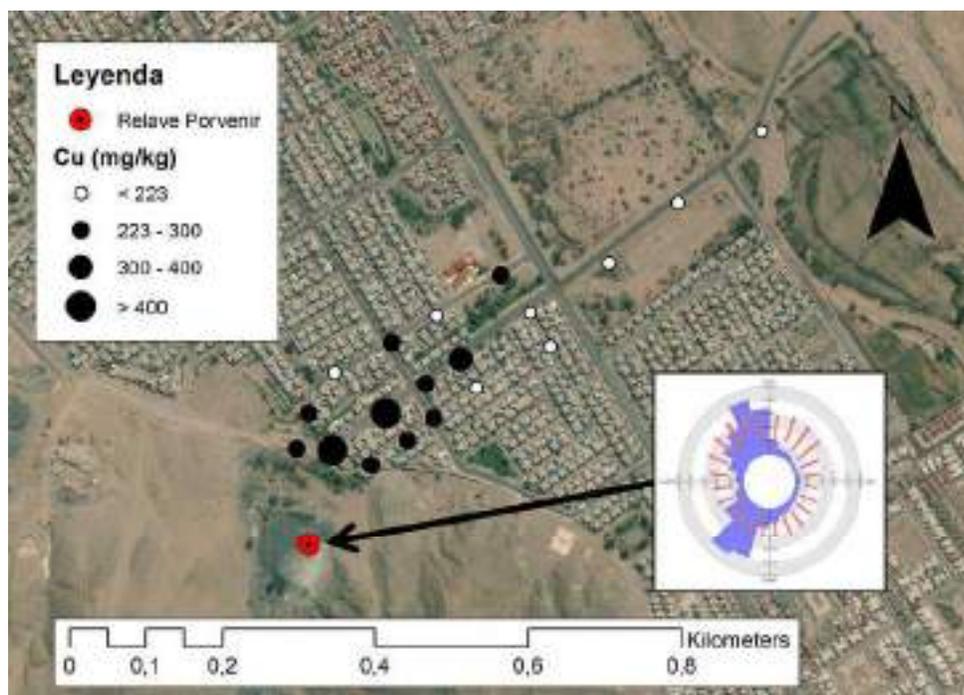


Figura 3-8: Concentración de Cu en mg/kg en muestras de polvo y rosa de los vientos anual sobre relave Porvenir. La concentración de Cu es mayor en los sectores más cercanos al relave y disminuye al alejarse de este. Fuente: Elaboración propia

En el Transecto B se observa una disminución de la concentración de Cu a medida que las muestras se alejan del relave en la dirección principal del viento. Cabe destacar que se consideró que existía una influencia proveniente del relave, cuando la concentración de Cu en la muestra está sobre el valor *background* calculado (223 mg/kg). El relave Porvenir en promedio posee 1.341 (mg/kg) de Cu, por lo que es la única fuente de Cu de consideración en la zona. Además como se detalla en la sección 3.5.1, es un relave ubicado en un valle entre cerros que canaliza los vientos en una dirección y por lo tanto se direcciona también la dispersión del material de relave.

A pesar de que la literatura plantea un rango de dispersión del material de relave de 1.800 m, las concentraciones sobre el valor *background* se mantienen hasta aproximadamente 300 m desde el centro del relave. Las condiciones de viento en la ciudad establecen un rango de dispersión menor a la teórica, debido a la presencia de estructuras y vegetación que limita la dispersión del material. En la Figura 3-9 se observa el rango de dispersión mucho menor al teórico y que corresponde a un efecto de 9.2% del área total de la ciudad. A pesar de esto, el alto valor *background* de Cu no permite apreciar en su totalidad el efecto del relave en los polvos de la ciudad. Una forma de mejorar la estimación del rango de dispersión, es utilizar otro metal como rastreador, en este caso el Hg sería un buen elemento para realizar el estudio.

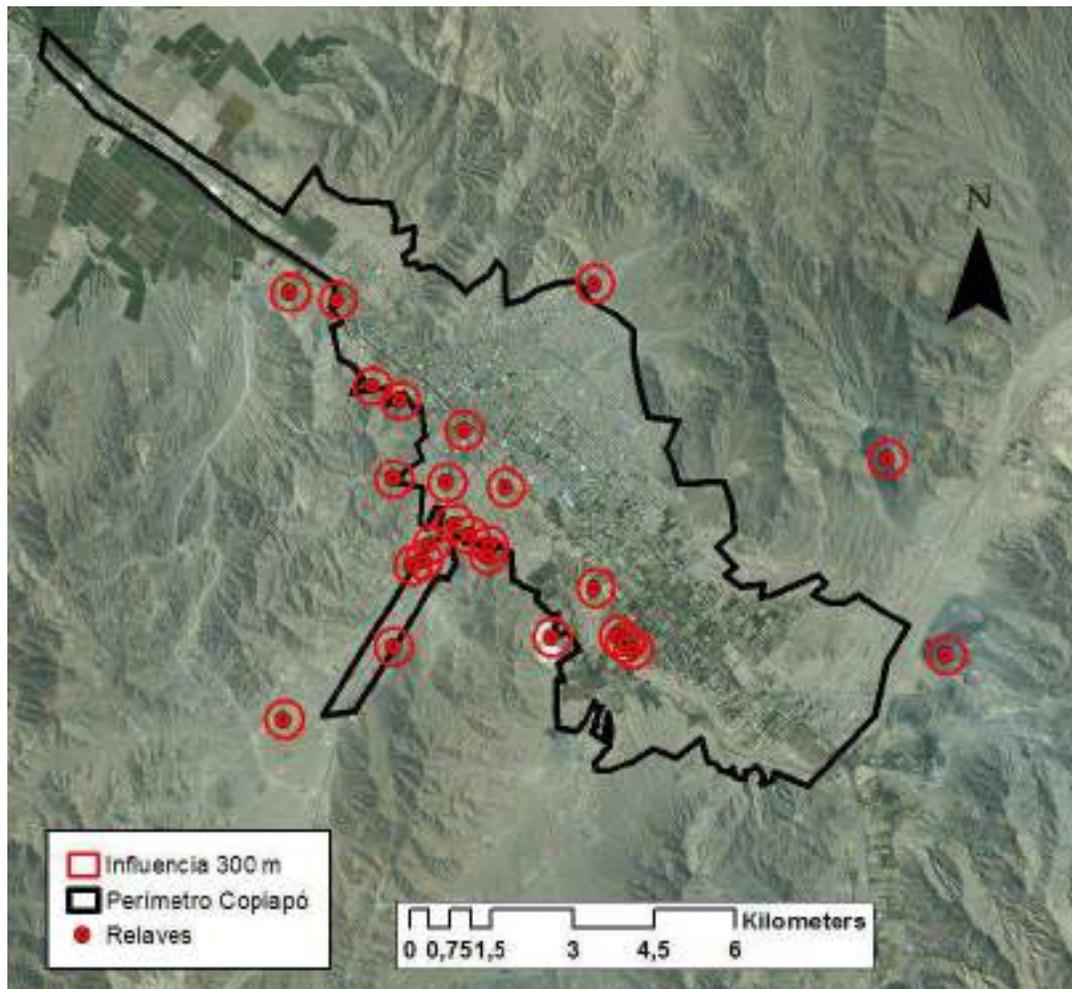


Figura 3-9: Mapa de influencia estimado para todos los relaves cercanos a la ciudad. El rango se estimó en base a la dispersión observada en el estudio del relave Porvenir. Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Fundición de cobre

Ubicación y emisiones: La fundición de cobre Hernán Videla Lira o Paipote se ubica a más de 8 km del centro de la ciudad (Figura 3-10).

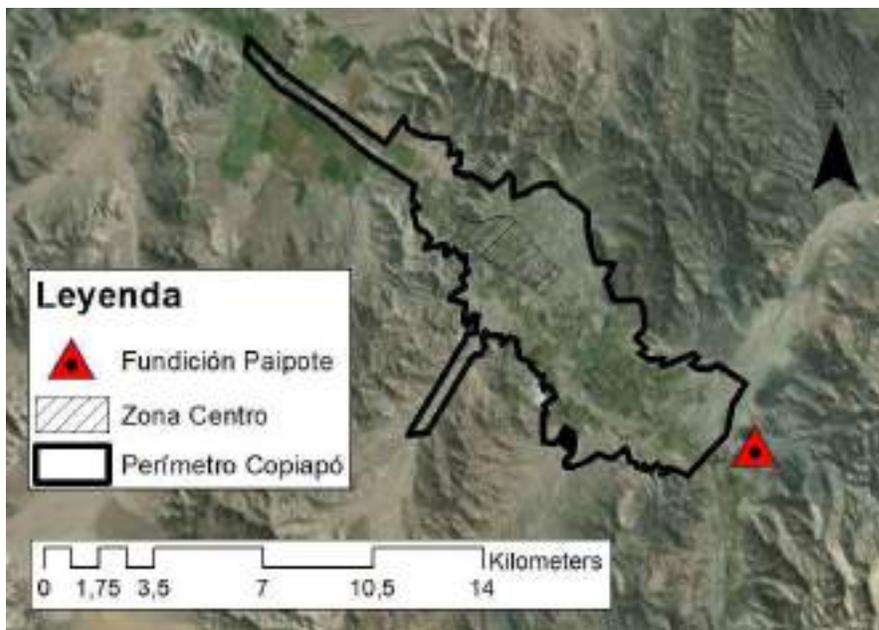


Figura 3-10: Ubicación geográfica de Fundición Paipote y centro de Copiapó. La chimenea de la fundición se ubica a 8 km de la zona centro de la ciudad y en el borde del perímetro urbano. Fuente: Elaboración propia

A pesar de que las emisiones de esta fundición no han sido caracterizadas, a través de bibliografía nacional e internacional se han estudiado los metales que comúnmente se asocian a las emisiones de este tipo de fundiciones.

En Chile, las emisiones de las fundiciones de cobre Ventanas y Caletones han sido caracterizadas destacando metales como As, Cu, Pb y Zn (Hedberg et al., 2005). Esta caracterización concuerda con el material particulado estudiado en numerosos sectores cercanos a fundiciones de cobre en toda la zona norte de Chile, caracterizado por estar enriquecido en As, Bi, Br, Cu, Ni, Pb, S y Zn al igual que los suelos cercanos en que destacó la presencia de As, Bi, Cu, Mo, Pb, S, V y Zn (Gidhagen et al., 2002). De la misma manera en la zona sur de Santiago se realizó la caracterización del material particulado, durante y después de un paro en el funcionamiento de la fundición de cobre, descubriendo

que el Cu, As, S y Zn son los principales rastreadores de estas emisiones (Romo-Kröger et al., 1994). Estudios realizados en suelos cercanos a la fundición de cobre de Puchuncaví, destacaron también el enriquecimiento en As, Cu, Pb y Zn (De Gregori et al., 2003; Ginocchio et al., 2004; Parra, Bravo, Quiroz, Moreno, Karanasiou, Font, Vidal, & Cereceda, 2014).

Estos estudios concuerdan con el trabajo realizado por Vojtech Ettler en el año 2016, en donde analizó 160 estudios e investigaciones científicas de caracterización de emisiones de fundiciones no ferrosas, entre ellas las de cobre. Al igual que en los estudios nacionales, las emisiones se caracterizan por el As, Cu, Ni, Pb, y Zn. Por otro lado, estudió en 5 de estas fundiciones de cobre las emisiones de Hg, donde no destacaron altas concentraciones en los suelos cercanos.

Además del perfil químico de las emisiones, existe un factor físico asociado a estas fuentes contaminantes. Las partículas de forma esférica son un rastreador del efecto de la fundición en la ciudad de Copiapó, ya que no existen plantas termoeléctricas u otras industrias con hornos que trabajen sobre los 1.400 °C. Sobre esta temperatura el carbón y la materia mineral se descomponen, y luego bajo un rápido enfriamiento (después de la zona de combustión), se da paso a la formación de partículas esféricas y amorfas (Kutchko & Kim, 2006). Diferentes estudios han demostrado por este método el efecto de fundiciones en diversas matrices, como nieve, polvos y sedimentos marinos (Parra et al., 2015; Tye, Hodgkinson, & Rawlins, 2006; Zdanowicz, Banic, Paktunc, & Kliza-Petelle, 2006). La presencia de estas partículas en suelos o polvos de la ciudad comprobaría también el aporte proveniente de la fundición en estas matrices.

Trasporte asociado: El transporte de las emisiones de la fundición, depende exclusivamente de la dirección del viento predominante. Por esta razón, en la Figura 3-11 y Figura 3-12 se indican la rosa de los vientos sobre la chimenea de Paipote para las 4 estaciones del año y la rosa de los vientos anual, respectivamente. Estas rosas de los vientos se obtienen del modelador eólico del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, que se detallará en la sección 3.5.1. Se puede observar que la dirección del viento es altamente dependiente de la estación del año y que existen 3 direcciones predominantes,

vientos provenientes del este, del noroeste y del sudoeste. Las barras azules indican el porcentaje de tiempo que el viento sopla desde esa dirección y las barras rojas indican el rango inter-cuartil de velocidad de viento para cada intervalo de dirección.

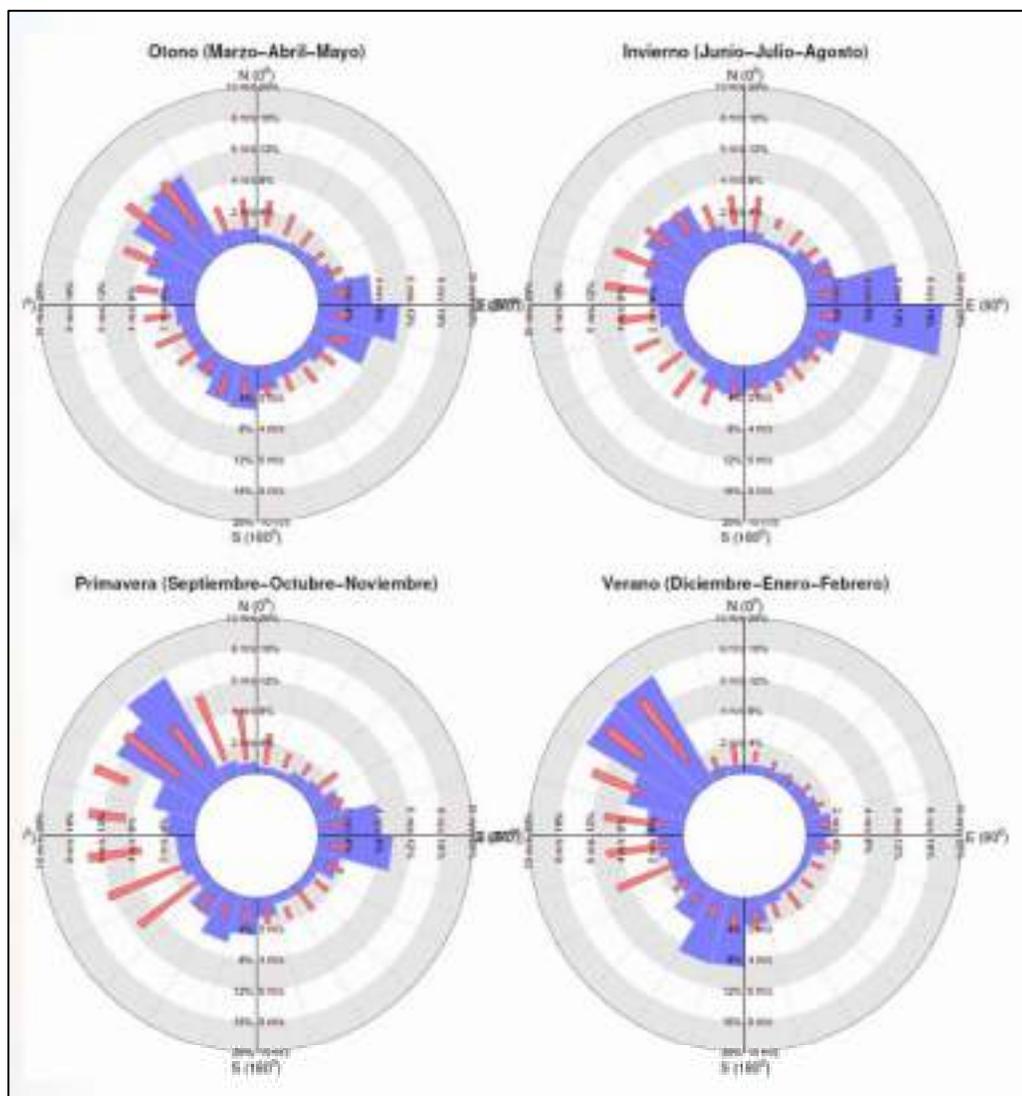


Figura 3-11: Rosas de los vientos para la fundición Paipote, en cada estación del año. Se observa predominancia de los vientos de dirección noroeste en primavera y verano. En otoño e invierno predominan los vientos provenientes del este, hacia la ciudad de Copiapó. Fuente: Explorador eólico del Ministerio de Energía, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (2012).

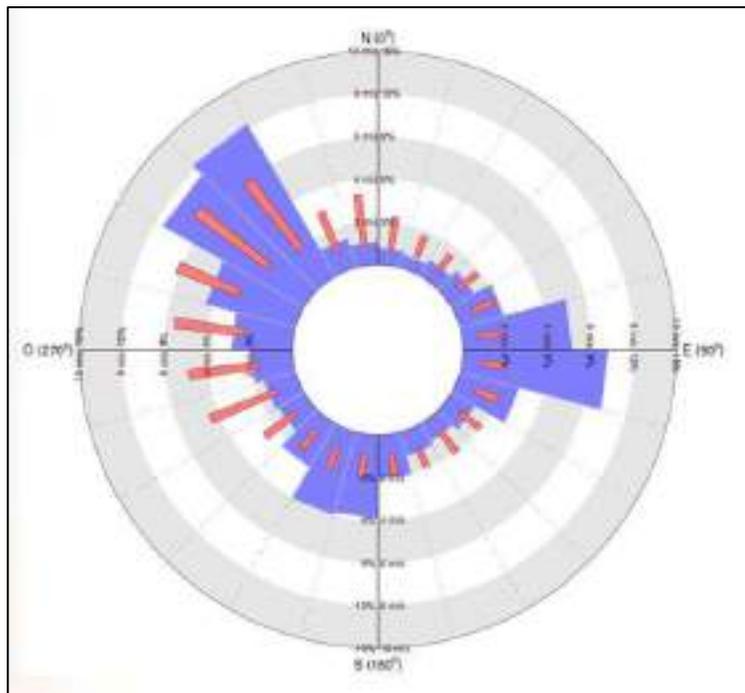


Figura 3-12: Rosa de los vientos anual para la fundición Paipote. Los vientos predominantes son en dirección nororiente hacia Tierra Amarilla y en segundo lugar hacia el este en dirección hacia Copiapó. Fuente: Explorador eólico del Ministerio de Energía, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (2012).

Para la ciudad de estudio, el viento de más importancia es el proveniente del este, que trasladaría las emisiones hacia Copiapó. Por otro lado, los vientos de mayor intensidad (barras rojas) se dirigen desde el norte hacia Tierra Amarilla. Situación que justifica los múltiples casos de emergencia ambiental vividos en el poblado de Tierra Amarilla y también que sea una zona declarada como saturada por anhídrido sulfuroso.

Por otro lado, en el año 1994 se realizó una modelación de las emisiones provenientes de la chimenea de Paipote, que según las condiciones de viento, pueden alcanzar la ciudad de Copiapó (Figura 1-2). El transporte regional de estas emisiones puede llevar los contaminantes a ciudades tan lejanas como Vallenar (Figura 1-3). Estas emisiones pueden llegar a dispersarse desde 10 km hasta 100 km según sean las condiciones de viento (Gidhagen et al., 2002). Diversos autores sugieren distancias de dispersión, desde 5 a 35 km (De Gregori et al., 2003) hasta 200 km (Hedberg et al., 2005), sin embargo la ciudad de Copiapó se ubica a menos de 10 km de la chimenea de la fundición.

3.1.3 Tráfico

Ubicación: El tráfico es considerado como una fuente de contaminación móvil, no se puede asociar a una ubicación espacial específica. Pero los lugares de la ciudad que posean mayor cantidad de calles y densidad vehicular podrían estar asociados a mayor contaminación. En la Figura 3-13 se muestran las calles de la ciudad, destacando la presencia de la Avenida Copayapu que conecta Tierra Amarilla con el centro de la ciudad y la antigua Ruta 5 que hasta el año 2014 atravesaba la ciudad. Por otro lado, el centro de la ciudad posee una alta concentración de calles (Figura 3-14), por lo que este podría encontrarse más contaminado con elementos de origen vehicular, como también las carreteras y vías principales de la ciudad.

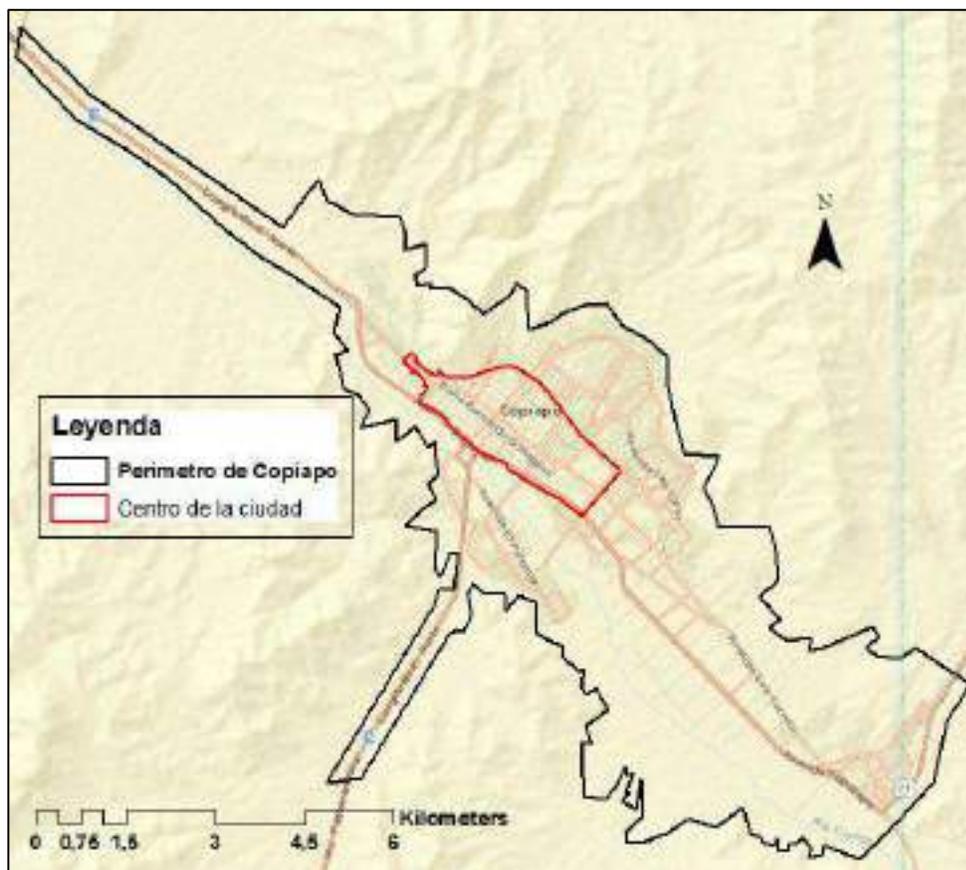


Figura 3-13: Calles de la ciudad de Copiapó. Se destaca la presencia de grandes vías como la ex Ruta 5 Norte y la Avenida Copayapu. Fuente: Elaboración propia.

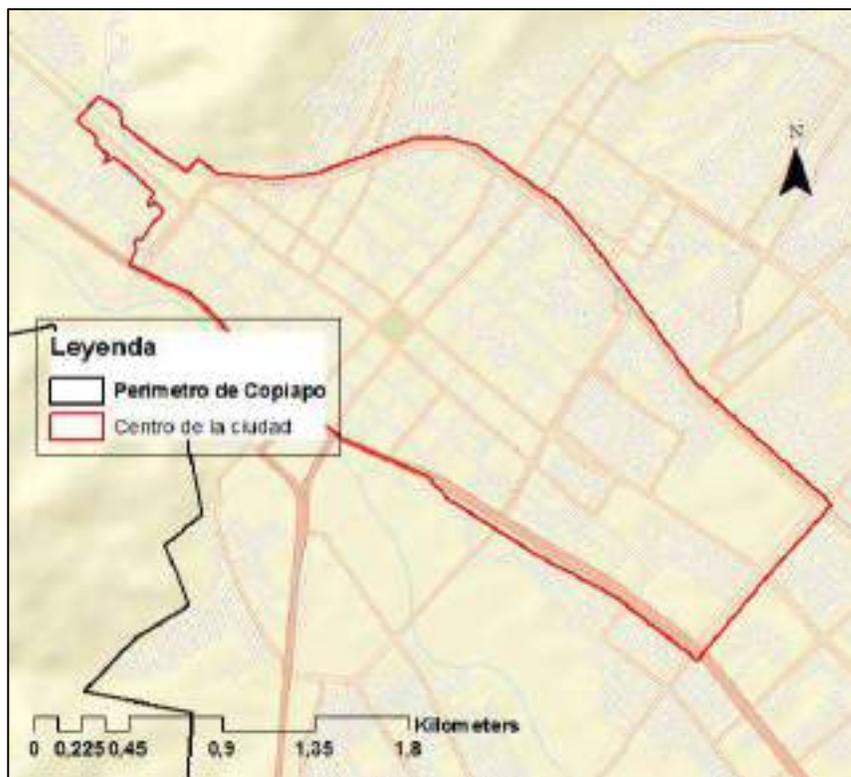


Figura 3-14: Calles del centro de Copiapó. Se observa gran cantidad de calles en el centro de la ciudad, las cuales poseen alta densidad de tráfico. Fuente: Elaboración propia

Otra parte importante de la caracterización de esta fuente son los tipos de vehículos que existen en la ciudad. En la Tabla 3-6 se indica la cantidad de vehículos según tipo y se compara con otras ciudades del país. Se destaca que la cantidad de vehículos en Copiapó es alta respecto al resto a otras ciudades que lo superan ampliamente en habitantes. Para destacar este hecho en la Tabla 3-7 se presenta el número de vehículos según tipo, por cada 100 habitantes.

Tabla 3-6: Tipos de vehículos en Copiapó y a nivel nacional.

	Copiapó	Santiago	Antofagasta	Temuco	Total País
Motorizados	43.313	1.446.566	93.371	67.758	4.647.062
Camión simple	1.667	31.480	3.705	2.436	148.093
Automóviles	25.536	1.014.568	58.532	41.271	2.917.992
Camionetas	9.152	162.204	16.076	13.024	825.711
Habitantes	158.438	4.978.525	346.126	268.720	16.572.475

Fuente: INE, 2015.

Se puede observar que al igual que Antofagasta, Copiapó posee un alto índice de camiones simples muy por sobre el valor nacional, debido principalmente a las actividades industriales y mineras en la zona. Por otro lado, la gran cantidad de camionetas destaca ampliamente mostrando que existen aproximadamente 58 por cada 100 habitantes.

Tabla 3-7: Número de vehículos por 100 habitantes en ciudades de Chile.

	Copiapó	Santiago	Antofagasta	Temuco	Nacional
Motorizados	273,4	290,6	269,8	252,2	280,4
Camión simple	10,5	6,3	10,7	9,1	8,9
Automóviles	161,2	203,8	169,1	153,6	176,1
Camionetas	57,8	32,6	46,4	48,5	49,8

Fuente: Elaboración en base a INE, 2014 y 2015.

Caracterización de emisiones: El tráfico puede caracterizarse por dos tipos de emisiones, por el desgaste de materiales y por emisiones originadas en la combustión de los motores. En el primer caso, se destacan el Cu, Sb y Ba en la abrasión de frenos y llantas; el Zn y el Ca en la combustión de lubricantes y el Zn en el desgaste de neumáticos (Sternbeck, Sjodin, & Andréasson, 2002; Viana et al., 2008). En cuanto a las emisiones, antiguamente eran principalmente caracterizadas por el Pb de las gasolinas (Ondov, Zoller, & Gordon, 1982), pero en Chile esta fue prohibida el año 2001 por el Decreto 136. Esto dio paso al uso de otros elementos para mejorar la combustión de la gasolina, como el Metilciclopentadienilo Tricarbonilo Manganeso (MMT) introducido para des-plomar la gasolina. Este es un compuesto orgánico rico en Mn, por lo que un rastreador actual para las emisiones es también este elemento (Wong et al., 2006). Por otro lado, la caracterización del efecto del tráfico en suelos se asocia a metales como Zn, Ba, Fe, Ti y Cd (Rueda-Holgado et al., 2016) o también a V, Mn, Cr, Co (Salmanighabeshi et al., 2015). Por otro lado, en polvos de calles el Cu, Zn y el Pb se han asociado al tráfico (Meza-Figueroa et al., 2009) y en el material particulado el Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Cl, Br, Ba se han relacionado también a esta fuente (Ondov et al., 1982).

3.1.4 Agricultura

Ubicación y contaminantes asociados: La agricultura en la zona se ubica principalmente en las zonas periféricas de la ciudad, como se observa en la Figura 3-15. Se indican las zonas agrícolas de la ciudad al sur-este de ésta, por otro lado en las afueras de la ciudad y hacia la costa se observa grandes zonas agrícolas fuera del plan regulador de la ciudad.

Las prácticas agronómicas pueden aportar diversos metales al suelo, especialmente dependiente del tipo de fertilizante utilizado (lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas, fertilizantes inorgánicos, agroquímicos, abono natural, entre otros). Diversos estudios indican que el Cu, Cd, P, S y Zn pueden enriquecer el suelo agrícola debido a la utilización de fertilizantes (Cai et al., 2012; Nicholson, Smith, Alloway, Carlton-Smith, & Chambers, 2003; Xue et al., 2014). Por otra parte, a nivel nacional se realizó un estudio de los fertilizantes más utilizados en Chile detectando que, al igual que en otros países, el Cd, Cr, Cu, Ni, V y Zn son los principales metales asociados a la agricultura en el país (Molina, Aburto, Calderón, Cazanga, & Escudey, 2009). Estas prácticas de fertilización también son utilizadas en plazas y parque urbanos por lo que el aporte de esta fuente no se limita solo a las zonas agrícolas. Otro factor importante relacionado a las prácticas agronómicas, es el riego dado que en la zona el agua posee un alto contenido de sales estas se almacenarán y enriquecerán los suelos.

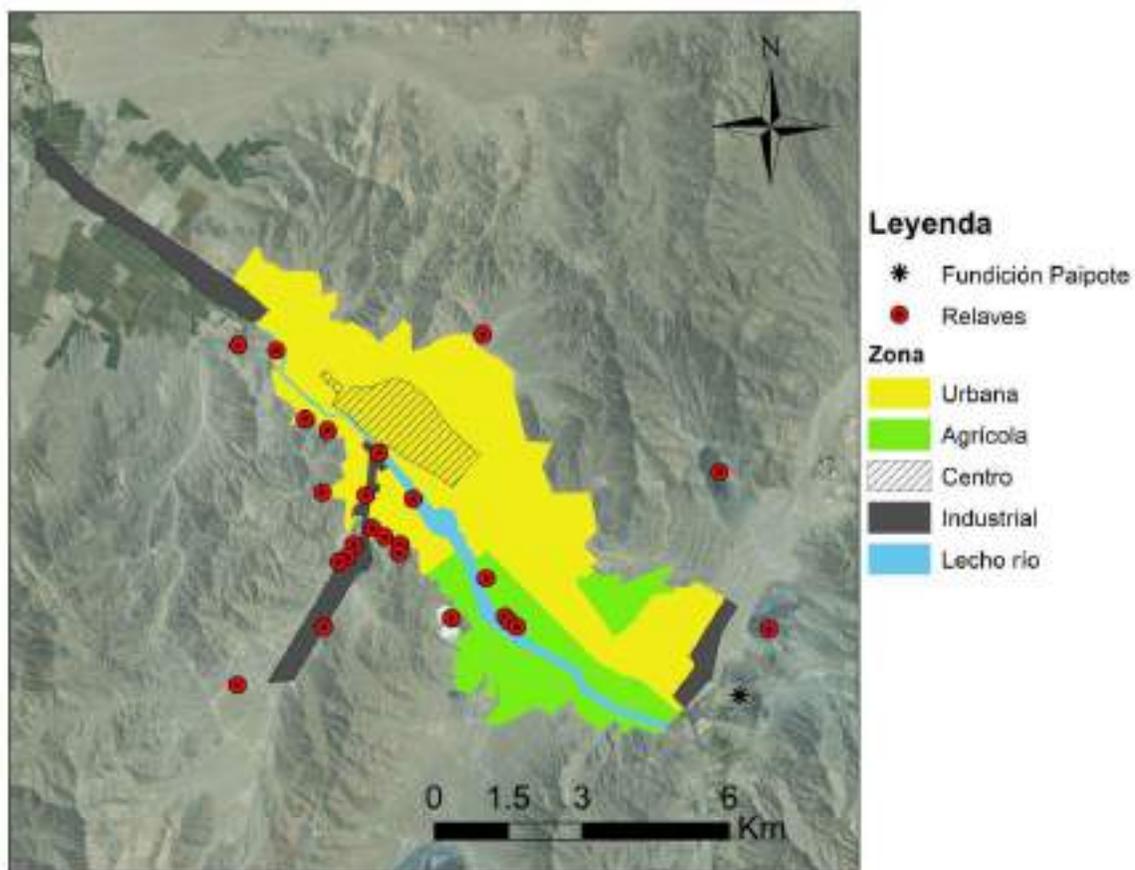


Figura 3-15: Plano regulador de Copiapó. Las zonas agrícolas de la ciudad se ubican principalmente en las zonas sureste y noroeste. Se destaca la presencia de relaves en las zonas definidas como urbanas y agrícolas. Fuente: CEDEUS, 2015.

3.2 *Background* geoquímico de la zona

3.2.1 Valores *background* para cada método de cálculo

Cada método posee distintas metodologías para el análisis de los datos que fueron explicadas en la sección 2.3.4, cada una descarta diferentes cantidades de muestras según sea el elemento y el método. En la Tabla 3-8 se presenta la cantidad de muestras que se utilizaron para el cálculo del valor *background* después del descarte de muestras correspondientes a cada método.

Tabla 3-8: Número de muestras para el cálculo del valor *background* después del descarte correspondiente al método para cada elemento.

Número de muestras para el cálculo						
Elemento	Método					
	Lepeltier	Frecuencia acumulada	Rango normal	4sigma test	2sigma iterativo	Función distribución
Al	45	60	60	60	52	30
As	32	60	60	60	44	30
Co	40	60	60	60	59	30
Cr	51	60	60	60	38	30
Cu	40	60	60	60	49	30
Fe	39	60	60	60	59	30
Hg	42	60	60	59	49	30
Mn	31	60	60	59	58	30
Ni	54	60	60	60	46	30
P	46	60	60	60	44	30
Pb	33	60	60	59	31	30
Ti	54	60	60	60	46	30
V	58	60	60	60	58	30
Zn	50	60	60	59	56	30

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3-16 y Figura 3-17 se ejemplifica la metodología de cálculo para el vanadio con el método de Lepeltier y de frecuencia acumulada, respectivamente.

Para el método de Lepeltier se grafica la concentración de vanadio con respecto a la frecuencia relativa (ambos en escala logarítmica), cuando se observa una desviación

abrupta en la curva (Flecha negra en Figura 3-16), los valores sobre este punto se descartan y luego se calcula el valor *background* con todo el resto de los valores con la formula “media+2 σ ”.

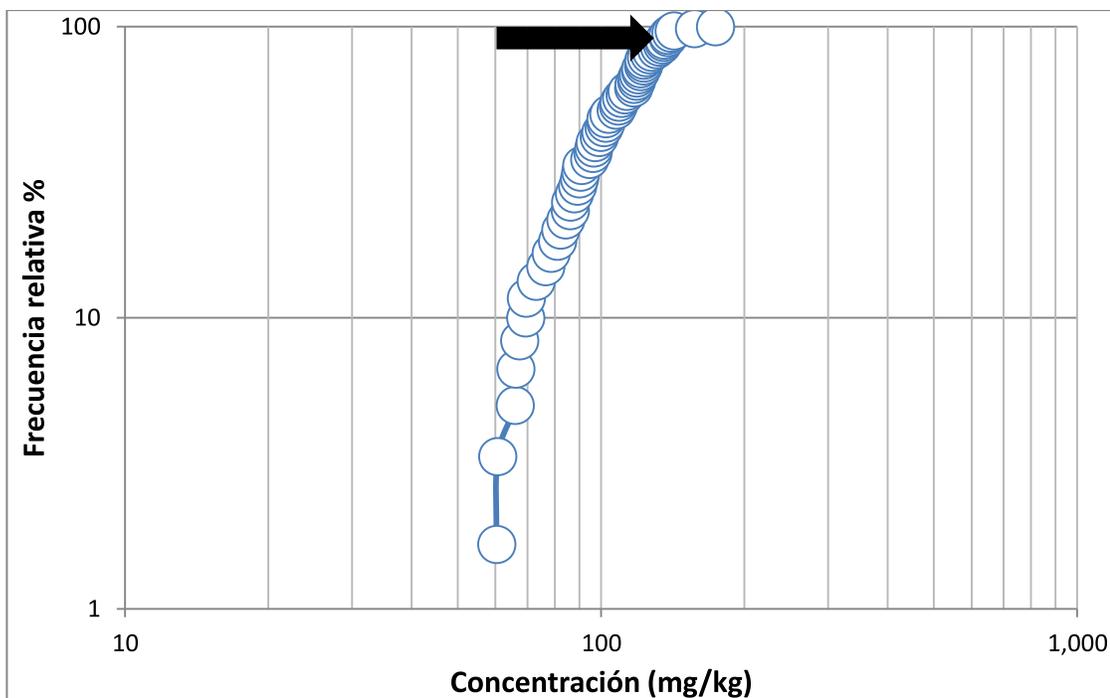


Figura 3-16: Cálculo del valor *background* para V según metodología de Lepeltier. Se descartan para el cálculo, muestras con altas concentraciones de V después de la desviación en la curva (Flecha Negra). Fuente: Elaboración propia

Para el método de frecuencia acumulada se grafica la concentración y la frecuencia acumulada, el punto en que existe una desviación en la curva (Flecha negra en Figura 3-17) es el valor *background* que separa las muestras posiblemente contaminadas antropogénicamente de las naturales. Además una segunda desviación (Flecha Azul en Figura 3-17) indica muestras influenciadas por la acción humana.

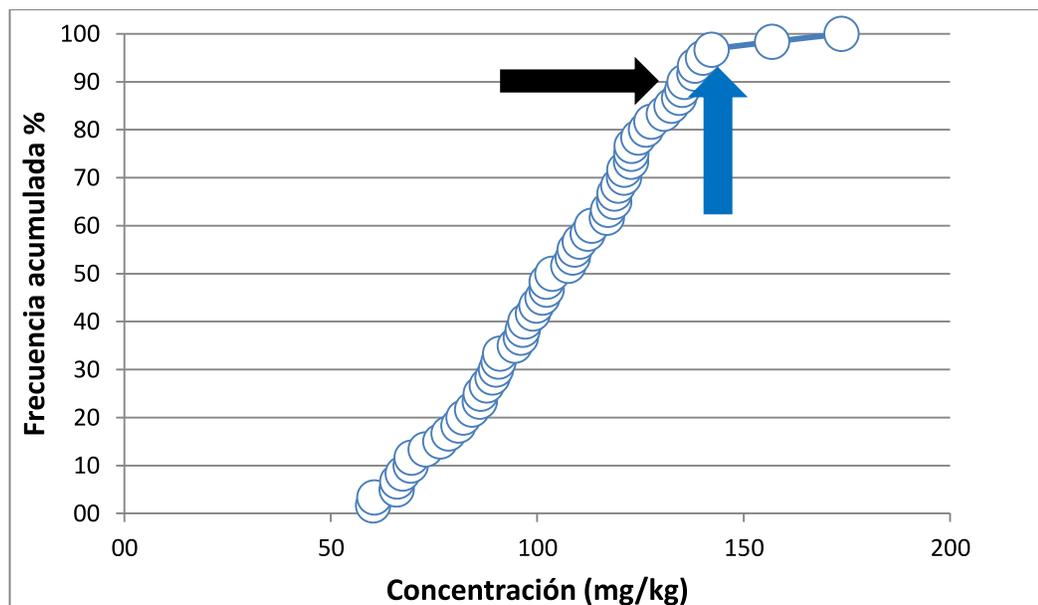


Figura 3-17: Cálculo del valor *background* de V según metodología de frecuencia acumulada. Se descartan las muestras sobre la primera desviación detectada (Flecha Negra), las tres muestras sobre la segunda desviación (Flecha azul) pueden considerarse influenciadas antropogénicamente.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3-9 se presentan los valores *background* estimados según los 6 métodos descritos en base a las muestras obtenidas en octubre de 2015, el detalle de estas muestras se indica en la Sección 3.3.5.

Tabla 3-9: Valores *background* para la zona de Copiapó según 6 métodos de cálculo.

Elemento	Background (mg/kg)					
	Método					
	Lepeltier	Frecuencia acumulada	Rango normal	4sigma test	2sigma iterativo	Función distribución
Al	23.251	22.808	27.170	27.170	24.329	26.637
As	30	34	116	116	45	45
Co	22	21	27	27	27	28
Cr	31	24	36	36	27	38
Cu	223	206	1.142	1.142	560	298
Fe	47.997	46.792	56.551	56.551	55.760	60.400
Hg	0,21	0,22	0,49	0,41	0,27	0,26
Mn	1.068	1.376	2.099	1.913	1.861	1.831
Ni	20	17	22	22	18	23
P	1.108	1.074	1.793	1.793	1.097	1.241
Pb	22	33	100	87	20	32
Ti	2.102	1.666	2.422	2.422	1.975	2.152
V	150	126	156	156	150	153
Zn	195	180	339	279	218	215

Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que para el Ca, Li, Mg, Na y Sr no se calcularon los valores *background*, debido a que son elementos que no cumplen con las condiciones impuestas por el método. Todos los valores *background* calculados se basan en la metodología de medición de parámetros seguida en esta investigación, por lo que son aplicables a casos de estudio con métodos de medición similares. El As, Cu, Pb y Zn, son elementos altamente asociados a las emisiones de las fundiciones de cobre (Ettler, 2015; Hedberg et al., 2005), los valores *background* para elementos que no provienen de la fundición varían levemente entre métodos, manteniendo el orden de magnitud y valores cercanos, es decir, las muestras obtenidas no poseen enriquecimiento en estos metales. Por el contrario, los cuatro elementos asociados a emisiones de fundición presentan alta variabilidad entre los métodos. Esto se debe principalmente al enriquecimiento en cuatro de las doce puntos de muestreo dentro de las formaciones geológicas JK3 y Ki1m (Ver sección 3.3.5). Por lo que el valor *background* obtenido es altamente dependiente del método utilizado. A pesar de esto, los métodos de Lepeltier, frecuencia acumulada y función distribución, logran eliminar dentro de su metodología las muestras contaminadas, lo que demuestra la robustez del método. Debido al mejor desempeño que presenta al descartar posibles muestras contaminadas se eligió utilizar la metodología de Lepeltier para los valores *background*.

3.3 Concentraciones elementales en matrices sólidas

3.3.1 Calidad de los resultados

Para cada matriz de estudio se analizan los resultados de calidad, desviación estándar relativa, ajuste a los materiales de referencia certificados y blancos.

La desviación estándar relativa (RSD) es una medida de la dispersión con respecto a la media de los datos, se calcula como la desviación estándar dividido por la media y se expresa en porcentaje. En este caso el RSD se calcula en base a los triplicados realizados en las muestras. Para las mediciones de los 18 elementos realizadas con ICP-OES en las cuatro matrices de estudio los valores de RSD promedio no superaron el 13,3% con un máximo de 28% y un mínimo de 0,2%. En el caso de la matriz de lodo los RSD para todos los elementos son más bajos (2,4% en promedio), esto debido principalmente a que son muestras mucho más homogéneas que el resto de las matrices. Por otro lado, el suelo, polvo de calles y *background* mantuvieron RSD similares para todos los elementos. En el caso del mercurio, el RSD promedio no superó el 15,1% pero en este caso la matriz de *background* alcanzo un RSD máximo de 55,4% esto debido principalmente a que los valores de Hg son mucho más bajos que en las otras tres matrices, por lo tanto la variabilidad es mucho mayor. Para el suelo, lodo y polvo de calles, la RSD máxima de Hg se mantuvo cercana al 20%. El detalle de los valores promedio, máximo y mínimo para el RSD se presenta en el Anexo E.

El ajuste a los materiales de referencia, se refiere a la comparación entre el valor medido y el valor certificado, expresado en porcentaje. Para la medición con ICP-OES se utilizaron principalmente dos materiales de referencia certificados LGC6187 (un sedimento de río) y IAEA-158 (un sedimento marino). Para las mediciones de mercurio se utilizaron los materiales de referencia IAEA-457 y IAEA-458 ambos sedimentos marinos y LGC6187 (todas las concentraciones de los materiales de referencia certificados se presentan en el Anexo E).

Para el material LGC6187, los elementos As, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, V, Zn y Hg tuvieron ajuste promedio cercano al 100%, solo el Cu presento un ajuste promedio de 128% en series de medición excepcionales. (Los valores promedio, máximos y mínimos de ajuste para LGC6187 se presentan en el Anexo E).

Para el material de referencia IAEA-158, los elementos Al, Cr, Fe, Li, Mn, Sr, Ti y V, obtuvieron ajustes bajos, debido principalmente a que este material fue referenciado con una digestión total de las muestras y el análisis que se presenta en este estudio es para muestras digeridas de forma parcial. Debido a lo anterior, elementos asociados a la fase de aluminosilicatos tendrán un ajuste más bajo, ya que no se digieren con la metodología utilizada. Por otro lado los elementos de As, Ca, Co, Cu, Mg, Ni, Pb y Zn obtuvieron porcentajes de ajuste cercanos al 100% (los valores promedio, máximos y mínimos de ajuste para IAEA-158 se presentan en el Anexo E). Para el IAEA-457 y IAEA-458 medidos con el DMA-80 los porcentajes de ajuste para el Hg fueron cercanos al 100%.

En general el ajuste logrado en las diversas series fue satisfactorio y cercano al 100% a excepción de elementos como el Al que tuvieron promedio bajos debido a que la digestión utilizada no fue la misma que el material de referencia y también en casos excepcionales donde se atribuye a errores de preparación en los MRC.

Los blancos para los 18 elementos medidos por ICP-OES se mantuvieron en general, bajo el límite de cuantificación (LQ). Los LQ para estos 18 elementos se presentan en la Tabla 3-10. En series de medición excepcionales los siguientes elementos Al, Ca, Fe, Mg y Na presentaron algunos valores sobre el LQ, pero al ser valores muy bajos, respecto a las concentraciones en las muestras, no se restaron de las concentraciones finales. En el caso del Hg medido con DMA, los valores se mantuvieron bajo el LQ (Tabla 3-10) o levemente superiores a este, a pesar de estar sobre el LQ son valores muy bajos en comparación a las concentraciones de Hg en las muestras, por lo que no son influyentes en los valores finales. El detalle de los valores máximos en blancos por elementos y por matriz se encuentra en el Anexo E.

Tabla 3-10: Límite de cuantificación estimado para cada elemento en mg/kg.

Elemento	Instrumento	LQ (mg/kg)
Al	ICP-OES	10
As	ICP-OES	5,0
Ca	ICP-OES	10
Co	ICP-OES	1,0
Cr	ICP-OES	2,0
Cu	ICP-OES	1,0
Fe	ICP-OES	5,0
Li	ICP-OES	1,0
Mg	ICP-OES	10
Mn	ICP-OES	1,0
Na	ICP-OES	5
Ni	ICP-OES	1,0
P	ICP-OES	1.000
Pb	ICP-OES	5,0
Sr	ICP-OES	1,0
Ti	ICP-OES	2,0
V	ICP-OES	1,0
Zn	ICP-OES	1,0
Hg	DMA	0,001

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Muestras de Suelos

3.3.2.1 Concentración elemental en suelos

En la Tabla 3-11 se presentan la concentración media, desviación estándar, mínimo y máximo para las 42 muestras de suelo obtenidas en la ciudad de Copiapó. En la Tabla F-1 del Anexo F se adjuntan los valores para cada una de las muestras de suelo.

Tabla 3-11: Resumen de concentraciones elementales en muestras de suelo en mg/kg.

Elemento	Media \pm Desviación estándar (Mínimo – Máximo) (mg/kg)
Al	17.785 \pm 4.874 (5.072 - 25.782)
As	30 \pm 23 (11 - 122)
Ca	36.345 \pm 15.981 (11.653 - 109.731)
Co	20 \pm 18 (8 - 110)
Cr	18 \pm 4 (11 - 26)
Cu	316 \pm 622 (37 - 4.013)
Fe	32.797 \pm 9.603 (19.723 - 67.156)
Hg	2,7 \pm 10,7 (0,1 - 70)
Li	28 \pm 9 (4 - 47)
Mg	10.745 \pm 2.370 (5.718 - 15.089)
Mn	976 \pm 657 (377 - 3.533)
Na	2.051 \pm 2.972 (750 - 17.788)
Ni	15 \pm 5 (7 - 24)
P	3.036 \pm 982 (920 - 6.413)
Pb	39 \pm 61 (6 - 410)
Sr	161 \pm 54 (40 - 304)
Ti	1.147 \pm 246 (235 - 1.506)
V	74 \pm 18 (30 - 139)
Zn	123 \pm 77 (42 - 506)

Fuente: Elaboración propia

El Cu, Hg y Pb poseen una media sobre el valor *background* obtenido (Ver sección 3.2.1), estos tres metales están altamente asociados a fuentes antropogénicas como la fundición de cobre, los relaves o las emisiones relacionadas al tráfico (Hedberg et al., 2005; Salmanighabeshi et al., 2015; Sternbeck et al., 2002; Viana et al., 2008). Las desviaciones

estándar de estos tres elementos son altas con respecto a la media, lo que indica heterogeneidad en las muestras a lo largo de todo Copiapó como también diversidad en las fuentes aportantes al material del suelo. En el caso específico del Hg, existe un valor anómalo de 70 ppm (Plaza Colipi, ex relave minero), lo que altera los resultados generales. Si se excluye este valor, la media es de 1,06 mg/kg que sigue estando por sobre el valor natural de mercurio y la desviación estándar disminuye a 0,9 mg/kg. Por otro lado los valores mínimos y máximos, indican la existencia de lugares no enriquecidos y altamente enriquecidos dentro de la ciudad, respectivamente.

3.3.2.2 Concentración elemental en fracción fina y gruesa de suelos

Las concentraciones elementales para las 10 muestras tamizadas a 53 μm (concentraciones se adjuntan en la Tabla F-2 en el Anexo F) se compararon con las concentraciones de la fracción gruesa (< 2 mm). A modo de referencia se muestran dos gráficos, uno de elementos naturales (Figura 3-18) y otro de elementos influenciados antropogénicamente (Figura 3-19) se incluyó el valor *background* calculado por el método de Lepeltier. El resto de los gráficos se presentan en el Anexo G.

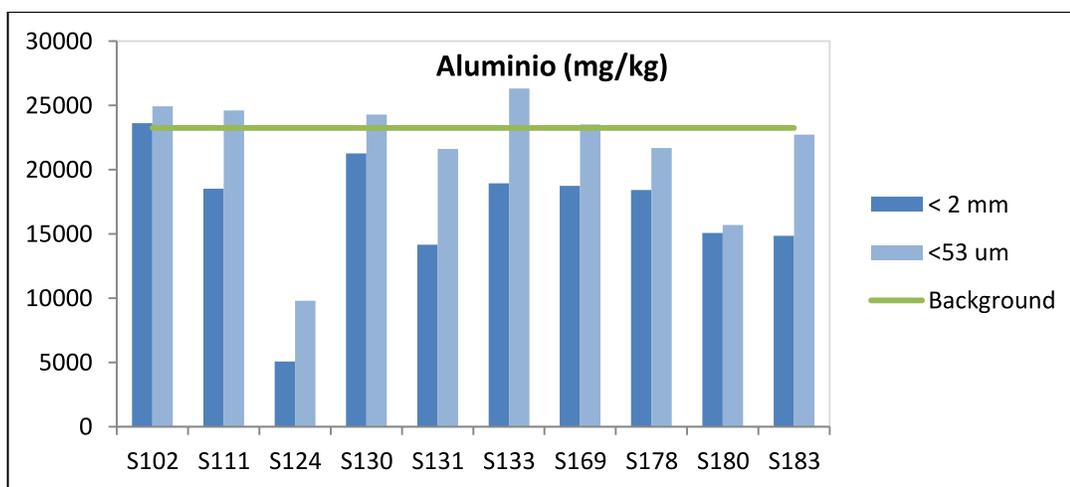


Figura 3-18: Concentración de Al en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Ambas fracciones de las muestras poseen concentraciones similares de Al, sugiriendo un origen natural de este elemento. Fuente: Elaboración propia

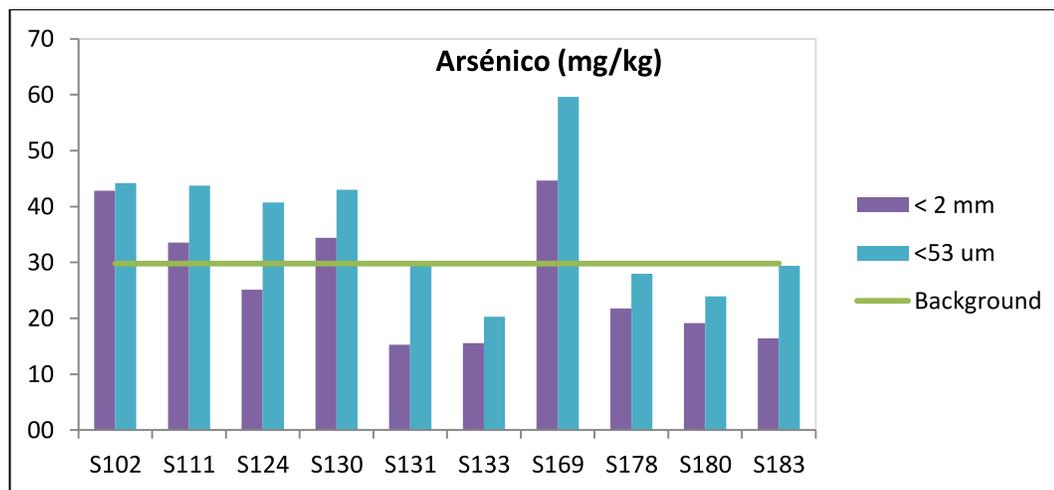


Figura 3-19: Concentración de As en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Las concentraciones de As se elevan en la fracción fina, sugiriendo un origen más relacionado a las acciones antropogénicas. Fuente: Elaboración propia.

El enriquecimiento de metales en la parte fina de las muestras sugiere un aporte de fuentes antropogénicas, pero se debe tener en cuenta el efecto enriquecedor de metales que tiene la mayor cantidad de arcilla, carbonatos, óxidos de manganeso y hierro (Ajmone-Marsan et al., 2008; Luo, Yu, & Li, 2011; Yadav & Rajamani, 2006). En este caso el Al en la parte fina es levemente superior a la fracción gruesa, explicado por la mayor superficie específica de las partículas finas, por lo que las concentraciones mayores son esperables (Ajmone-Marsan et al., 2008; Luo et al., 2011; Yadav & Rajamani, 2006). Además las concentraciones medidas se mantienen cercanas y bajo el valor *background* calculado. Por otro lado, el As muestra un mayor enriquecimiento en las partes finas y en algunos casos supera el valor *background* estimado. Por ejemplo, la muestra S169 muestra altos niveles de As pero a la vez la parte fina se encuentra aún más enriquecida. El enriquecimiento en las partes más finas se repite para los elementos de Cu, Cr, Zn, y Hg (Ver Anexo G).

3.3.2.3 Concentración elemental de suelos con digestión parcial y total

La digestión realizada con agua regia es útil para estimar la parte más móvil de los metales en las muestras, a diferencia de la digestión por ataque total que disuelve la matriz sólida por completo (Vandeberg, Martin, & Pierzynski, 2011). Por esta razón, si un elemento

aumenta considerablemente su concentración al utilizar digestión por ataque total indica que éste está relacionado a la matriz sólida y por lo tanto al material natural. Por el contrario si un elemento no varía considerablemente su concentración se relaciona a elementos externos a la matriz sólida que, posteriormente a la formación, fueron agregados por fuentes externas. En la Figura 3-20 y Figura 3-21 se muestra la comparación para 10 muestras de suelo entre los valores obtenidos por Agua regia y por Ataque Total, para los elementos de Na y As, respectivamente.

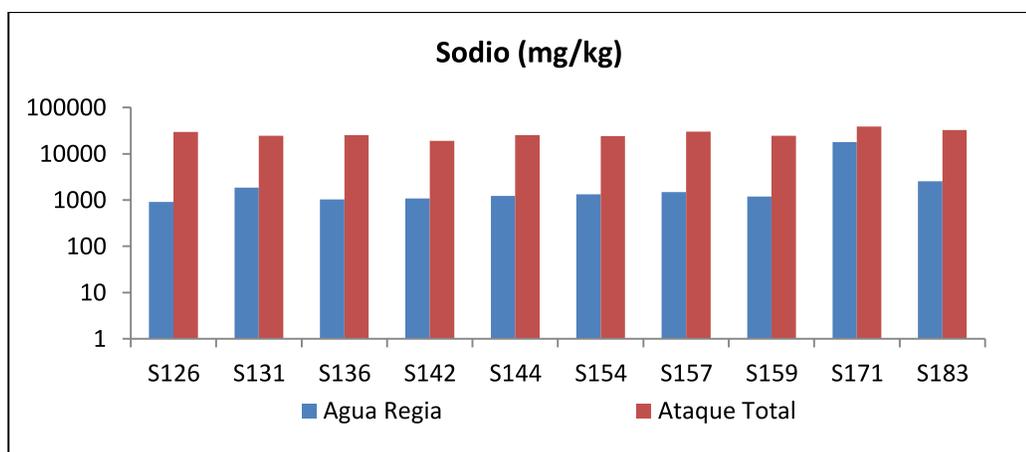


Figura 3-20: Concentración de Na por digestión con Agua Regia y con Ataque total en muestras de suelo. La concentración de Na aumenta considerablemente al digerir con Ataque total, atribuido a la disolución de aluminosilicatos ricos en Na. Fuente: Elaboración propia

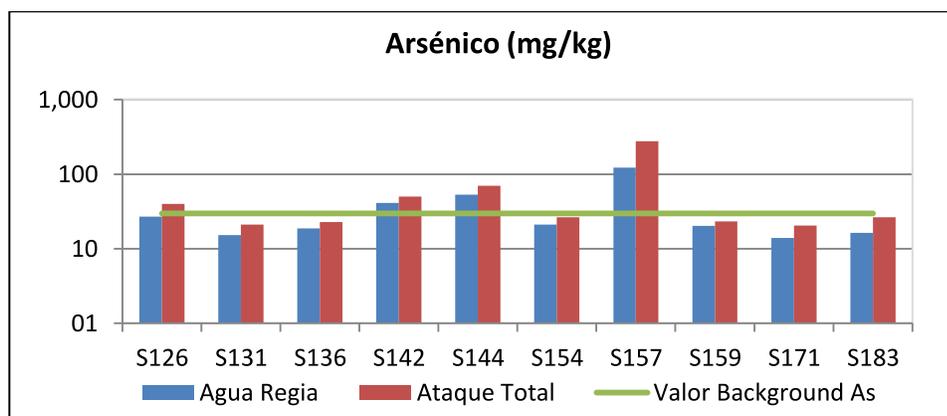


Figura 3-21: Concentración de As por digestión con Agua Regia y con Ataque total en muestras de suelo. La concentración de As aumenta levemente al digerir con Ataque total, indicando que es un elemento más móvil y sugiriendo que se relaciona a alguna fuente externa a la formación de la matriz sólida. Fuente: Elaboración propia

En el caso del Na, la concentración aumenta considerablemente al digerir con ataque total, en promedio aumenta su concentración en más de un 1.000% con respecto a la digestión con Agua Regia. Esto se explica principalmente por la disolución de aluminosilicatos de la matriz sólida, algunos ricos en Na como lo es la Albita. Por lo tanto el sodio es un elemento altamente relacionado a las fuentes naturales. En caso contrario se encuentra el As que mantiene valores similares para la mayor parte de las muestras, se identificó un aumento en las concentraciones de un 40% en promedio, esto indica que el As se relaciona a fuentes externas al origen del material. En el caso del Cr y el Li, son elementos que se relacionan a la matriz sólida natural que no es disuelta al igual que el Na. En el caso del Cu, Pb y Zn, las concentraciones se mantienen relativamente constantes al igual que con el As. Los gráficos para el resto de los elementos se adjuntan en el Anexo H. Cabe destacar que la muestra S157 es un caso especial en los suelos de Copiapó, ya que corresponde a la Plaza Colipi, lugar donde antiguamente existió un relave minero. Debido a esto una gran concentración de As y otros metales se mezclaron con la matriz de suelo, posiblemente debido a la existencia de restos minerales ricos en As y otros metales.

3.3.3 Muestras de Polvo de calles

3.3.3.1 Concentración elemental en polvo de calles

En la Tabla 3-12 se presentan la concentración media, desviación estándar, mínimo y máximo para las muestras de polvo de calles obtenidas en la ciudad de Copiapó. En el Anexo I se adjuntan los valores para cada una de las muestras.

Tabla 3-12: Resumen de concentraciones elementales en muestras de polvos de calle en mg/kg.

Elemento	Media \pm Desviación estándar (Mínimo – Máximo) (mg/kg)
Al	9.871 \pm 1.893 (6.586 - 21.528)
As	29 \pm 170 (9 - 1.373)
Ca	25.275 \pm 8.918 (11.328 - 69.303)
Co	17 \pm 13 (8 - 90)
Cr	28 \pm 20 (9 - 144)
Cu	885 \pm 6.749 (78 - 53.526)
Fe	39.210 \pm 20.046 (19.662 - 143.662)
Hg	0,34 \pm 0,53 (0,06 – 2,82)
Li	21 \pm 10 (12 - 64)
Mg	6.877 \pm 1.297 (4.974 - 12.897)
Mn	502 \pm 143 (304 - 1.126)
Na	2.514 \pm 3.154 (839 - 19.992)
Ni	13 \pm 7 (6 - 44)
P	1.402 \pm 1.748 (508 - 11.632)
Pb	52 \pm 72 (8 - 481)
Sr	103 \pm 50 (34 - 340)
Ti	990 \pm 198 (379 - 1.804)
V	101 \pm 30 (48 - 184)
Zn	220 \pm 858 (56 - 6.918)

Fuente: Elaboración propia.

La media en los elementos relacionados a actividades antropogénicas, como el As, Cu, Pb, Zn y Hg, se mantiene sobre los valores *background* correspondientes (Ver sección 3.2.1) indicando que al menos la mitad de los valores está sobre el valor base de la zona. La desviación estándar para todos los elementos en las muestras de polvo de calles, indica que estas son altamente heterogéneas y que de la misma forma las fuentes en que se originan son altamente variadas en composición. Para el caso de los elementos nombrados,

la variación de las concentraciones en las muestras es mayor, esto se explica porque existen muestras de polvo cercanas a fuentes de contaminación, que enriquecen los sectores cercanos con metales, produciendo una mayor heterogeneidad en las concentraciones. Los valores mínimos en cada elemento nos demuestran que dentro de la ciudad existen lugares sin enriquecimiento de metales pesados, pero a la vez los valores máximos indican lo contrario, resaltando que existen sectores con un potencial riesgo a la salud de la población.

3.3.3.2 Concentración elemental en fracción fina y gruesa de polvo de calles

Las concentraciones elementales para las 10 muestras de polvo de calles tamizadas a 53 μm , se adjuntan en el Anexo I. Se comparó las concentraciones para todos los elementos en la fracción fina y gruesa. A modo de referencia se muestran dos gráficos, uno de elementos naturales (Figura 3-22) y otro de elementos influenciados antropogénicamente (Figura 3-23). Además se incluye el valor *background* calculado por el método de Lepeltier a modo de referencia. El resto de los gráficos se presentan en la sección Anexo J.

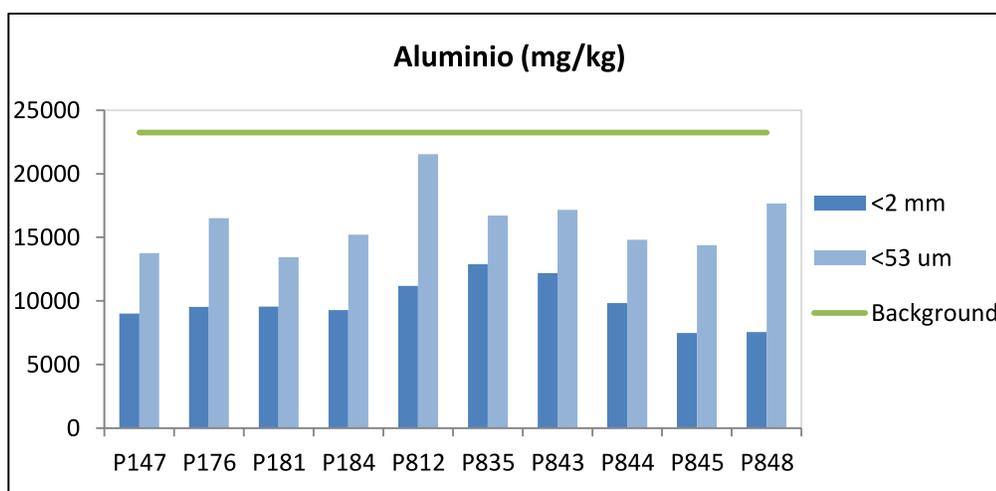


Figura 3-22: Concentración de Al en fracción fina y gruesa en polvos de calles. La concentración de Al aumenta en la fracción fina pero no supera el valor *background* calculado, sugiriendo que el Al posee un origen natural. Fuente: Elaboración propia

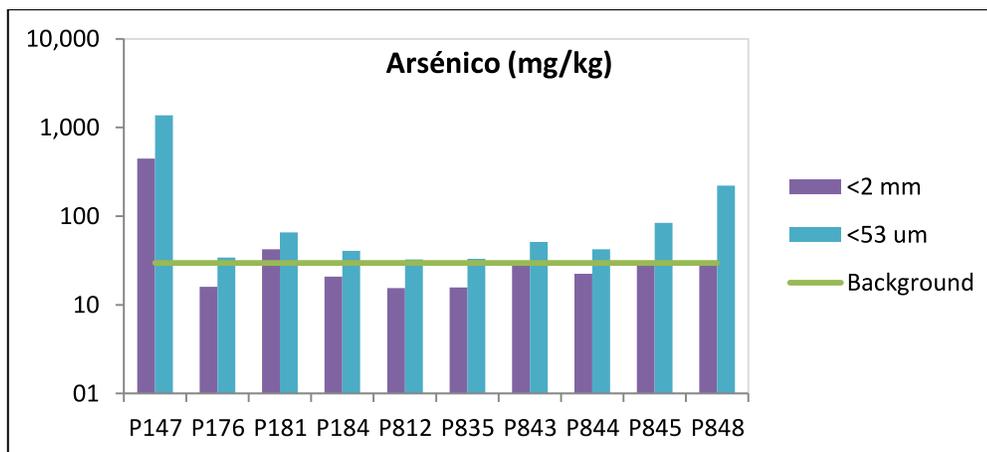


Figura 3-23: Concentración de As en fracción fina y gruesa en polvos de calles. Las concentraciones de As aumentan en gran cantidad en la fracción fina, sugiriendo que existen fuentes de As que enriquecen la parte fina de las muestras. Fuente: Elaboración propia

En el caso del Al, las concentraciones de la parte gruesa y fina tienden a estar bajo el valor *background*, además de que el enriquecimiento en la fracción fina es esperable (al igual que se detectó en suelos) principalmente debido a la mayor superficie de las partículas finas, mayor cantidad de arcilla, carbonatos, óxidos de manganeso y hierro (Ajmone-Marsan et al., 2008; Luo et al., 2011; Yadav & Rajamani, 2006). En cambio en el caso del As, el enriquecimiento en la parte fina se da en mayor magnitud en las muestras P147, P845 y P848, confirmando la hipótesis de mayor aporte antropogénico en algunos sectores de la ciudad, además de que la parte fina excede el valor *background* de Lepeltier. Este fenómeno se repite para los elementos de Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn (Ver gráficos en Anexo J), todos elementos relacionados a fuentes antropogénicas (CENMA, 2012; Ettler, 2015; Hedberg et al., 2005; Salmanighabeshi et al., 2015; Sternbeck et al., 2002; Viana et al., 2008).

3.3.3.3 Concentración elemental de polvo de calles con digestión parcial y total

En la Figura 3-24 y Figura 3-25 se muestra la comparación para 10 muestras de polvo de calles, entre los valores obtenidos por Agua Regia y por Ataque Total, para los elementos de Na y As, respectivamente.

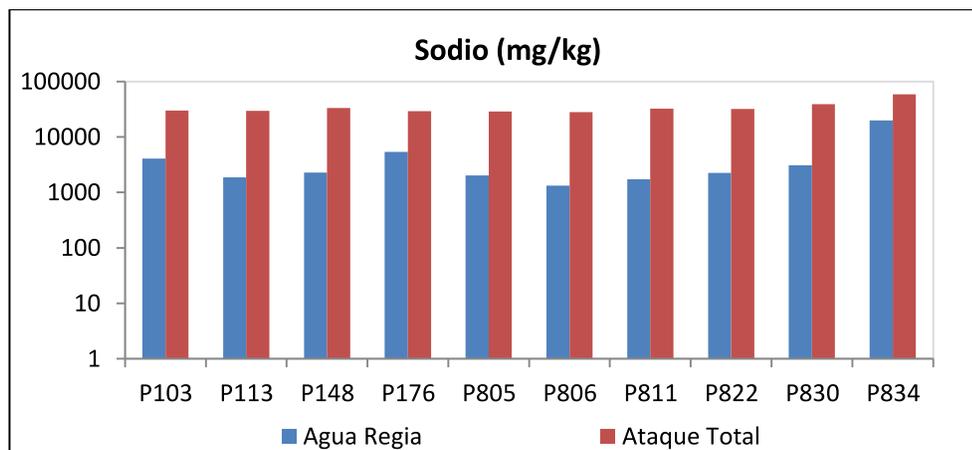


Figura 3-24: Concentración de Na por digestión con Agua Regia y con Ataque total en muestras de polvo de calles. La concentración de Na aumenta al digerir con Ataque total, explicado en la disolución de aluminosilicatos ricos en Na. Esto sugiere que este elemento se relaciona a la matriz sólida y por lo tanto al aporte natural a los polvos de calles. Fuente: Elaboración propia

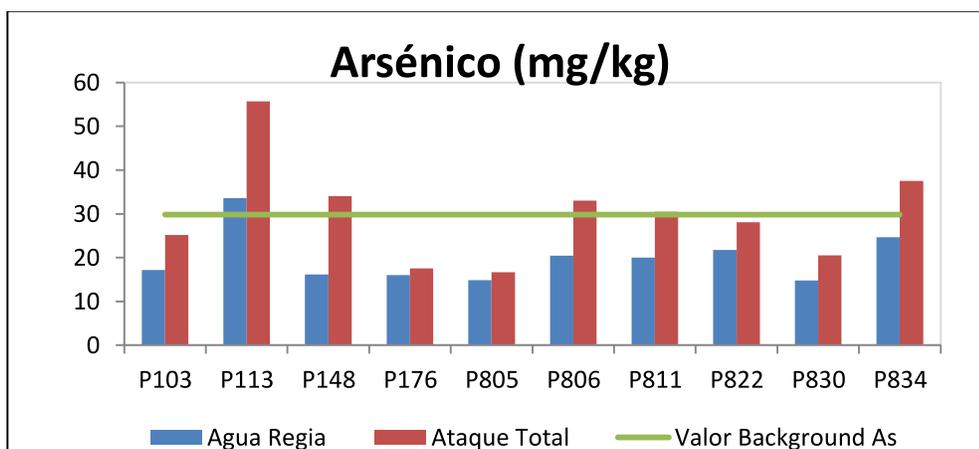


Figura 3-25: Concentración de As por digestión con Agua Regia y con Ataque total en muestras de polvo de calles. Las concentraciones de As al digerir con Ataque total aumentan levemente, sugiriendo que este elemento se relaciona a fuentes externas a la matriz sólida Fuente: Elaboración propia

Al igual que para la matriz de suelo el Na aumenta con la digestión ataque total, debido a la disolución de aluminosilicatos, confirmando su relación con la fuente natural. Para el As el caso es el mismo que en suelos, donde las concentraciones se mantienen cercanas entre los dos métodos mostrando que es un elemento más móvil y que puede estar

relacionado a las fuentes contaminantes de la ciudad. En el caso del Cr y Li son elementos que están más relacionados a la matriz sólida pero a la vez también poseen una parte móvil mayor con respecto a la matriz de suelo. Para el Cu, Pb y Zn, las concentraciones se mantienen relativamente constantes al igual que es el caso del As. Los gráficos para el resto de los elementos se adjuntan en el Anexo K.

3.3.4 Muestras de Lodos

3.3.4.1 Concentración elemental en lodos

En la Tabla 3-13 se presentan la concentración media, desviación estándar, mínimo y máximo para las muestras de lodos aluvionales obtenidas post-catástrofe. En el Anexo L se adjuntan los valores para cada una de las muestras.

Tabla 3-13: Resumen de concentraciones elementales en muestras de lodos aluvionales en mg/kg, para ambos flujos aluvionales principales.

	Flujos aluvionales principales	
	Río Copiapó	Quebrada de Paipote
Número de muestras	21	20
Al	25.288 ± 6.291 (18.265 - 41.634)	23.899 ± 6.112 (16.412 - 39.346)
As	22 ± 7 (15 - 47)	25 ± 6 (18 - 43)
Ca	37.323 ± 9.333 (23.470 - 78.632)	28.578 ± 9.789 (22.115 - 53.617)
Co	18 ± 2 (15 - 22)	17 ± 2 (13 - 22)
Cr	22 ± 4 (15 - 29)	17 ± 3 (16 - 28)
Cu	88 ± 30 (51 - 254)	103 ± 49 (55 - 260)
Fe	37.342 ± 2.738 (33.579 - 45.093)	35.115 ± 2.480 (31.681 - 40.717)
Hg	0,89 ± 0,85 (0,07 - 3,34)	1,31 ± 0,59 (0,13 - 2,86)
Li	28 ± 4 (22 - 34)	25 ± 5 (19 - 39)
Mg	12.947 ± 2.138 (10.218 - 18.150)	12.364 ± 2.404 (9.569 - 18.703)
Mn	873 ± 80 (753 - 1.123)	847 ± 118 (700 - 1.206)
Na	1.108 ± 175 (664 - 1.425)	1.010 ± 226 (761 - 1.769)
Ni	18 ± 3 (15 - 27)	14 ± 3 (12 - 23)
P	835 ± 140 (638 - 1.257)	713 ± 122 (594 - 1.058)
Pb	25 ± 10 (17 - 61)	28 ± 7 (19 - 45)
Sr	158 ± 35 (104 - 232)	135 ± 26 (94 - 183)
Ti	1.593 ± 210 (1.301 - 2.029)	1.302 ± 216 (1.136 - 1.979)
V	89 ± 8 (77 - 114)	84 ± 8 (74 - 107)
Zn	110 ± 24 (79 - 197)	116 ± 21 (89 - 158)

Fuente: Elaboración propia.

Las concentraciones elementales entre ambos flujos se mantienen en valores cercanos entre sí, demostrando que los lodos aluvionales son similares sin importar el flujo originario. Por otro lado, los valores medios para todos los elementos excepto Hg, se

mantienen bajo los valores *background* calculados. Esto indica que no existe un enriquecimiento de gran magnitud y que la componente natural es la predominante. No se observan desviaciones estándar significativas para ningún elemento, a excepción del Hg. Tampoco se observan grandes valores en los máximos, indicando que a pesar de la situación previa de la ciudad, el gran volumen de los aluviones diluyó las altas concentraciones observadas en las matrices de polvo y suelo. El caso del Hg en los lodos es excepcional ya que se detectaron altos valores, respecto al resto de las matrices y también al valor base, pudiendo existir una fuente aportante de mercurio que eleve las concentraciones en los lodos.

3.3.4.2 Concentración elemental en fracción fina y gruesa de lodos

Las concentraciones elementales para las 10 muestras lodos tamizadas a 53 μm , se adjuntan en el Anexo L. Se comparó las concentraciones para todos los elementos en la fracción fina y gruesa. A modo de referencia se muestran dos gráficos, uno de elementos naturales (Figura 3-26) y otro de elementos influenciados antropogénicamente (Figura 3-27). Además se incluye el valor *background* calculado por el método de Lepeltier a modo de referencia. El resto de los gráficos para cada uno de los elementos se presentan en la sección Anexo M.

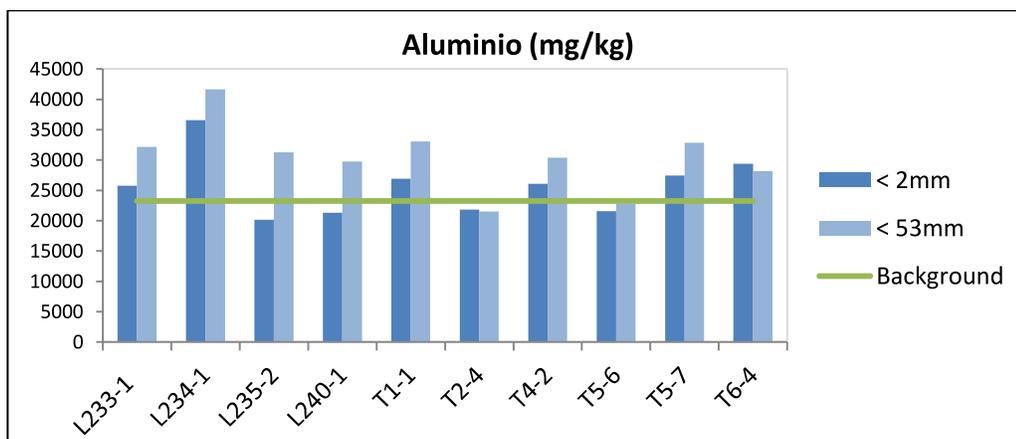


Figura 3-26: Concentración de Al en fracción fina y gruesa en lodos. La concentración de Al en parte fina aumenta levemente, sugiriendo que este elemento se asocia a fuentes naturales. Fuente: Elaboración propia.

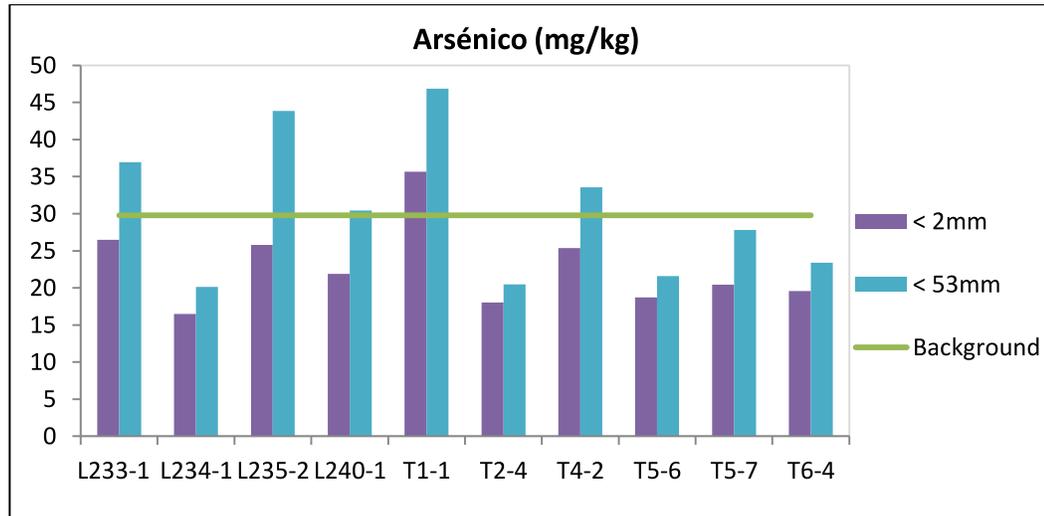


Figura 3-27: Concentración de As en fracción fina y gruesa en lodos. La concentración de As aumenta levemente en estas muestras lo que sugiere que el As presente en los lodos es de origen natural. Fuente: Elaboración propia.

En las muestras finas en los lodos, el Al aumenta en concentración y en comparación con la parte gruesa de las muestras el aumento es leve, atribuible al tamaño de partícula que como se ha indicado previamente, y se ha detectado en las matrices de suelo y polvo, aumenta la concentración por la mayor superficie de las partículas como también la presencia de arcillas, óxidos de hierro y manganeso (Ajmone-Marsan et al., 2008; Luo et al., 2011; Yadav & Rajamani, 2006). También los valores de Al se mantienen cercanos al valor *background*, principalmente porque los lodos se originan del material natural cercano a la ciudad. Para el caso del As, se observa un enriquecimiento en la parte fina, pero proporcionalmente no es significativo. Esto difiere de las matrices de suelo y polvo, ya que los lodos se originan de material no contaminado por lo que la concentración en los finos aumenta solo por procesos naturales y no antropogénicos.

3.3.4.3 Concentración elemental de lodos con digestión parcial y total

En la Figura 3-28 y Figura 3-29 se muestra la comparación para 10 muestras de lodos, entre los valores obtenidos por Agua Regia y por Ataque Total, para los elementos de Na y As, respectivamente.

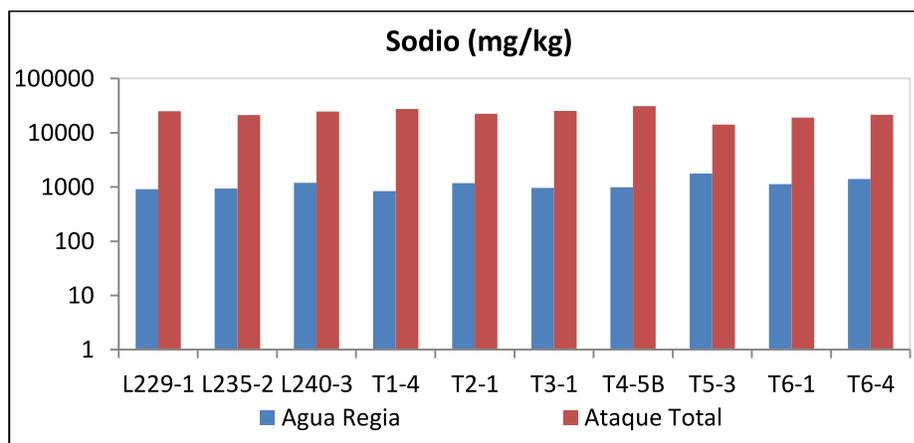


Figura 3-28: Concentración de Na por digestión con Agua Regia y con Ataque total en muestras de lodos. La concentración de Na aumenta considerablemente sugiriendo que este elemento se origina en fuentes naturales y está relacionado con la matriz sólida. Fuente: Elaboración propia.

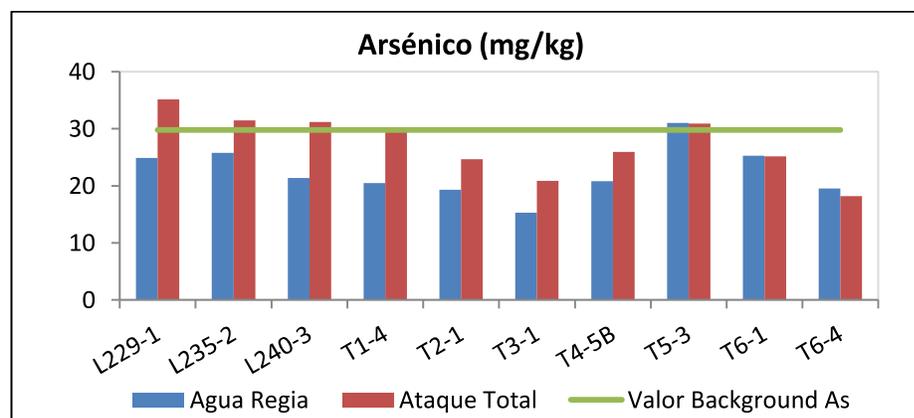


Figura 3-29: Concentración de As por digestión con Agua Regia y con Ataque total en muestras de lodos. Las concentraciones de As obtenidos por Ataque total se mantienen cercanas a los valores de Agua regia, sugiriendo que este elemento esta menos relacionado a la matriz sólida de estudio y que proviene de una fuente externa. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que para la matriz de suelo y polvo, en la matriz de lodo el Na aumenta con la digestión ataque total, debido a la digestión de aluminosilicatos, confirmando su relación

con la fuente natural. Para el As las concentraciones por ambos métodos se mantienen similares y bajo el nivel *background*, confirmando nuevamente que por un lado, los lodos no se encuentran enriquecidos, como también que el As no está relacionado a la matriz sólida de las muestras. En el caso del Cr y Li, ambos son elementos que se relacionan a la matriz sólida del lodo, por lo que aumentan sus concentraciones al realizar digestión total. Para el Cu, Pb y Zn, las concentraciones se mantienen relativamente constantes al igual que en el caso del As. Los gráficos para el resto de los elementos se adjuntan en el Anexo N.

3.3.5 Muestras *background*

3.3.5.1 Concentración elemental en muestras *background*

En la Tabla 3-14 se presentan la concentración media para las muestras *background* obtenidas en cada formación geológica de las zonas aledañas a la ciudad. En el Anexo O se adjuntan los valores para cada una de las muestras.

Las formaciones JK3 y Ki1m poseen altos niveles de As, Cu, Hg, Pb y Zn respecto al resto de las formaciones, esto puede explicarse por dos situaciones. Primero que las formaciones naturalmente posean altos niveles de Cu, debido a la presencia de minerales ricos en este elemento, como por ejemplo, la pirita que a la vez explicaría la presencia de As en altos valores. A pesar de esto, la presencia elevada de Pb apoya el segundo caso, que se basa en el enriquecimiento de estas formaciones por las emisiones de la fundición Paipote.

En la Figura 3-30 se muestra la rosa de los vientos anual sobre la fundición Paipote, la principal dirección de los vientos es noroeste con vientos provenientes de otras direcciones. Además las formaciones anteriormente nombradas, son las más cercanas a la fundición como también se encuentran ubicadas a menos altura que el resto de las zonas muestreadas (Anexo P).

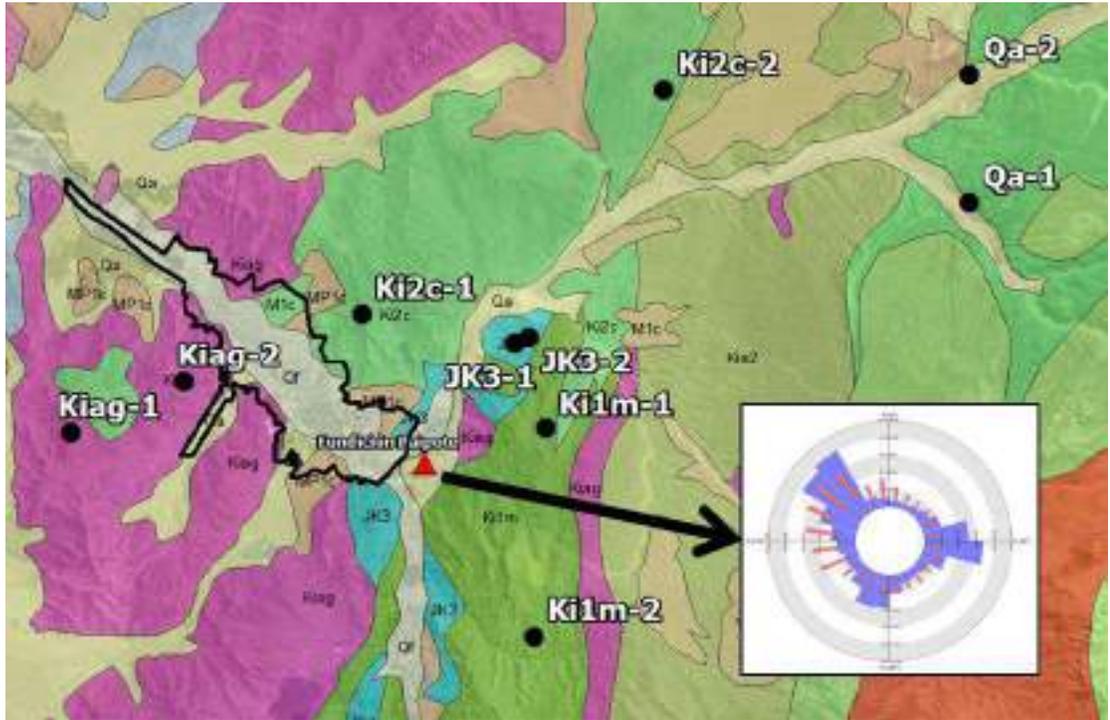


Figura 3-30: Formaciones geológicas y rosa de los vientos sobre fundición Paipote. La dirección del viento predominante es desde el noroeste, pero se observan también direcciones desde el suroeste, es decir hacia las formaciones geológicas afectadas. Fuente: Elaboración propia en base a Departamento de Geofísica, 2012 y Sernageomin, 2003.

Tabla 3-14: Resumen de concentraciones elementales en mg/kg para muestras *background* según formación geológica.

mg/kg *	Qf	Qa	JK3	Kiag	Kilm	Ki2c
Nº muestras	10	10	10	10	10	9
Al	17.375 ± 4.630 (9.343-27.492)	24.185 ± 2.952 (21.028-29.038)	21.237 ± 2.206 (17.292-24.001)	17.674 ± 2.843 (14.249-24.096)	18.438 ± 3.057 (13.254-22.585)	19.491 ± 752 (18.285-20.505)
As	18 ± 6 (10-29)	32 ± 8 (21-42)	83 ± 16 (59-118)	14 ± 5 (9-23)	86 ± 48 (34-182)	23 ± 6 (15-31)
Ca	42.848 ± 11.148 (20.898- 57.154)	24.010 ± 3.184 (20.091-31.174)	15.401 ± 7.823 (7.963-34.022)	19.773 ± 9.116 (8.261-33.604)	75.982 ± 54.640 (11.762-139.251)	26.664 ± 11.888 (12.959-47.115)
Co	14 ± 3 (10-19)	21 ± 2 (18-25)	21 ± 2 (18-24)	16 ± 5 (12-26)	17 ± 6 (11-28)	19 ± 2 (15-23)
Cr	22 ± 7 (6-32)	12 ± 6 (6-21)	22 ± 3 (16-27)	25 ± 4 (19-31)	21 ± 3 (16-25)	29 ± 9 (19-49)
Cu	57 ± 20 (14-86)	123 ± 39 (66- 184)	954 ± 217 (727- 1.410)	157 ± 66 (96- 306)	680 ± 442 (194- 1.291)	138 ± 63 (59-228)
Fe	33.477 ± 8.600 (25.152-46.792)	47.078 ± 5.320 (37.865-57.425)	45.566 ± 3.617 (39.322-50.206)	34.057 ± 3.188 (27.461-39.272)	38.494 ± 9.965 (27.241-55.368)	44.060 ± 3.252 (39.524-48.973)
Hg	0,12 ± 0,1 (0,02-0,24)	0,15 ± 0,06 (0,04-0,25)	0,31 ± 0,06 (0,19-0,38)	0,03 ± 0,01 (0,02-0,06)	0,32 ± 0,27 (0,06- 0,91)	0,07 ± 0,05 (0,02- 0,18)
Li	31 ± 10 (12-51)	25 ± 3 (22-30)	28 ± 4 (22-32)	17 ± 1 (16-20)	23 ± 6 (12-33)	31 ± 12 (21-59)
Mg	12.165 ± 3.805 (7.884-21.156)	16.607 ± 2.019 (12.943-19.567)	17.994 ± 2.153 (14.085-20.391)	12.330 ± 2.275 (9.394-16.256)	12.783 ± 4.657 (7.551-20.189)	17.684 ± 4.041 (15.317-28.218)
Mn	1.161 ± 765 (570-3.153)	1.304 ± 277 (844-1.716)	1.507 ± 277 (1.209-2.061)	546 ± 47 (458- 610)	1.021 ± 469 (491- 1.801)	1.044 ± 324 (637- 1.566)
Na	2.717 ± 3.102 (394-10.637)	1.100 ± 405 (596-1.876)	585 ± 135 (381- 831)	860 ± 345 (607- 1.559)	681 ± 203 (382- 991)	1.025 ± 501 (506- 2.078)
Ni	18 ± 5 (6-28)	9 ± 3 (5-15)	15 ± 2 (12-17)	12 ± 1 (10-14)	15 ± 2 (10-17)	14 ± 2 (11-17)
P	950 ± 128 (738- 1.144)	750 ± 120 (572- 900)	887 ± 89 (769- 1.026)	1.350 ± 460 (921-2.313)	1.381 ± 539 (808- 2.227)	915 ± 95 (735- 1.035)
Pb	12 ± 4 (5-19)	27 ± 17 (12-66)	81 ± 33 (54-170)	11 ± 3 (8-17)	57 ± 30 (19-114)	24 ± 10 (12-37)
Sr	198 ± 67 (92- 284)	84 ± 15 (62-113)	60 ± 7 (43-68)	58 ± 5 (52-67)	149 ± 103 (51- 342)	73 ± 13 (54-96)
Ti	1.245 ± 273 (642-1.631)	2.142 ± 401 (1.492-2.736)	1.569 ± 246 (1.165-1.852)	1.519 ± 113 (1.279-1.666)	1.155 ± 199 (835- 1.445)	1.821 ± 316 (1.366-2.327)
V	79 ± 20 (60- 117)	126 ± 21 (95- 174)	114 ± 13 (97- 134)	93 ± 10 (79-112)	98 ± 28 (67-157)	129 ± 10 (110- 142)
Zn	100 ± 40 (23- 163)	143 ± 34 (87- 204)	229 ± 110 (149- 532)	54 ± 5 (50-66)	181 ± 171 (82- 656)	108 ± 44 (54-179)

*Los datos se presentan según el siguiente formato: Media ± Desviación estándar (Mínimo – Máximo)

Fuente: Elaboración propia.

3.3.5.2 Concentración elemental en muestras *background* superficiales y profundas

Las concentraciones elementales para estas 23 muestras se adjuntan en el Anexo O. Se realizó la comparación entre las concentraciones de todos los elementos para los pares de muestras superficiales (0 – 5 cm) y profundas (> 20 cm). A modo de referencia se muestran dos gráficos, uno de elementos naturales (Figura 3-31) y otro de elementos influenciados antropogénicamente (Figura 3-32). Además se incluye el valor *background* calculado por el método de Lepeltier. La barra amarilla en la muestra JK3-1.4, corresponde al valor de la muestra *background* (0 – 20 cm) debido a que no se posee la muestra en profundidad (> 20 cm). El resto de los gráficos comparativos se presentan en la sección Anexo R.

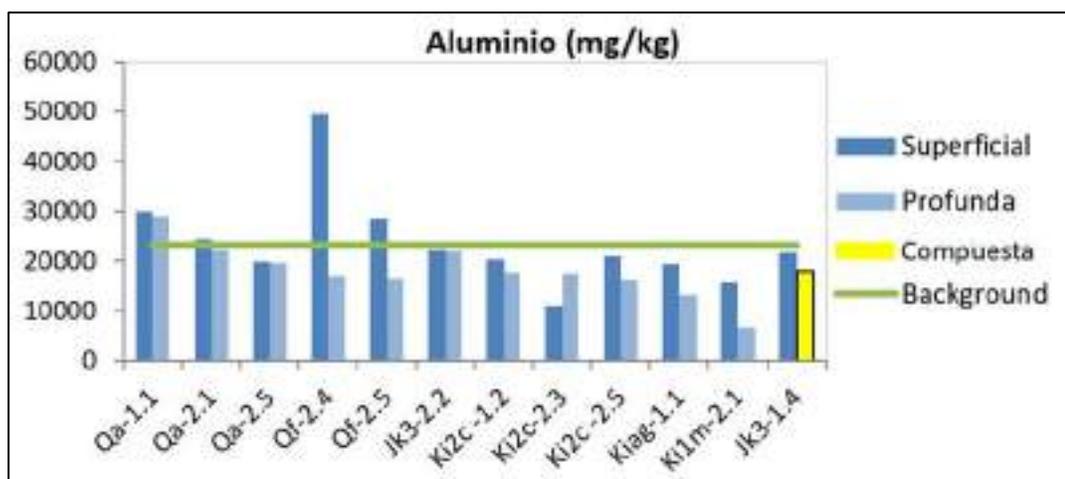


Figura 3-31: Concentración de Al en muestras *background* superficiales y profundas. La concentración de aluminio se mantiene en niveles constantes entre la muestra superficial y profunda, a excepción de la muestras Qf-2.4. Esta muestra obtenida en el lecho del río se ve sometida a deposición de material fino que afecta la composición superficialmente. Fuente: Elaboración propia.

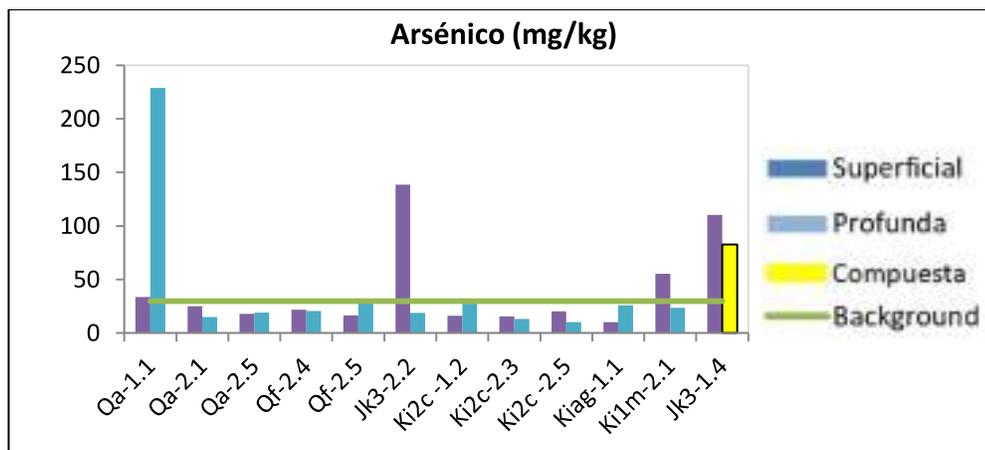


Figura 3-32: Concentración de As en muestras *background* superficiales y profundas. La concentración de As aumenta en la muestra superficial para las formaciones JK3 y Ki1m, revelando el efecto de la fundición en estos sectores. Fuente: Elaboración propia.

En el caso del Al, las concentraciones de la muestra superficial y profunda son cercanas al valor *background* y son similares entre sí, a excepción de Qf-2.4 muestra obtenida en el lecho del río, debido a esto la muestra superficial está sometida al arrastre y sedimentación de material, modificando su composición. En cambio en el caso del As, en las formaciones JK3-1 y JK3-2 se genera un alto enriquecimiento en la muestra superficial demostrando un proceso de deposición atmosférica proveniente de la fundición, al igual que con el Cu, Hg, Pb y Zn (Ver gráficos en Anexo R). En este caso la formación Ki1m-1 no se encuentra entre las muestras superficiales, por lo que no se posee información de esta. La formación Ki1m-2 posee un enriquecimiento de menor magnitud ya que se encuentra más alejada de la fundición.

3.3.5.3 Concentración elemental en fracción fina y gruesa de muestras *background*

Las concentraciones elementales para estas 12 muestras, tamizadas a 53 μm , se presentan en el Anexo O. Se comparó las concentraciones para todos los elementos en la fracción fina y gruesa. A modo de referencia se muestran dos gráficos, uno de elementos naturales (Figura 3-33) y otro de elementos influenciados antropogénicamente (Figura 3-34).

Además se incluye el valor *background* calculado por el método de Lepeltier a modo de referencia. El resto de los gráficos se presentan en la sección Anexo Q.

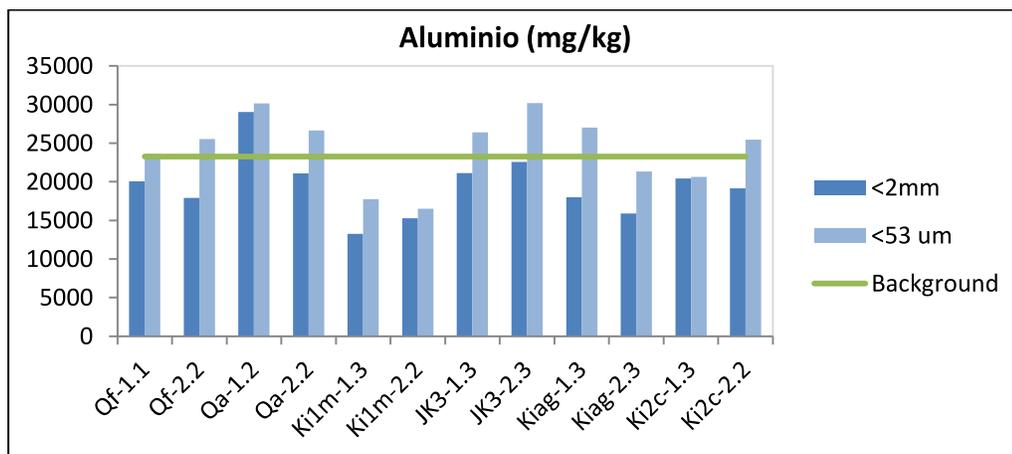


Figura 3-33: Concentración de Al en fracción fina y gruesa en muestras *background*. La concentración de Al en la fracción fina aumenta levemente con respecto a la concentración en la fracción gruesa, sugiriendo un origen natural de este elemento. Fuente: Elaboración propia.

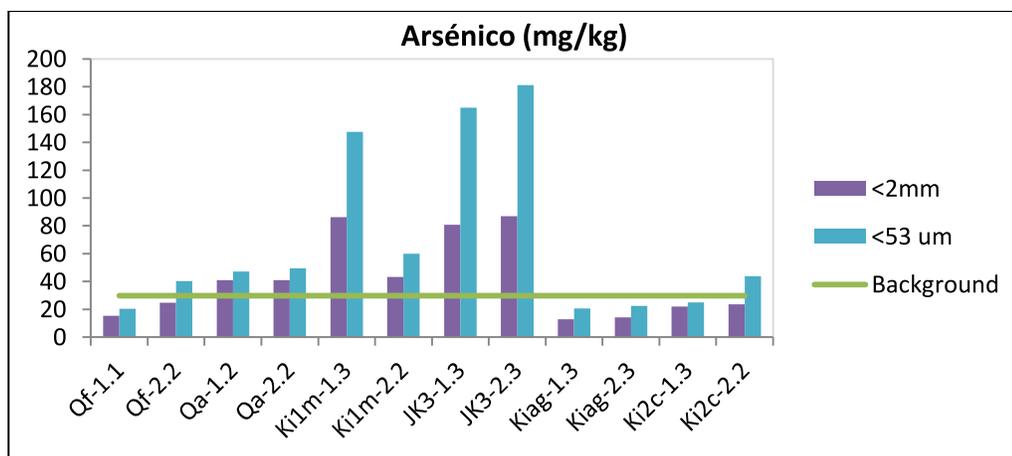


Figura 3-34: Concentración de As en fracción fina y gruesa en muestras *background*. La concentración de As en la fracción fina de las muestras afectadas por las emisiones de la fundición, aumenta considerablemente demostrando como las fuentes antropogénicas enriquecen la fracción fina de las muestras. Fuente: Elaboración propia.

En el caso del Al, las concentraciones de la parte gruesa y fina tienden a estar cercanas al valor *background*, además de que el enriquecimiento en la fracción fina es esperable principalmente debido a la mayor superficie de las partículas finas. En cambio en el caso del As, el enriquecimiento se da en mayor magnitud en los sectores de muestreo Ki1m-1,

JK3-1 y JK3-2, confirmando la hipótesis de enriquecimiento antropogénico, específicamente proveniente de la fundición (Ettler, 2015; Gidhagen et al., 2002; Hedberg et al., 2005). Este fenómeno se repite para las tres formaciones en los elementos de Cu, Pb y levemente en Zn (Ver Anexo Q). Cabe destacar que la formación Ki1m-2 posee también valores altos pero no en la magnitud de las otras tres, debido a la distancia mayor desde la fundición.

3.3.5.4 Concentración elemental de muestras *background* con digestión parcial y total

En la Figura 3-35 y Figura 3-36 se muestra la comparación para 12 muestras *background*, entre los valores obtenidos con Agua Regia y con Ataque Total, para los elementos de Na y As, respectivamente.

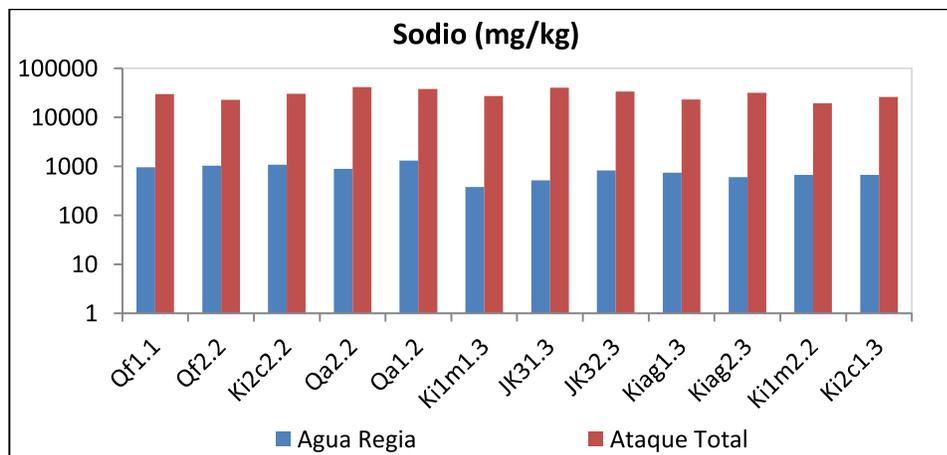


Figura 3-35: Concentración de Na por digestión con Agua Regia y con Ataque total en muestras *background*. La concentración de Na obtenida con Ataque total es mucho mayor a la obtenida con Agua regia, sugiriendo que el Na se asocia a las fuentes naturales y la matriz sólida. Fuente: Elaboración propia.

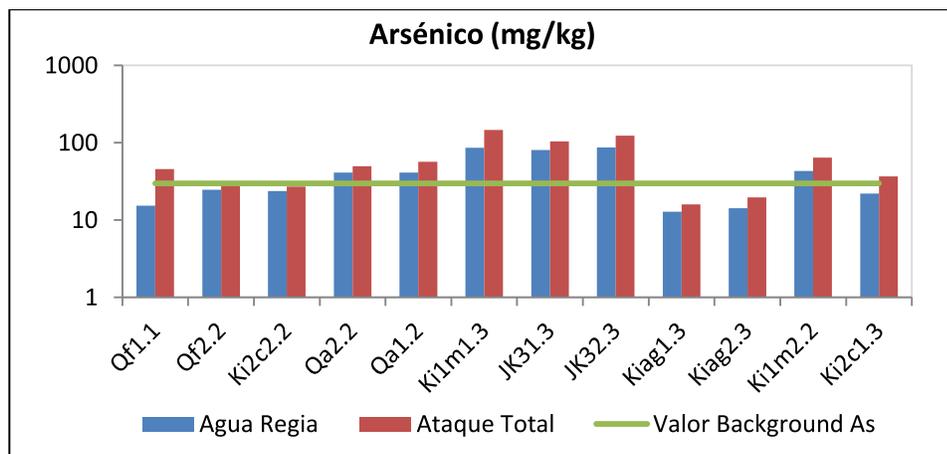


Figura 3-36: Concentración de As por digestión con Agua Regia y con Ataque total en muestras *background*. La concentración de As se mantiene constante en los dos métodos de digestión, sugiriendo que este metal se encuentra más relacionado a fuentes externas a la matriz sólida.

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que para las matrices de suelo, polvo y lodo el Na aumenta con la digestión ataque total, debido a la disolución de aluminosilicatos, confirmando su relación con la fuente natural. Para el As las concentraciones se mantienen cercanas entre los dos métodos mostrando que es un elemento más móvil y que puede estar relacionado a las fuentes contaminantes con amplios rangos de dispersión debido a que estas muestras fueron obtenidas en sectores alejados a la ciudad, como por ejemplo la fundición de cobre.

En el caso del Cr y Li son elementos que se relacionan a la matriz de suelo que no es disuelta por el agua regia, por lo que aumentan sus concentraciones al digerir las muestras con ataque total. Para el Cu, Pb y Zn, las concentraciones se mantienen relativamente constantes mostrando que son elementos más móviles. Por otro lado todos los elementos se mantienen cercanos o bajo el valor *background* calculado a excepción de las muestras ubicadas en las formaciones geológicas afectadas por las emisiones de la fundición (Ki1m y JK3). Los gráficos para el resto de los elementos se adjuntan en el Anexo S.

3.4 Resultados de otros parámetros

3.4.1 Granulometría

En la Tabla 3-15 se presenta el porcentaje de finos ($< 53 \mu\text{m}$) según matriz de estudio, suelo, polvo de calles, lodos de ambos flujos aluvionales y *background*. La importancia de esta caracterización está en que la parte fina es la más susceptible a la erosión del viento, como también la fracción asociada a más metales (Aksoy & Kavvas, 2005; Morgan & Quinton, 2001).

Tabla 3-15: Porcentaje de finos según matriz sólida.

Matriz	Porcentaje $< 53 \mu\text{m}$ (%)				
	Suelos	Polvos	Lodos Paipote	Lodos Río Copiapó	<i>Background</i>
Número de muestras	42	65	20	21	59
Media	11,4	9,3	11,8	18,5	15,2
Máximo	20,5	18,8	41,9	38,7	30,8
Mínimo	3,6	2,0	3,7	10,7	4,5
Desviación estándar	4,1	3,3	7,9	8,1	5,9
RSD (%)	36,0	35,2	67,0	43,8	38,6

Fuente: Elaboración propia.

Para la matriz de polvo se recolectaron 71 muestras pero solo se analizaron 65 debido a que 6 muestras no tenían suficiente material para realizar este análisis. Las matrices de suelo y polvo son muy similares entre sí en cuanto a su valor medio tanto como a los máximos, mínimos y desviación estándar. El porcentaje de finos en los lodos del río Copiapó es mayor que en los lodos de Paipote esto se explica principalmente por la mezcla del material con los sedimentos de río que se caracterizan por tener alto contenido de finos. Se observa también que los lodos poseen en promedio más variabilidad de finos, originado en procesos de sedimentación durante el flujo por la ciudad. La matriz *background* posee mayor cantidad de finos que los suelos y polvos de la ciudad, esto se explica por la menor materia orgánica en las muestras (Sección 3.4.3), ya que esta provoca la presencia de aglomerados que aumentan el tamaño de partícula en las muestras, como se observa en los suelos, polvos y lodos.

3.4.2 pH

En la Tabla 3-16 se presenta el pH según matriz de estudio, suelo, polvo de calles, lodos de ambos flujos aluvionales y *background*. Se observa que para todas las matrices de estudio el pH promedio es cercano al valor neutro. En el caso de los valores máximos el mayor de estos se encuentra en la matriz de polvo al igual que el valor mínimo registrado. Además la variación de las mediciones de pH es mayor en la matriz de polvo, seguida por las muestras *background*. Variabilidad originada principalmente en la heterogeneidad de las muestras de polvo y *background*.

Tabla 3-16: pH según matriz sólida.

Matriz	pH				
	Suelos	Polvos	Lodos Paipote	Lodos Río Copiapó	<i>Background</i>
Número de muestras	42	71	20	21	59
Media	7,7	6,8	7,8	7,5	7,6
Máximo	8,4	9,3	8,5	8,1	8,7
Mínimo	7,0	5,8	7,4	6,6	6,6
Desviación estándar	0,4	0,6	0,3	0,4	0,5
RSD (%)	4,6	8,5	3,3	4,7	7,0

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Materia orgánica

En la Tabla 3-17 se observan los porcentajes de materia orgánica para cada matriz de estudio. Se observa que las matrices de polvo de calles y suelo son las que poseen mayor cantidad de materia orgánica. En el caso de los polvos de calle, explicado por el aporte de material vegetal seco a la matriz (hojarasca) y en el caso de los suelos por la presencia de material vegetal propio del suelo. En el caso de los lodos aluvionales y las muestras *background* poseen valores menores de materia orgánica, explicado en el origen de estas matrices que son los cerros desérticos alrededor de la ciudad. A pesar de todo lo anterior, dentro de cada matriz existe alta variabilidad en el contenido de materia orgánica demostrando la alta heterogeneidad de las muestras y dependencia del lugar de muestreo.

Tabla 3-17: Materia orgánica (%) según matriz sólida.

	Materia orgánica (%)				
	Suelos	Polvos	Lodos Paipote	Lodos Río Copiapó	<i>Background</i>
Número de muestras	42	71	20	21	59
Media	2,8	4,5	1,1	1,0	0,6
Máximo	8,1	18,9	2,3	1,9	4,4
Mínimo	0,5	0,9	0,0	0,1	0,0
Desviación estándar	1,8	3,6	0,6	0,5	0,7
RSD (%)	65,5	80,4	55,6	49,2	114,4

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Caracterización de mecanismos de transporte

3.5.1 Vientos

A continuación se comparan las rosas de los vientos obtenidas con el Explorador eólico de la facultad de Geofísica de la Universidad de Chile y las tres estaciones meteorológicas disponibles en Copiapó.

Estación Copiapó: En la Figura 3-37 se muestran las rosas de los vientos de la Estación Copiapó y la modelada en el mismo punto por el Explorador eólico. Se observa que en ambos casos el viento la mayor parte del tiempo proviene del sector noroeste de la estación. Cabe destacar que en este caso la modelación de la dirección del viento se aproxima bastante a la real, pero los datos que se tienen para el viento de esta estación son solo para el año 2009 y el modelo simula el año 2010. Por otro lado, la rosa de los vientos modelada, otorga más información además de la dirección, las barras rojas indican el rango inter-cuartil de velocidad de viento para cada intervalo de dirección.

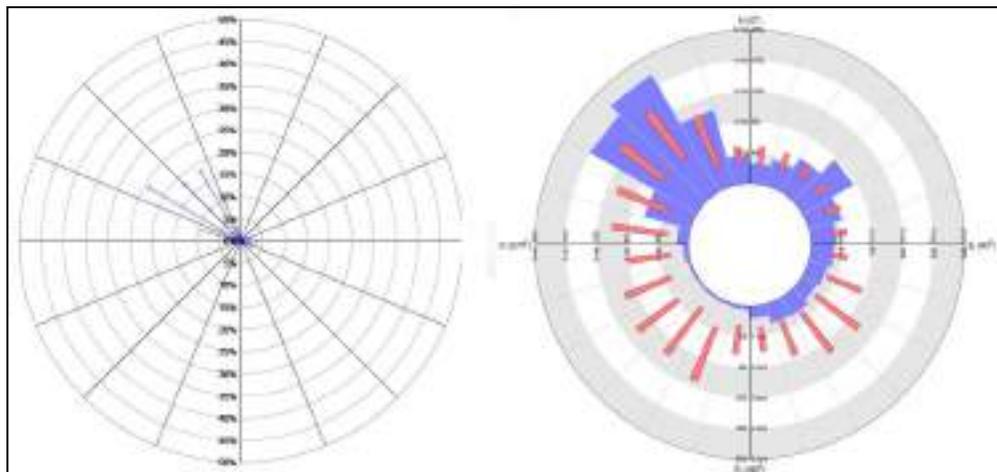


Figura 3-37: Rosa de los vientos de Estación Copiapó y modelada por el Explorador eólico, respectivamente. Esta comparación demuestra que las direcciones estimados por el modelo son similares a las reales. Fuente: Departamento de Geofísica, 2012.

Estación San Fernando: En la Figura 3-38 se muestran las rosas de los vientos de la Estación San Fernando y la modelada en el mismo punto por el explorador eólico. En este caso la dirección predominante no es la misma, proviene del mismo sector pero en el caso real proviene en mayor medida desde el oeste, esta diferencia puede deberse a que la resolución del modelo es de 1 km^2 y también a que los años que se comparan son distintos (2009 y 2010, respectivamente).

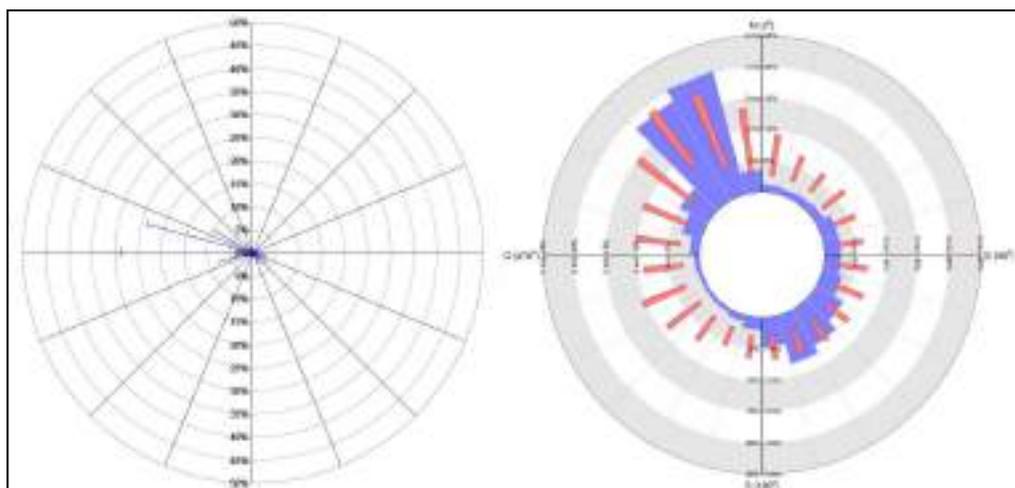


Figura 3-38: Rosa de los vientos de Estación San Fernando y modelada por el Explorador eólico, respectivamente. A pesar de no ser exacta la modelación, el modelo continúa resultando en comportamientos de vientos similares Fuente: Departamento de Geofísica, 2012.

Estación Paipote: En la Figura 3-39 se muestran las rosas de los vientos de la Estación Paipote y modelada en el mismo punto por el explorador eólico. En este caso la rosa de los vientos es similar a la real en cuanto a las direcciones.

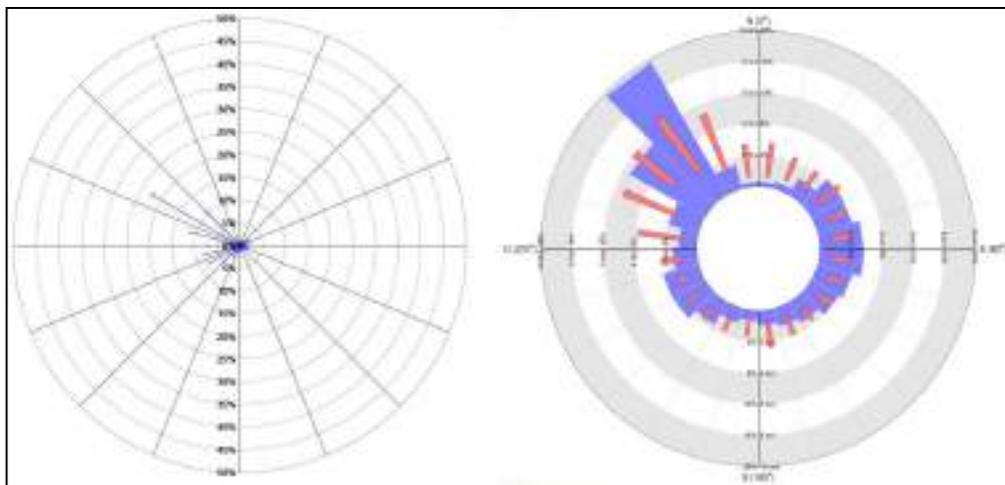


Figura 3-39: Rosa de los vientos de Estación Paipote y modelada por el Explorador eólico, respectivamente. En este caso, las mediciones en terreno y modeladas coinciden en las direcciones de viento principales. Fuente: Departamento de Geofísica, 2012.

Para estimar cual es la dirección de dispersión de los contaminantes, basta con conocer la dirección predominante de los vientos. Por esta razón se utilizó el Explorador eólico ya que entrega mejor resolución espacial que las estaciones meteorológicas disponibles y tiene una aproximación cercana a la real.

Un ejemplo de la utilidad del Explorador eólico, es que se puede seleccionar un punto específico dentro de Copiapó y obtener los datos del viento. Por ejemplo en la Figura 3-40 se presenta la rosa de los vientos sobre el relave Porvenir.

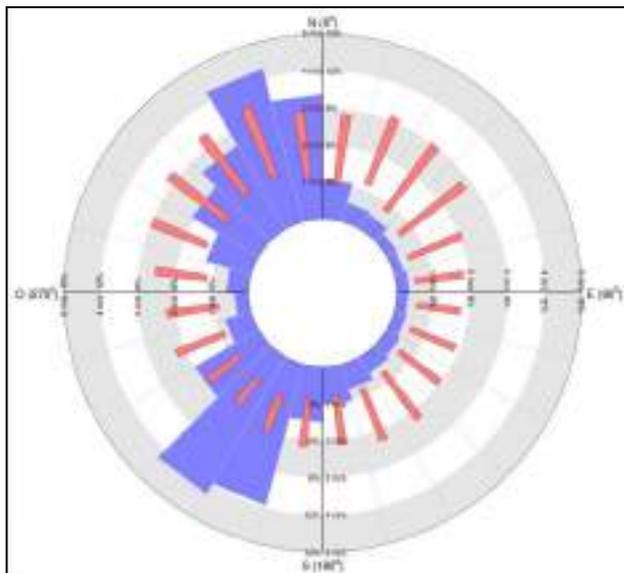


Figura 3-40: Rosa de los vientos sobre relave Porvenir. Se observan dos direcciones de viento principales que coinciden con la dirección transversal del valle en el que se encajona el relave.
Fuente: Departamento de Geofísica, 2012.

El viento sobre el relave Porvenir sopla en dos direcciones predominantemente, una de ellas es en dirección a la población El Palomar, por lo que se puede suponer una dispersión del material desde el relave hacia la población (Ver Sección 3.1.1). En este caso cabe destacar que el modelo considera la geografía del lugar ya que las direcciones principales del viento concuerdan con la ubicación del relave en un valle encajonado (Figura 3-41).



Figura 3-41: Relave Porvenir en valle encajonado. La dirección principal de los vientos modelados coincide con la dirección transversal de este valle, concentrando los vientos en dirección hacia la población El Palomar. Fuente: Elaboración propia

De forma ilustrativa se presenta la Figura 3-42, ésta indica la dirección principal de los vientos en puntos de interés dentro de la ciudad. Flechas negras indican las direcciones principales en fuentes contaminantes (relaves y fundición) y flechas amarillas indican sectores de interés. Las flechas interpretan el porcentaje del tiempo que el viento sopla desde esa dirección según la rosa de los vientos anual obtenida para cada punto en el Explorador eólico.

Se puede observar que los vientos tienden a tener direcciones predominantes en el eje del valle de la ciudad, es decir, dirección noroeste o sudeste. De forma general, las direcciones de vientos principales y dominantes tienden a ser hacia el sur de la ciudad y en dirección a Tierra Amarilla; viento que proviene desde la costa hacia el interior del valle. En el caso de los relaves Porvenir, San Juan y Castellón, ubicados en la población El Palomar, una de las direcciones de viento predominantes es hacia la población misma. Por otro lado las direcciones de viento en la chimenea de la fundición Paipote, predominan en dirección opuestas a la ciudad, a pesar de esto también posee vientos con dirección hacia la ciudad.

Como se describió anteriormente, el mecanismo de transporte predominante en la zona es el viento, de la misma forma la escasez de lluvias intensifica el efecto de erosión eólica del material de relave; como también elimina las posibilidades de lixiviación hacia cuerpos de agua cercanos (Sims et al., 2013). Por otro lado, el viento también afecta a las emisiones de la fundición dispersándolas por la ciudad mostrando su dominancia en la dispersión de metales pesados en la ciudad de Copiapó.

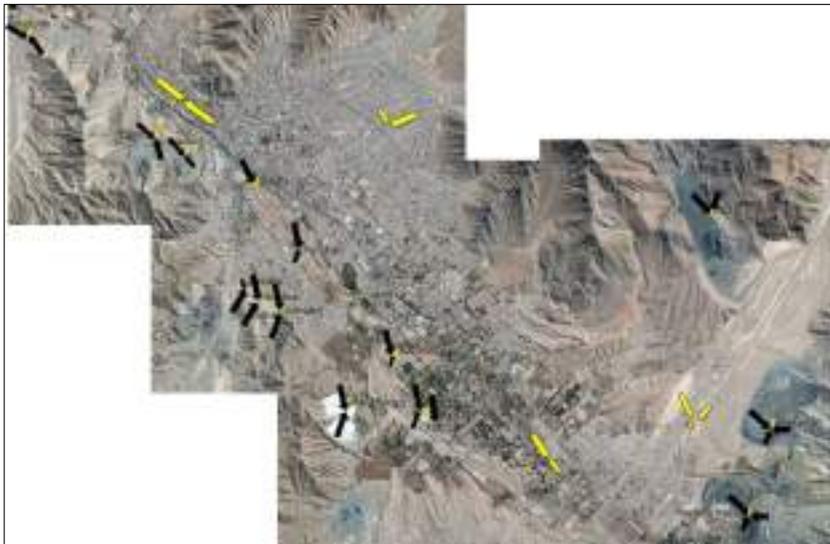


Figura 3-42: Mapa de Copiapó con las principales dirección de viento en puntos de interés en la ciudad. Las flechas amarillas indican zonas de interés y las negras viento en las fuentes de contaminación en los alrededores de la ciudad. Se observa que predomina el viento noroeste (proveniente de la costa) y también el sureste (que va hacia la costa). Fuente: Elaboración propia en base a Departamento de Geofísica, 2012.

3.5.2 Aluviones

A diferencia del viento, los aluviones son eventos excepcionales que debido a lluvias intensas en la alta cordillera, se vieron desatados en marzo del 2015 (CIGIDEN, 2015). Los deslizamientos de tierra o aluviones alcanzaron la ciudad de Copiapó a través de dos flujos principales, el río Copiapó y la quebrada de Paipote. El resultado, fue la inundación con lodos de gran parte de la ciudad. En la Figura 3-43 se indica en contorno negro, la zona afectada por lodos en la ciudad como también todos los relaves susceptibles al arrastre de material debido al paso del aluvión.

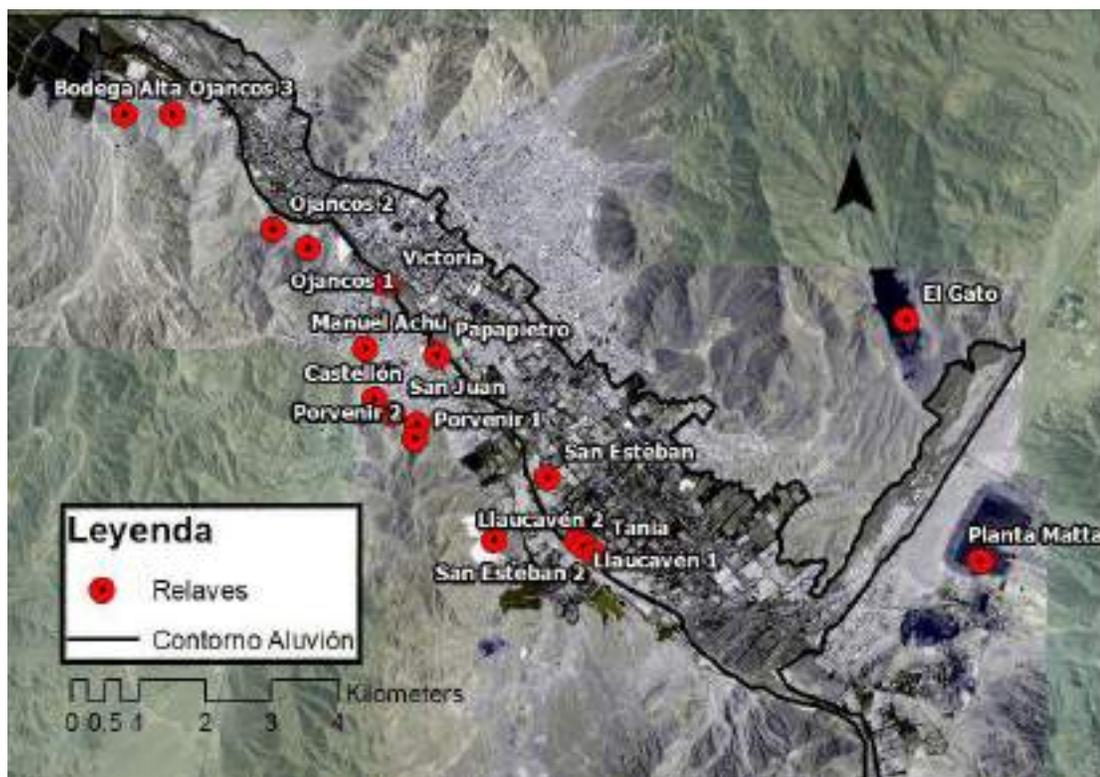


Figura 3-43: Zona de Copiapó inundada por lodos aluvionales. Se observa que los lodos aluvionales alcanzaron numerosos relaves dentro de la ciudad y en el cauce del río Copiapó. Fuente: Elaboración propia.

En los relaves Tania, Papapietro, Victoria, Llaucavén y Planta Matta existió arrastre de material por los aluviones. En la Figura 3-44 se muestra una imagen de la erosión sufrida por el relave Planta Matta. Fotografías de otros relaves que sufrieron arrastre de material

se adjuntan en el Anexo T. Al ser una situación excepcional los aluviones pueden ser considerados como una emergencia, pero no como un mecanismo de transporte de consideración con respecto a la situación común (donde predomina el viento).



Figura 3-44: Relave Planta Matta erosionado por flujo aluvional. El flujo de los aluviones arrastró material de los relaves provocando contaminación de los sectores cercanos. A gran escala el material de relave y sus altas concentraciones fue diluido por los lodos aluvionales. Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar la evolución de las concentraciones elementales en los sectores representativos de muestreo (Figura 2-8), se graficó el factor de enriquecimiento (Ver Sección 3.6) para los elementos de interés con respecto a la distancia desde el primer punto de muestreo. De esta manera, se descarta el efecto del tamaño de partículas al normalizar por el aluminio, como también se descarta el aporte natural a los lodos. La Figura 3-45 y Figura 3-46, indican los factores de enriquecimiento para As, Cu, Pb, Zn y Hg en los flujos aluvionales de la quebrada de Paipote y el río Copiapó, respectivamente.

En el caso del flujo de aluviones en la quebrada de Paipote se observa que el Hg posee FE altos, sobre 4, lo que los clasifica como enriquecimiento moderado (2 a 5) y significativo (5 a 20). A pesar de que en el caso del Hg se observa una tendencia al enriquecimiento, cabe destacar que los niveles de mercurio en los lodos, previo al paso por la ciudad, son igualmente altos, indicando una fuente de enriquecimiento de Hg previa a la ciudad ubicada en la quebrada de Paipote. En los puntos 2 y 3, se observa que el Hg alcanza valores correspondientes al doble del inicial, indicando que los relaves Planta Matta y El Gato podrían aportar Hg a los lodos. Por otro lado, en el caso de los otros cuatro metales, el Pb y el As tienen comportamientos de enriquecimiento al pasar por la ciudad, pero sin superar la clasificación de enriquecimiento mínimo. A diferencia de esto el Cu y el Zn se mantienen en valores constantes y bajos.

Para el flujo de aluviones en el río Copiapó, se observa que los FE de Hg antes de llegar a la ciudad se mantienen en niveles de enriquecimiento mínimo (0 a 2), pero al alcanzar los puntos 3, 5 y 6 aumentan los factores de enriquecimiento hasta niveles significativos. En estos tres sectores se ubican numerosos relaves relacionados a la antigua minería del oro (Llaucavén, Victoria y Papapietro). Al igual que en el flujo de la quebrada Paipote, el As y el Pb aumentaron sus FE sin alcanzar un enriquecimiento moderado y por el contrario el resto de los metales se mantuvieron con FE bajo y constantes.

El volumen de material de relave arrastrado fue mucho menor con respecto al volumen de lodos aluvionales, por lo que existió un efecto de dilución. En términos químicos los lodos no presentaron un peligro para la ciudad ni tampoco un mecanismo de dispersión de consideración. La cantidad de material no enriquecido, proveniente de los cerros aledaños, generó un efecto de dilución que disminuyó las concentraciones de la mayoría de los metales.

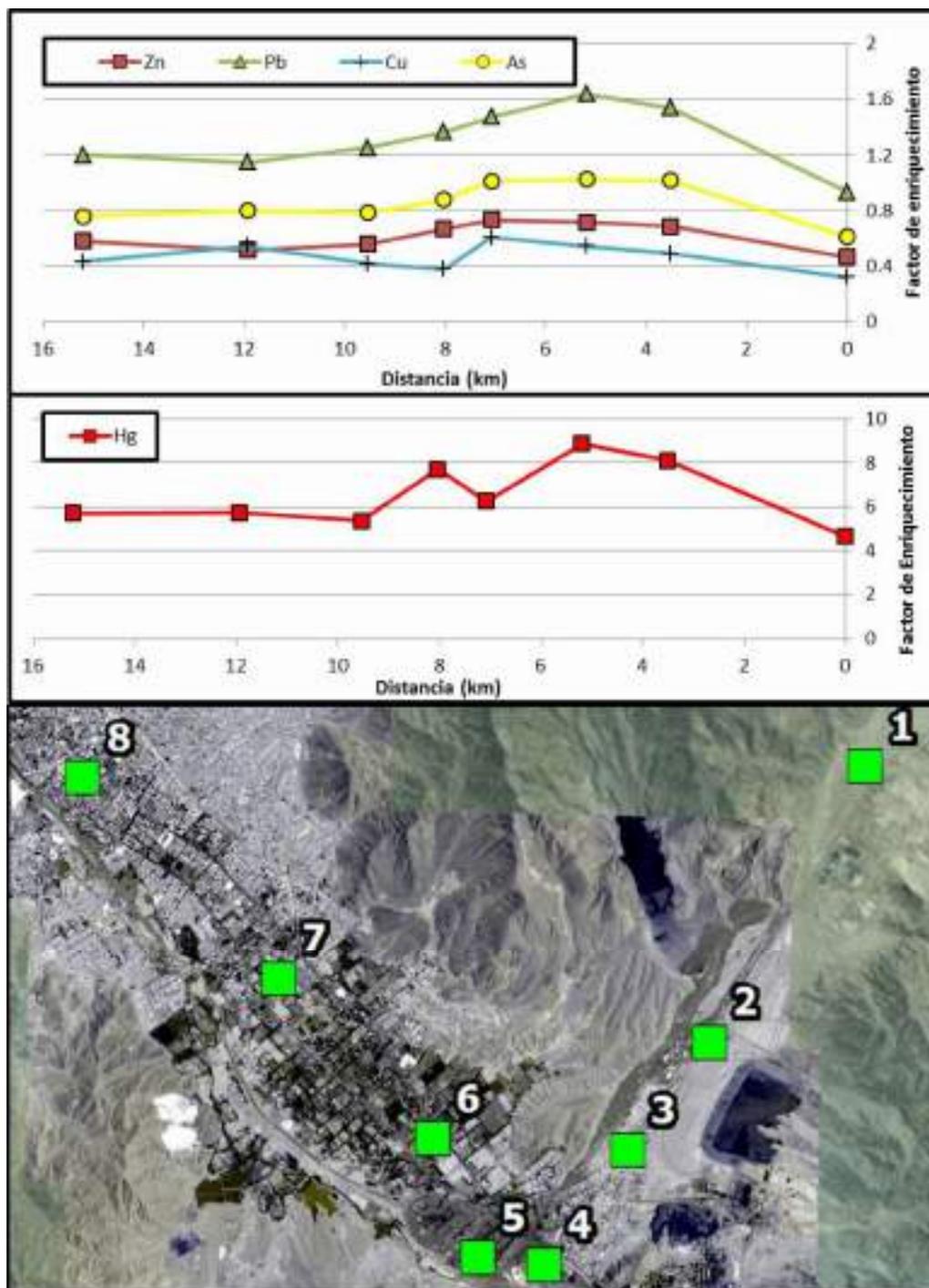


Figura 3-45: Factor de enriquecimiento en sectores representativos de muestreo, flujo aluvional en quebrada de Paipote. Los FE para As, Cu, Zn y Pb son bajos y clasificados como “sin enriquecimiento”, pero en el caso del Hg se alcanzan a FE clasificados como “significativos”. Se sugiere la existencia de una fuente aportante de Hg en la quebrada de Paipote. Fuente: Elaboración propia.

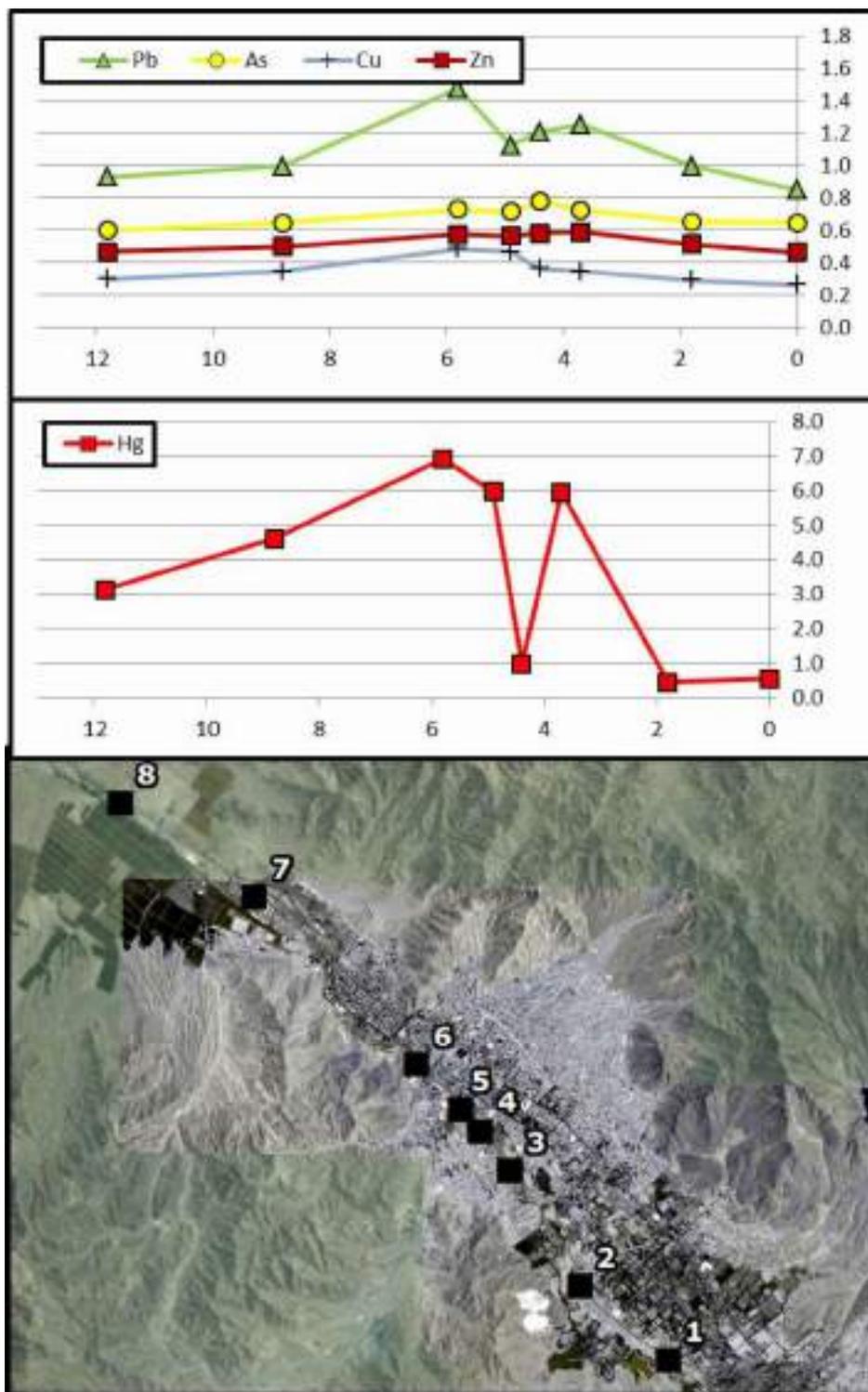


Figura 3-46: Factor de enriquecimiento en sectores representativos de muestreo, flujo aluvional en río Copiapó. Los FE de As, Cu, Zn y Pb no presentan mayores niveles de enriquecimiento, pero al igual que en el flujo de la quebrada de Paipote existe alto enriquecimiento de Hg atribuido al flujo cercano a los relaves mineros del cauce del Río Copiapó. Fuente: Elaboración propia.

3.6 Factores de enriquecimiento en la ciudad

A continuación se presentan los factores de enriquecimiento (FE) para las matrices de suelo, polvo de calles y lodos, calculados con respecto a los valores *background* obtenidos con el método de Lepeltier. Los FE se presentan para el total de las muestras gruesas (< 2 mm) y para 10 muestras finas de cada matriz (< 53 μm).

3.6.1 Suelos

3.6.1.1 Factor de enriquecimiento en muestras de suelo

En la Tabla 3-18 se indican la cantidad de muestras de suelo, de un total de 42 (< 2 mm), que poseen un factor de enriquecimiento en cada clasificación. Se destaca que para el Cr, Fe, Ni, Ti, V y Zn los factores de enriquecimientos están en las clasificaciones de enriquecimiento mínimo o moderado, indicando que los suelos de la ciudad no poseen grandes enriquecimientos con respecto a las zonas *background*. Por otro lado el As, Co, Mn, P y Pb, presentan algunas muestras con niveles de enriquecimiento significativos y en algunos casos muy altos, estos metales se relacionan principalmente a actividades antropogénicas, como la minería, tráfico y agricultura (Cai et al., 2012; Ettler, 2015; Hedberg et al., 2005; Nicholson et al., 2003; Sternbeck et al., 2002; Viana et al., 2008; Xue et al., 2014). Por último, el Cu y el Hg son los metales con mayor enriquecimiento en la matriz de suelo, presentan casos de enriquecimiento extremo. En este caso ambos metales se atribuyen a los relaves en la ciudad, el Cu relacionado a relaves más contemporáneos y el Hg a relaves antiguos; en donde se utilizaba la amalgamación con mercurio para extraer oro.

Tabla 3-18: Número de muestras de suelo gruesas (< 2 mm) con FE en cada clasificación según metal.

Rango FE	Clasificación	As	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	P	Pb	Ti	V	Zn
0 a 2	Enriquecimiento mínimo	39	36	42	36	40	4	39	41	0	31	42	42	41
2 a 5	Enriquecimiento moderado	2	5	0	3	2	15	1	1	37	9	0	0	1
5 a 20	Enriquecimiento significativo	1	0	0	2	0	21	2	0	5	1	0	0	0
20 a 40	Enriquecimiento muy alto	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
Sobre 40	Extremadamente enriquecido	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

3.6.1.2 Factor de enriquecimiento en fracción fina de suelos

En la Tabla 3-19 se indican la cantidad de muestras de suelo, de un total de 10 (< 53 μm), que poseen un factor de enriquecimiento en cada clasificación. La tendencia detectada en las muestras gruesas se mantiene para las muestras finas. En general el factor de enriquecimiento aumenta en las muestras finas, demostrando que la parte fina de las muestras se encuentra más enriquecida que la muestra gruesa. Este fenómeno se puede explicar de dos formas, primero que las partículas finas poseen una superficie específica mayor y por lo tanto mayor cantidad de metales en su superficie. Y segundo el enriquecimiento de esta fracción es debido a la acción antropogénica sobre las muestras; ya sea por deposición atmosférica, material fino de relave, emisiones del tráfico o agricultura. La comparación entre pares de muestras de suelos finas y gruesas se encuentra en el Anexo U.

Tabla 3-19: Número de muestras de suelo finas (< 53 μm) con FE en cada clasificación según metal.

Rango FE	Clasificación	As	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	P	Pb	Ti	V	Zn
0 a 2	Enriquecimiento mínimo	9	8	10	6	9	2	9	10	0	7	10	10	10
2 a 5	Enriquecimiento moderado	1	1	0	2	1	2	0	0	10	2	0	0	0
5 a 20	Enriquecimiento significativo	0	1	0	1	0	5	1	0	0	1	0	0	0
20 a 40	Enriquecimiento muy alto	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Sobre 40	Extremadamente enriquecido	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

3.6.1.3 Mapas de enriquecimiento de suelos

Se presentan los mapas de enriquecimiento en suelos de la ciudad para As, Cu, Hg y Pb, en la Figura 3-47, Figura 3-48, Figura 3-49 y Figura 3-50, respectivamente. Para el mapa de FE en As se observa que existe un enriquecimiento en algunos sectores aledaños a relaves ricos en As, como es el relave Papapietro en el centro de la ciudad. De la misma forma los FE de Cu y Hg son elevados en sectores contiguos a relaves de la minería del cobre y relaves antiguos de oro, respectivamente. Por otro lado, los FE del Pb se encuentran concentrados en sectores con alta cantidad de tráfico como lo es el centro de la ciudad y las vías principales. Los mapas de FE para el resto de los elementos se presentan en el Anexo V.

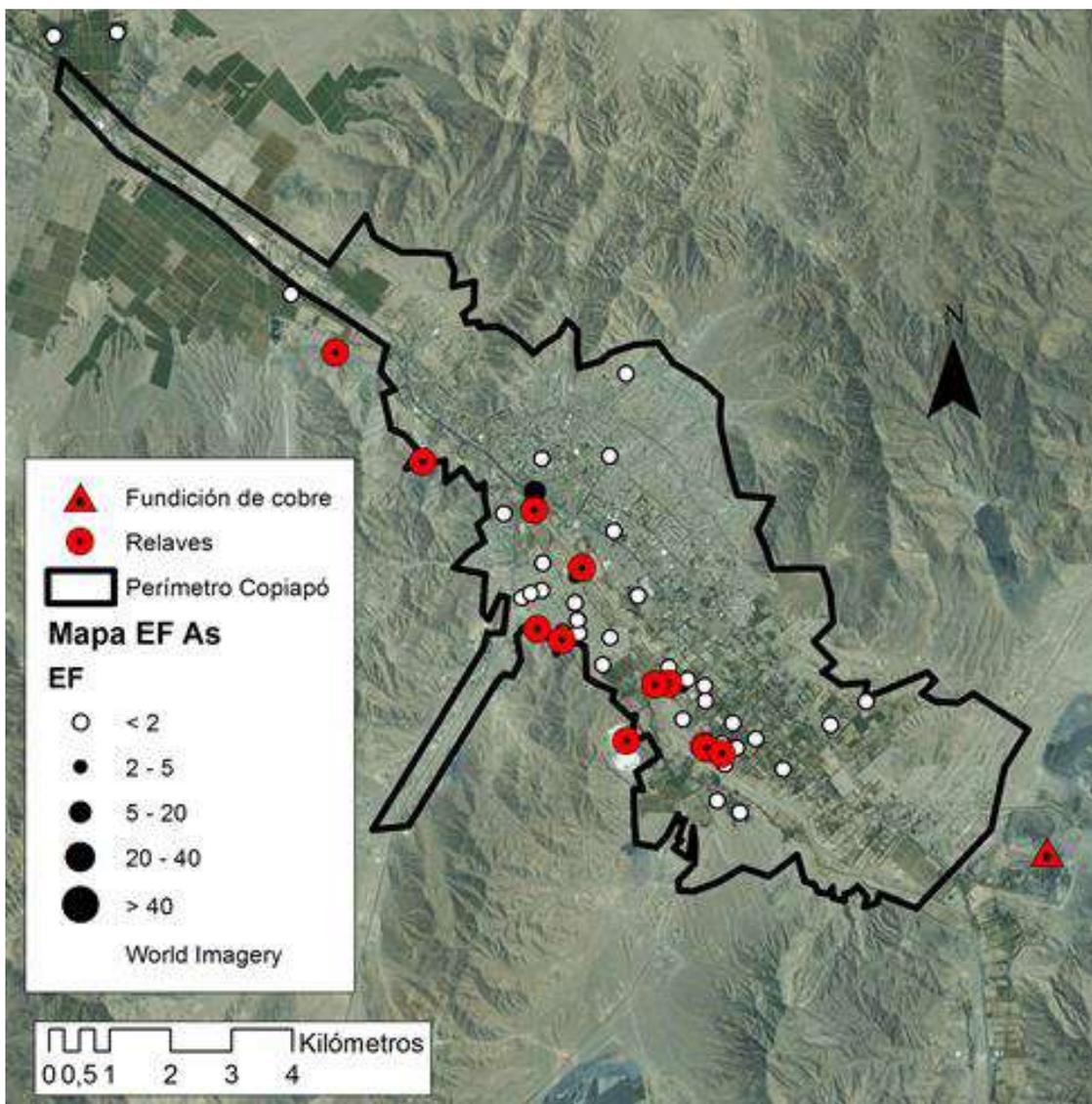


Figura 3-47: Mapa de FE para As en muestras de suelo. Se observa que en los suelos agrícolas y parques urbanos no presentan altos enriquecimientos de As. A excepción de suelos cercanos a relaves y la plaza Colipi con enriquecimientos considerados como “significativos”. Fuente: Elaboración propia.

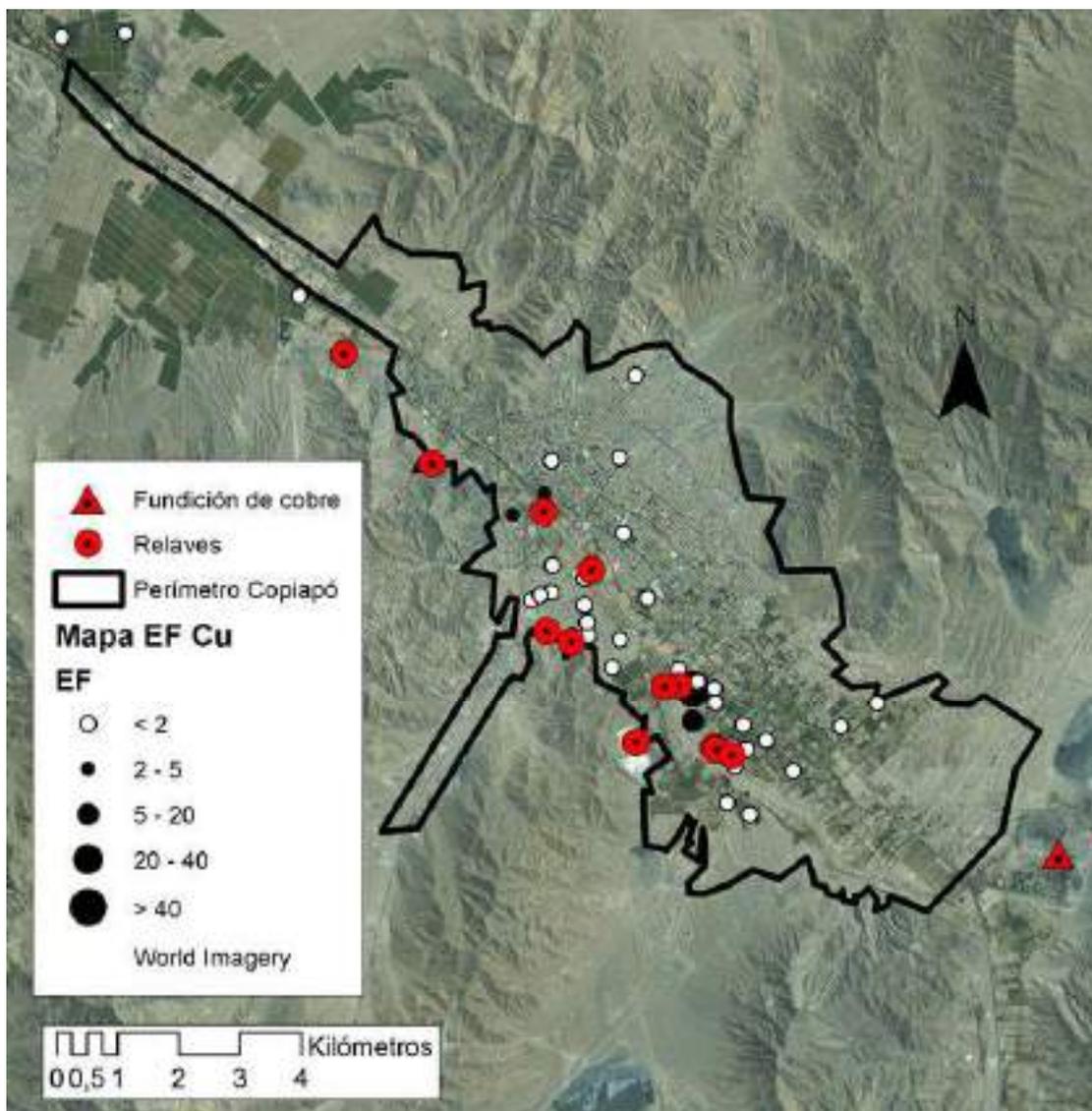


Figura 3-48: Mapa de FE para Cu en muestras de suelo. Los FE de Cu se elevan en sectores cercanos a los relaves urbanos, llegando a alcanzar enriquecimiento clasificados como “extremadamente enriquecidos”. Fuente: Elaboración propia.

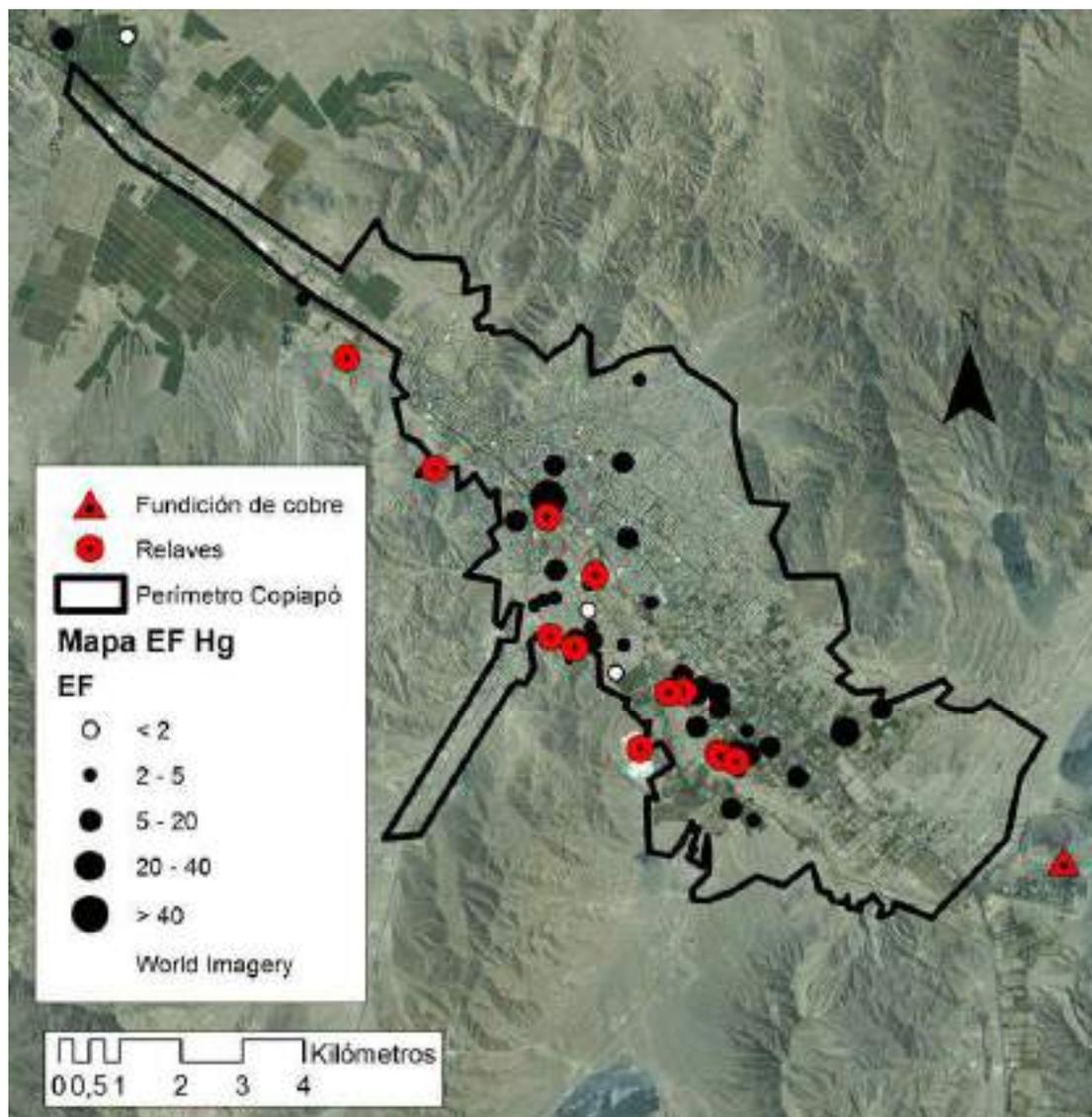


Figura 3-49: Mapa de FE para Hg en muestras de suelo. El enriquecimiento de Hg en la ciudad es generalizado y en de mayor magnitud en los suelos cercanos a los relaves mineros. Se destaca el caso de enriquecimiento extremo de Hg en la plaza Colipi en el centro de la ciudad. Fuente: Elaboración propia.

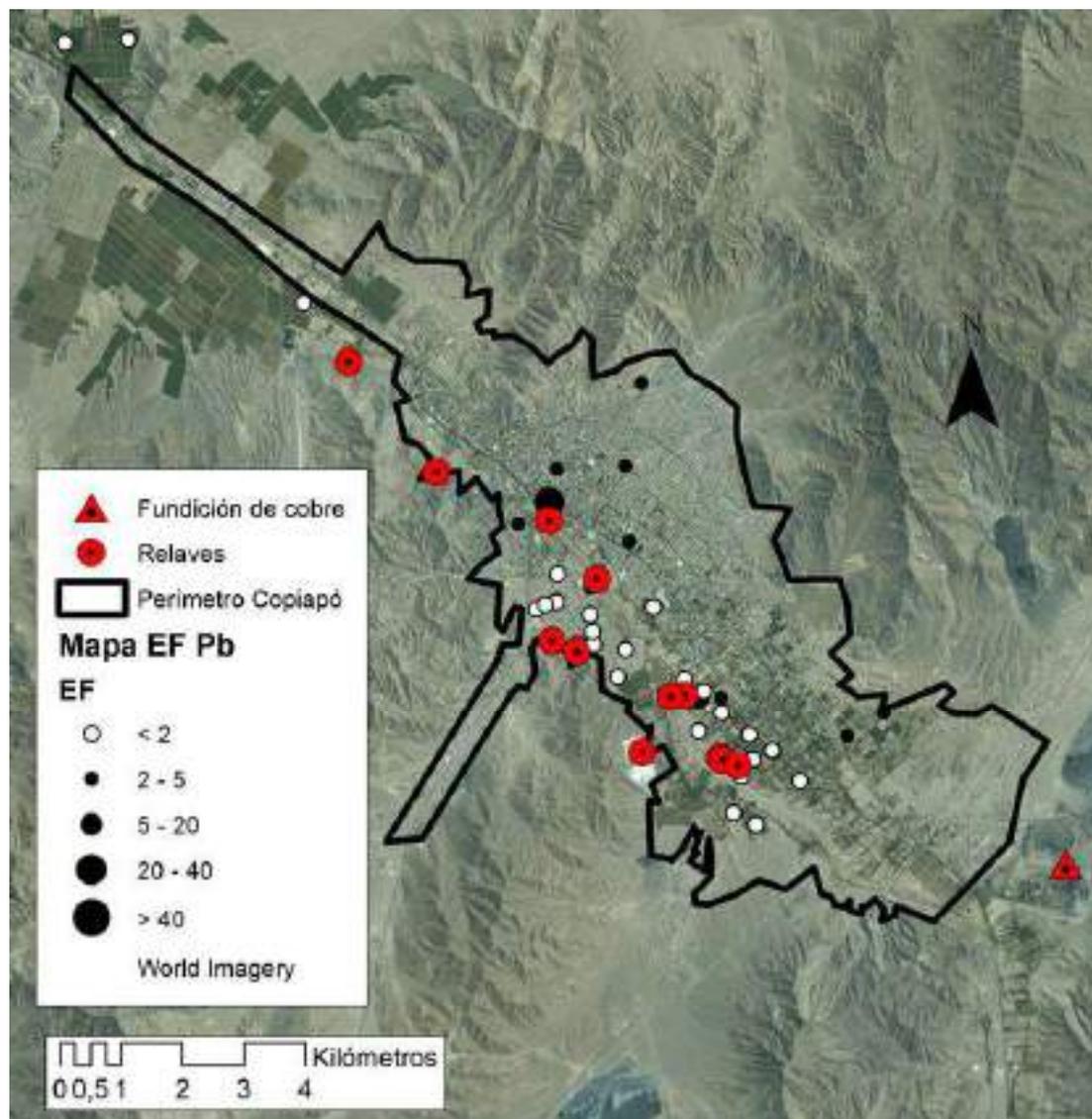


Figura 3-50: Mapa de FE para Pb en muestras de suelo. Se observa un mayor enriquecimiento en suelos cercanos al centro de la ciudad y también en sectores cercanos a relaves. Se destaca el enriquecimiento clasificado como “muy alto” en la plaza Colipi. Fuente: Elaboración propia.

3.6.2 Polvos de calle

3.6.2.1 Factor de enriquecimiento en muestras de polvo de calles

En la Tabla 3-20 se indican la cantidad de muestras de polvo de calles, de un total de 71 (< 2 mm), que poseen un factor de enriquecimiento en cada clasificación. El Mn y el Ti son los dos elementos que poseen la mayor parte de las muestras en niveles de

enriquecimiento mínimo, por lo tanto ambos elementos no poseen enriquecimiento y se relacionan a fuentes naturales. Por otro lado el Co, Cr, Fe, Ni y V poseen niveles de enriquecimiento mayores, alcanzando en variadas veces enriquecimientos moderados, significativos y muy altos. En el caso del As, Cu, Hg, P, Pb y Zn; todos poseen FE con clasificaciones muy altas incluida en algunos casos extremadamente enriquecidos. Estos elementos, a excepción del P, están relacionados a procesos mineros, relaves y emisiones de la fundición de cobre (Ettler, 2015; Hedberg et al., 2005; Sims et al., 2013). Por otro lado el P es un elemento altamente relacionado al uso de fertilizantes en los suelos de la ciudad, que luego aportan material a los polvos de calle (Ajmone-Marsan et al., 2008).

Tabla 3-20: Número de muestras de polvo de calles (< 2 mm) con FE en cada clasificación según metal.

Rango FE	Clasificación	As	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	P	Pb	Ti	V	Zn
0 a 2	Enriquecimiento mínimo	54	54	40	15	45	26	68	59	33	18	71	57	41
2 a 5	Enriquecimiento moderado	14	14	26	33	24	28	3	10	28	29	0	14	24
5 a 20	Enriquecimiento significativo	2	3	5	16	2	14	0	2	9	21	0	0	5
20 a 40	Enriquecimiento muy alto	1	0	0	4	0	2	0	0	1	3	0	0	1
Sobre 40	Extremadamente enriquecido	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.2 Factor de enriquecimiento en fracción fina de polvo de calles

En la Tabla 3-21 se indican la cantidad de muestras finas de polvo de calles, de un total de 10 (< 53 μm), que poseen un factor de enriquecimiento en cada clasificación. La tendencia detectada en las muestras gruesas se mantiene para las muestras finas; donde el As, Cu, Hg, Pb y Zn son los elementos con mayores enriquecimientos. En general el factor de enriquecimiento aumenta en las muestras finas, demostrando que la parte fina de las muestras se encuentra más enriquecida que la muestra gruesa, al igual que en las muestras de suelo estudiadas. Cabe destacar que existen muestras finas de polvos de calles con un FE clasificado como extremadamente enriquecido para As, Cu y Zn elementos que deben

ser considerados como prioridad para futuros estudios. La comparación entre pares de muestras de polvo de calles finas y gruesas se encuentra en el Anexo U.

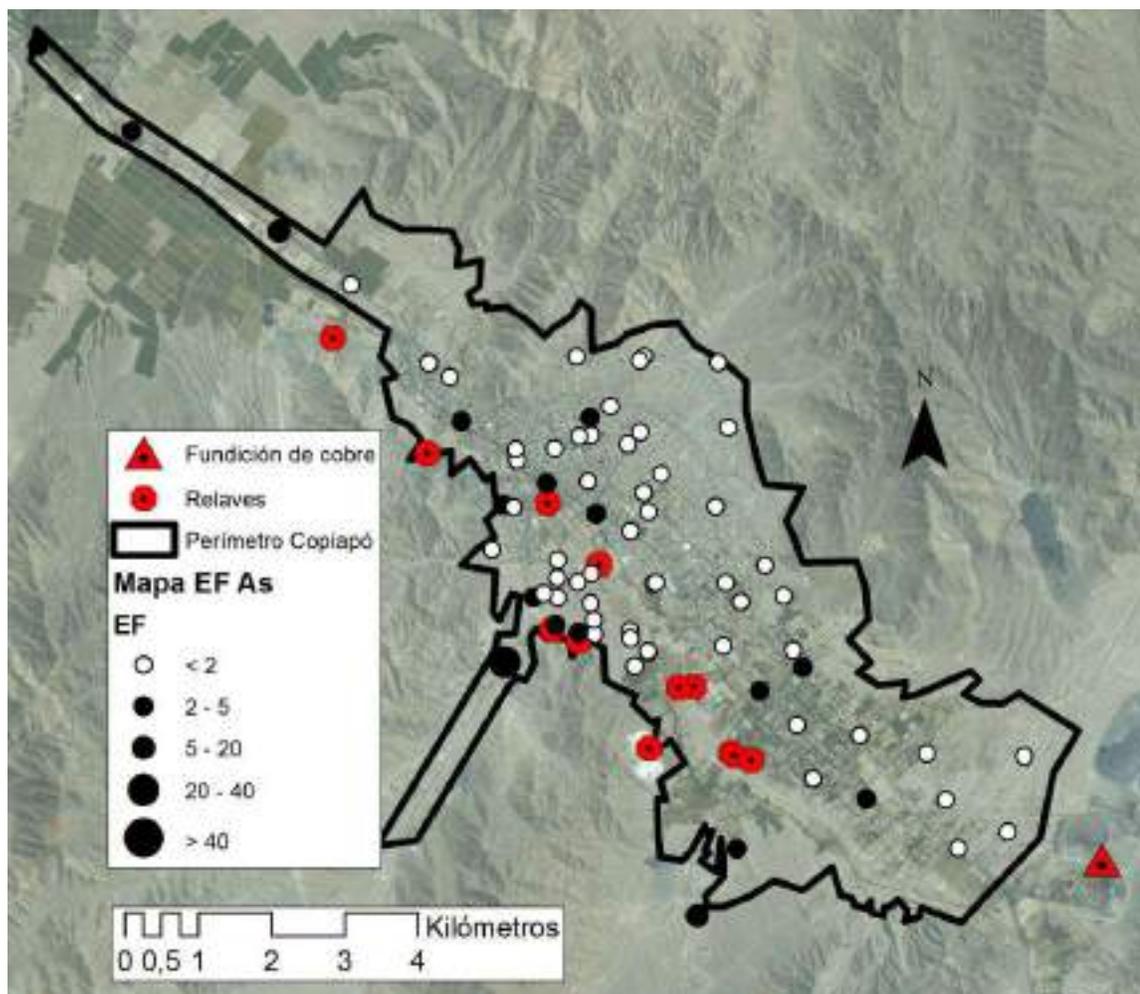
Tabla 3-21: Número de muestras de polvo de calles finas (< 53 µm) con FE en cada clasificación según metal.

Rango FE	Clasificación	As	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	P	Pb	Ti	V	Zn
0 a 2	Enriquecimiento mínimo	3	6	7	1	5	1	10	7	0	1	9	9	1
2 a 5	Enriquecimiento moderado	5	4	2	3	4	3	0	3	3	5	1	1	7
5 a 20	Enriquecimiento significativo	1	0	1	2	1	5	0	0	7	3	0	0	1
20 a 40	Enriquecimiento muy alto	0	0	0	3	0	1	0	0	0	1	0	0	0
Sobre 40	Extremadamente enriquecido	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.3 Mapas de enriquecimiento de polvo de calles

Se presentan los mapas de enriquecimiento en polvos de calle para As, Cu, Hg y Pb, en la Figura 3-51, Figura 3-52, Figura 3-53 y Figura 3-54, respectivamente. En el caso del mapa de FE para As, se observa que existe enriquecimiento en sectores cercanos a relaves mineros, pero también en zonas industriales donde, en esta ciudad, predominan las industrias del ámbito minero. Los FE de Cu se distribuyen homogéneamente en la ciudad, destacando sectores más enriquecidos cercanos a relaves. El cobre como se ha planteado previamente puede provenir tanto de las emisiones de la fundición, como de los relaves, situación que explicaría la homogeneidad del enriquecimiento y los sectores puntuales más enriquecidos debido al aporte de los relaves. Para el caso del Hg se observa que existe un enriquecimiento más notorio en el centro de la ciudad, como también cerca de relaves ricos en Hg. Por último, el mapa de FE para el Pb nos sugiere que existe un enriquecimiento de este metal en la zona centro de la ciudad, explicado por las emisiones de combustión de los vehículos y la alta densidad vehicular en el centro de la ciudad. Los mapas de FE para el resto de los elementos se presentan en el Anexo V.



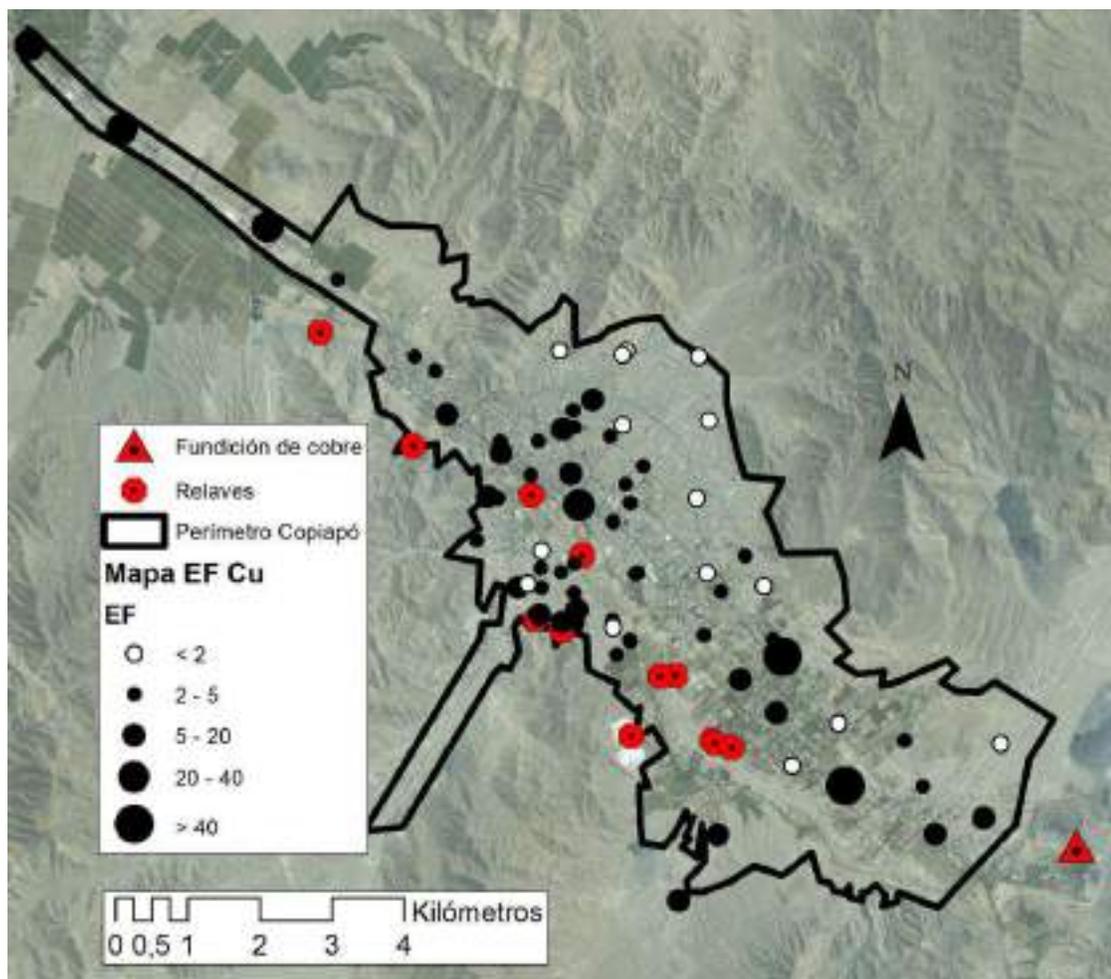


Figura 3-52: Mapa de FE para Cu en muestras de polvo de calles. Los FE de Cu son homogéneos y altos en toda la ciudad. Destacando sectores clasificados con enriquecimientos “muy altos” en sectores cercanos a relaves y la zona industrial minera de la ciudad. Fuente: Elaboración propia.

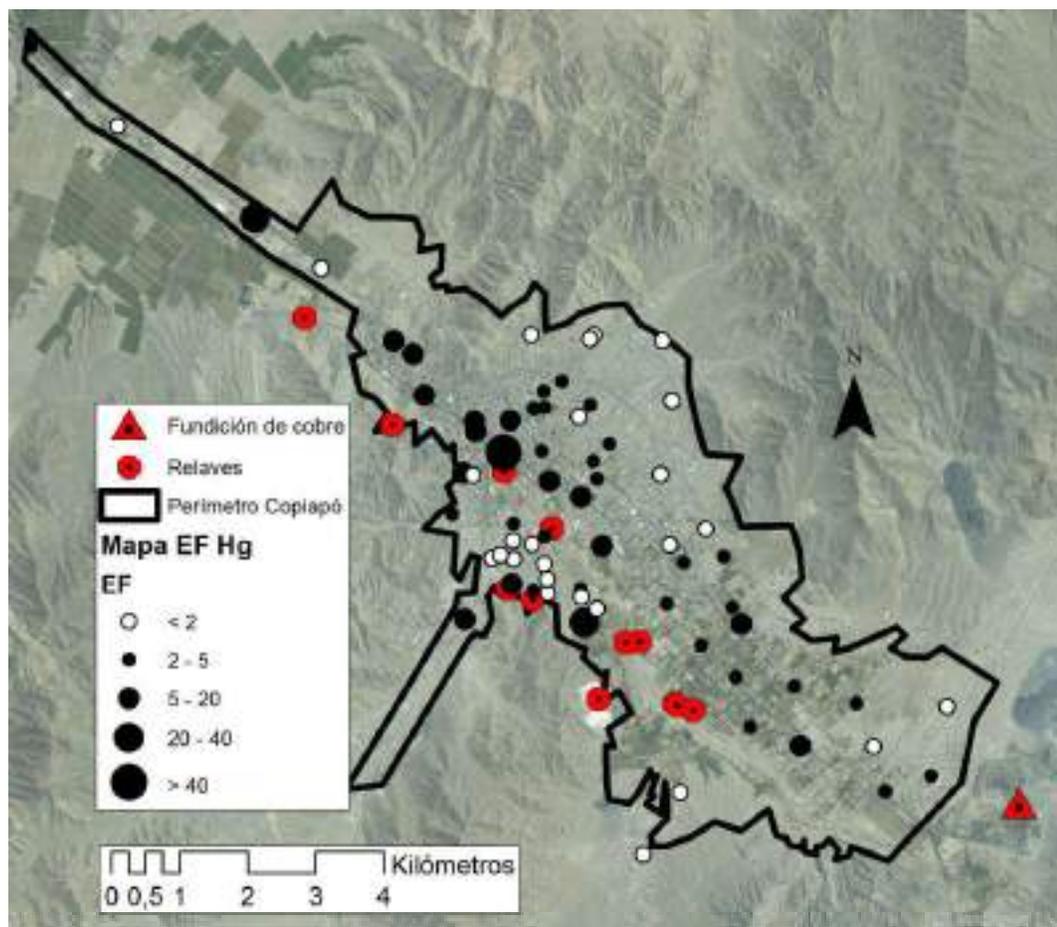


Figura 3-53: Mapa de FE para Hg en muestras de polvo de calles. El enriquecimiento de Hg es generalizado en toda la ciudad, con altos valores cerca de relaves mineros ricos en Hg. Fuente: Elaboración propia.

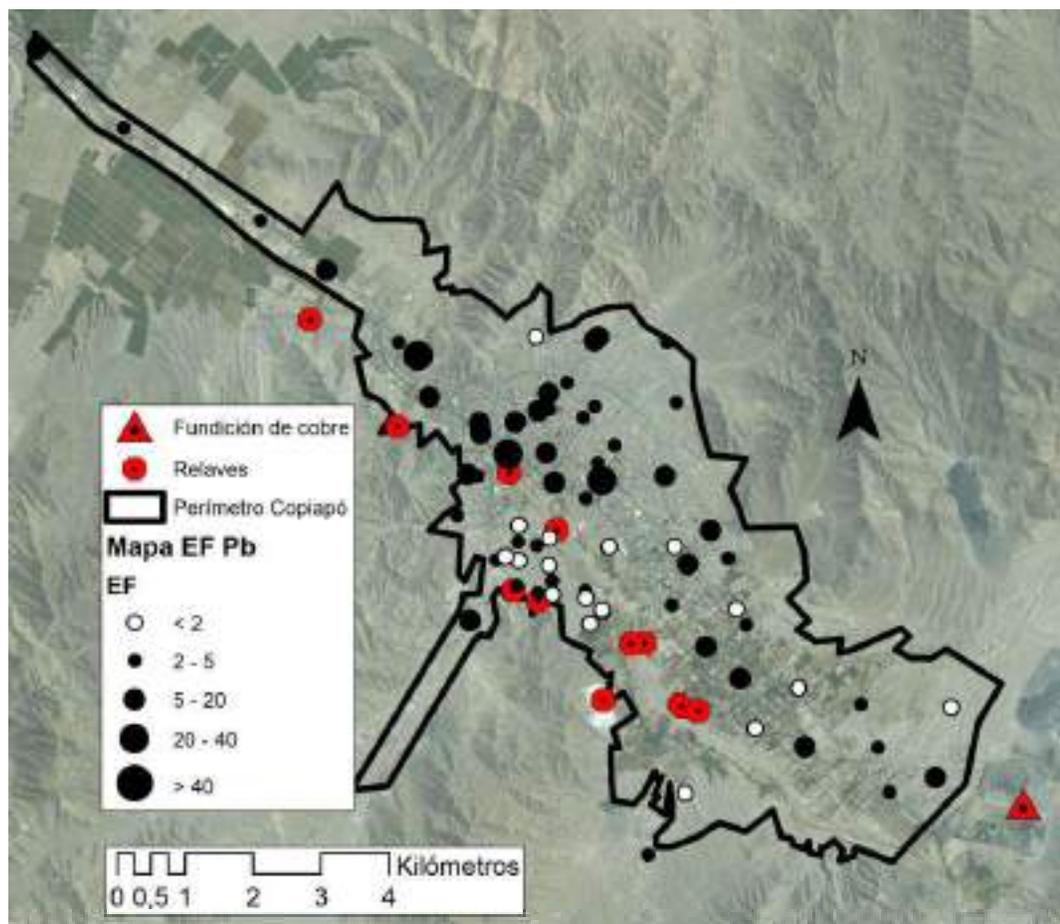


Figura 3-54: Mapa de FE para Pb en muestras de polvo de calles. Los FE de Pb son más altos en la zona centro de la ciudad y en vías de alto tránsito (Avenida Copayapu y ex Ruta 5 Norte). Fuente: Elaboración propia.

3.6.3 Lodos

3.6.3.1 Factor de enriquecimiento en muestras de lodos aluvionales

En la Tabla 3-22 se indican la cantidad de muestras de lodo de un total de 41 (< 2 mm), que poseen un factor de enriquecimiento en cada clasificación. En el caso de las muestras de lodo, todos los metales a excepción del Hg poseen un FE correspondiente a un enriquecimiento mínimo. Esto concuerda con el efecto de dilución presentados previamente, ya que al existir arrastre de material minero la población suponía un enriquecimiento de los lodos, a pesar de esto los FE indican lo contrario. En el caso del

Hg se observa que gran parte de las muestras poseen un enriquecimiento significativo, esto puede explicarse en la existencia de una fuente de mercurio previa a la ciudad en la quebrada de Paipote.

Tabla 3-22: Número de muestras de lodo gruesas (< 2 mm) con FE en cada clasificación según metal.

Rango FE	Clasificación	As	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	P	Pb	Ti	V	Zn
0 a 2	Enriquecimiento mínimo	41	41	41	41	41	8	41	41	41	41	41	41	41
2 a 5	Enriquecimiento moderado	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0
5 a 20	Enriquecimiento significativo	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0
20 a 40	Enriquecimiento muy alto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sobre 40	Extremadamente enriquecido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

3.6.3.2 Factor de enriquecimiento en fracción fina de lodos aluvionales

En la Tabla 3-23 se indican la cantidad de muestras de lodo, de un total de 10 (< 53 μm), que poseen un factor de enriquecimiento en cada clasificación. La tendencia detectada en las muestras gruesas se mantiene para las muestras finas. En general el factor de enriquecimiento aumenta en las muestras finas, al igual que en las muestras de suelo y polvo de calles. La comparación entre pares de muestras de lodo finas y gruesas se encuentra en el Anexo U.

Tabla 3-23: Número de muestras de lodo finas (< 53 μm) con FE en cada clasificación según metal.

Rango FE	Clasificación	As	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	P	Pb	Ti	V	Zn
0 a 2	Enriquecimiento mínimo	10	10	10	10	10	3	10	10	10	10	10	10	10
2 a 5	Enriquecimiento moderado	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
5 a 20	Enriquecimiento significativo	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0
20 a 40	Enriquecimiento muy alto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sobre 40	Extremadamente enriquecido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

3.6.3.3 Mapas de enriquecimiento de lodos

Se presentan el mapa de enriquecimiento en lodos de la ciudad para Hg en la Figura 3-55. Se puede observar que existe enriquecimiento de Hg en todos los sectores de la ciudad, como también en las muestras de lodo al inicio de la quebrada Paipote. Esta situación sugiere que el Hg proviene de una fuente externa a la ciudad y que enriquece el material de los lodos. Esto debido a que la concentración *background* de Hg es baja a diferencia de la presente en los lodos, por lo que debe existir una fuente externa aportante de Hg que se ubique en la quebrada de Paipote.

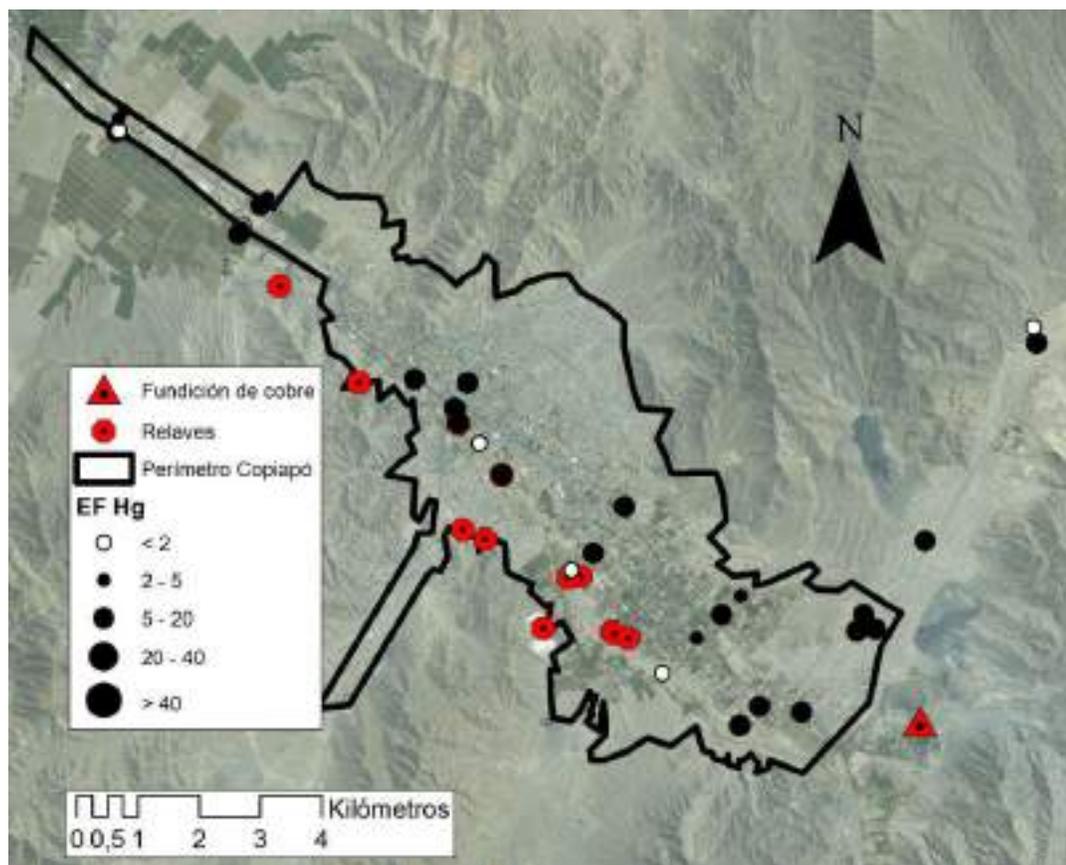


Figura 3-55: Mapa de FE para Hg en muestras de lodos. El FE de Hg en los lodos indica que el enriquecimiento es generalizado en los lodos provenientes de la quebrada de Paipote. Se destacan las muestras previas a los relaves en el cauce del río Copiapó, que no poseen enriquecimiento.

Fuente: Elaboración propia.

3.6.4 Comparación de Factor de Enriquecimiento entre matrices

La Figura 3-56 indica la comparación entre el porcentaje de muestras de suelos y polvos de calles en cada una de las clasificaciones de FE para As, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb y Zn. Para ambas matrices el As, Cu, Hg, Pb y Zn poseen un porcentaje bajo de muestras con niveles de enriquecimientos muy alto (20 – 40) o extremadamente enriquecidos (> 40). Esto sugiere que existe una fuente de contaminación en la ciudad que se relaciona a estos metales, como lo es la minería que aporta sus contaminantes a través de la erosión eólica en los relaves y a través de la deposición atmosférica de las emisiones originadas en la fundición de cobre. En el caso de las muestras de suelo, el As, Co, Cr, Cu, Mn, Ni y Zn poseen sobre 80% de las muestras con clasificación de enriquecimiento mínimo (< 2). Las muestras de polvo de calles solo para el Mn y Ni poseen más del 80% de las muestras con enriquecimiento mínimo. Sin importar la matriz de estudio se puede observar un enriquecimiento generalizado en metales asociados a la minería (As, Cu, Hg, Pb y Zn), destacando los sectores cercanos a relaves como más enriquecidos. El caso del Hg en ambas matrices se debe destacar particularmente ya que los porcentajes de muestras con niveles de enriquecimiento moderado (2 – 5) y significativo (5 - 20) superan el 86% y 59% en suelos y polvos de calles respectivamente, pudiendo ser un potencial riesgo de salud para la población dada la toxicidad asociada al Hg. Cabe resaltar que estos factores de enriquecimiento fueron calculados en base a muestras *background* supuestamente no enriquecidas, pero como se nombró previamente las emisiones de la fundición pueden alcanzar distancias muy alejadas por lo que el efecto de la fundición sobre la ciudad podría encontrarse oculto por valores *background* mayores a los realmente naturales, a pesar de que estos valores sean ahora las concentraciones basales de la zona.

Los polvos y suelos de la ciudad son el sumidero final de todo el material enriquecido proveniente de fuentes tanto naturales como antropogénicas (Acosta et al., 2014; Acosta, Martínez-Martínez, Faz, & Arocena, 2011). Por un lado los polvos de calles se enriquecen por diversas fuentes en la ciudad y al ser más móvil se enriquece con los aportes de todas las fuentes. A diferencia de los suelos que son matrices sólidas fijas que solo reciben el

material que llega a ellos (Wong et al., 2006). En ambos casos los FE son elevados para elementos relacionados a la minería principalmente, pero de forma absoluta los polvos de calles se encuentran más enriquecidos que los suelos de la ciudad.

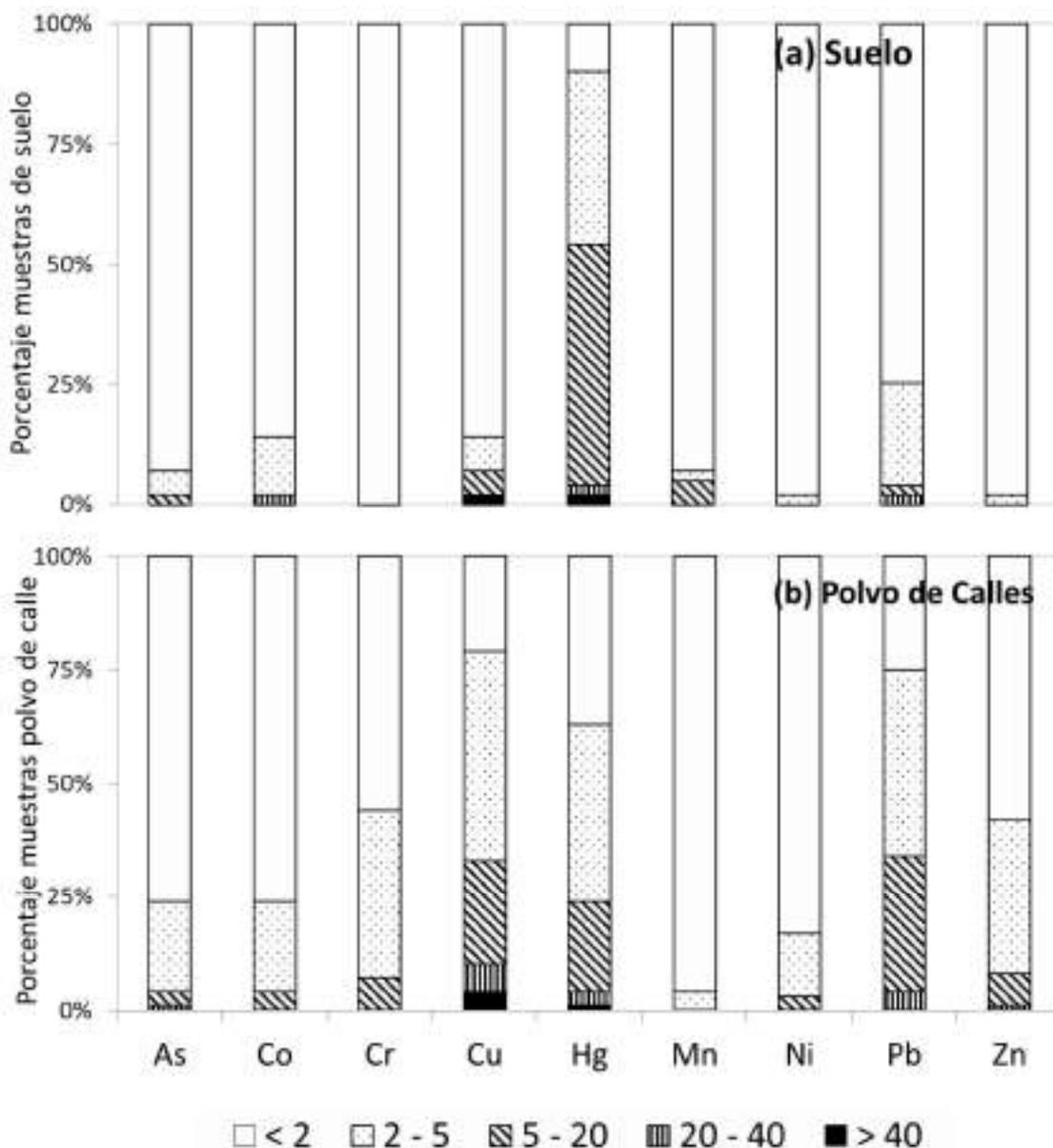


Figura 3-56: Comparación entre porcentaje de muestras de suelo y polvo de calles en cada clasificación de FE para diversos elementos. Se observa que en suelos el Cu, Hg y Pb son los elementos que presentan mayor enriquecimiento. En polvos de calle el As, Cu, Hg, Pb y Zn poseen altos enriquecimiento en ambos casos son elementos relacionados a las actividades mineras. Fuente: Elaboración propia.

3.7 Identificación de fuentes aportantes

3.7.1 Métodos físicos de identificación

3.7.1.1 XRD

Para la identificación del efecto de los relaves sobre la ciudad se tomó como base el trabajo realizado por Carkovic et al. (2016). En donde se identificó que las fases minerales de olivino, magnetita, andradita, nantokita y pirita solo se encontraban en relaves de la ciudad de Copiapó y no en suelos ni polvos de calles. El primer paso fue verificar la presencia de estos minerales en las muestras *background*, para así descartar un aporte natural de estas fases minerales a las matrices sólidas urbanas (Tabla 3-24). Como se observa, ninguno de estos minerales se identificó en las 59 muestras *background* analizadas por XRD.

Tabla 3-24: Identificación de minerales característicos de relaves mediante XRD en muestras *background*.

<i>Background</i>	Olivino	Magnetita	Andradita	Nantokita	Pirita
Identificado	0	0	0	0	0
No identificado	59	59	59	59	59
Total	59	59	59	59	59

Fuente: Elaboración propia.

El segundo paso fue identificar estos minerales en suelos y polvo de calles de la ciudad, Tabla 3-25 y Tabla 3-26 respectivamente. En 2 de las 20 muestras de suelo analizadas se identificó magnetita y en una muestra, tanto nantokita como pirita. De las 36 muestras de polvo de calles analizadas en 17 muestras se identificó magnetita, en 3 nantokita y en una pirita. Estos resultados confirman de manera física el efecto de los relaves en las matrices sólidas de la ciudad.

Tabla 3-25: Identificación de minerales característicos de relaves mediante XRD en muestras de suelo.

Suelos	Olivino	Magnetita	Andradita	Nantokita	Pirita
Identificado	0	2	0	1	1
No identificado	20	18	20	19	19
Total	20	20	20	20	20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-26: Identificación de minerales característicos de relaves mediante XRD en muestras de polvo de calles.

Polvos	Olivino	Magnetita	Andradita	Nantokita	Pirita
Identificado	0	17	0	3	1
No identificado	36	19	36	33	35
Total	36	36	36	36	36

Fuente: Elaboración propia.

3.7.1.2 SEM

El análisis de microscopía electrónica puede revelar la presencia de partículas de forma esférica, que se originan tanto en termoeléctricas como en fundiciones (Balladares, Kelm, Helle, Parra, & Araneda, 2014; Marrero et al., 2007; Zdanowicz et al., 2006). Dado que en el sector de Copiapó solo existe la fundición de cobre Paipote, cualquier partícula esférica será atribuida a las emisiones de esta. En estos estudios se realizó también la técnica EDS sobre estas partículas y se determinó que principalmente se conforman de Al, Si, Fe, Ca, Pb, Zn y Ni. A continuación se presentan imágenes y la composición elemental de las partículas identificadas en muestras de polvo de calles y suelos de la ciudad de Copiapó.

a) Imágenes SEM en Polvo de Calles

En la muestra de polvo P806 no se identificaron formas esféricas, a pesar de que ésta muestra se ubica a 1,5 km de la fundición. Para la muestra P845 ubicada a 10,8 km de la fundición, se identificaron partículas esféricas. En la Figura 3-57 se muestra la imagen obtenida junto con la concentración elemental del sector destacado en la imagen. La presencia de Al, Si, Fe y Ca indica que el origen de esta partícula es la fundición, probando

físicamente que las emisiones se extienden por toda la ciudad dependiendo de las condiciones de viento existentes. El resto de las imágenes SEM de partículas en esta muestra y su composición elemental respectiva, se encuentran en el Anexo W.

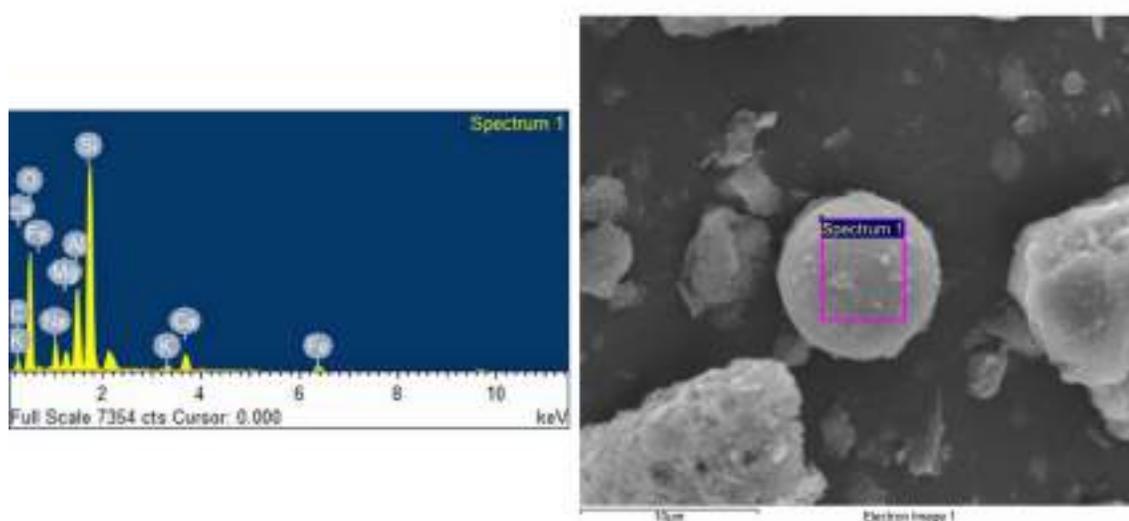


Figura 3-57: Imagen SEM de partícula esférica y su composición elemental encontrada en muestra de polvo P845. La composición elemental de esta partícula destaca por poseer alta cantidad de Al, Si y O, como también la presencia de Fe, composiciones similares a las encontradas por otros autores. Fuente: Elaboración propia.

b) Imágenes SEM en Suelos

En la muestra de suelo S125 se identificó una partícula de forma esférica, esta muestra se ubica a 6 km desde la chimenea de la fundición, en el sector agrícola de la ciudad. Esta partícula consta principalmente de aluminosilicatos según la composición entregada por el EDS, como se indica en la Figura 3-58. Cabe destacar que esta partícula además de tener Al, Si, Ca y Fe contiene también Cu y Zn, dos elementos altamente asociados a las emisiones de fundiciones de cobre (De Gregori et al., 2003; Ettler, 2015; Gidhagen et al., 2002; Ginocchio et al., 2004; Hedberg et al., 2005; Parra, Bravo, Quiroz, Moreno, Karanasiou, Font, Vidal, & Cereceda, 2014; Romo-Kröger et al., 1994). Por otro lado, en la muestra S130 ubicada a 5 km de la fundición no se detectaron partículas esféricas de interés.

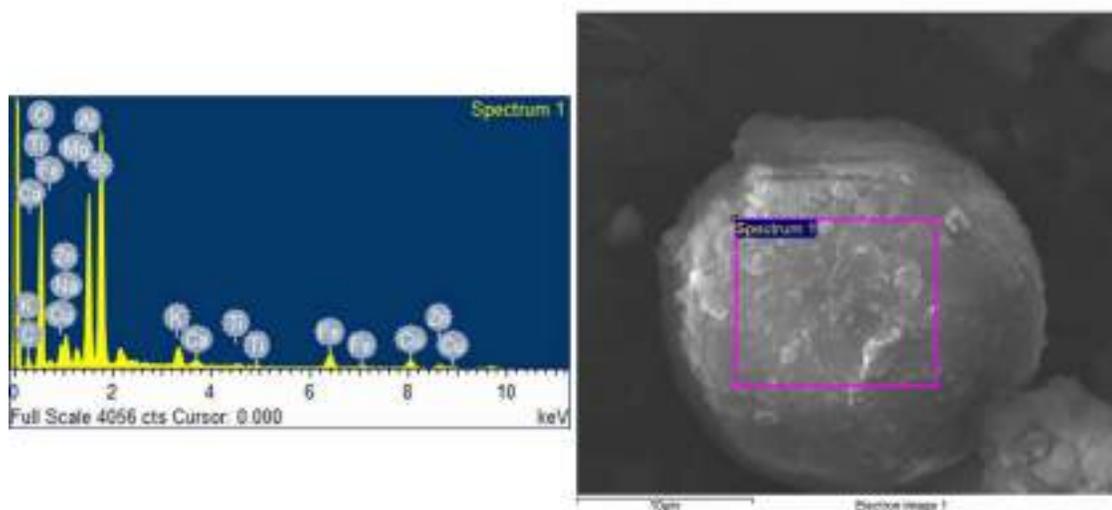


Figura 3-58: Imagen SEM de partícula esférica y su composición elemental encontrada en muestra de suelo S125. Esta partícula destaca por poseer metales como Cu y Zn relacionados a las emisiones de fundiciones de cobre. Fuente: Elaboración propia.

3.7.1.3 Filtros de aire

El análisis de la composición elemental de los filtros de PM_{10} indica qué elementos se encuentran presentes en las partículas en suspensión, y por lo tanto, indicios de las posibles fuentes emisoras en la zona. Las concentraciones para elementos de interés en las muestras obtenidas en noviembre del 2014 se indican en la Tabla 3-27. Destacan las altas concentraciones de S, la principal emisora de SO_2 en la zona es la fundición de cobre. Esto nos sugiere que el efecto de esta fuente se extiende al menos 8 km hasta el centro de la ciudad. Por otro lado, la variación de las concentraciones entre los diferentes días, nos indica la variabilidad del rango de dispersión de las emisiones provenientes de la fundición, altamente relacionado a las condiciones de viento locales. Por otro lado la presencia de Cu, Pb y Zn se relaciona también a las emisiones de esta fundición o de los relaves cercanos. Otros elementos como el Al, Fe, Mg y Sr indican el aporte natural al polvo en suspensión en la zona.

Las muestras de abril del 2015 (Tabla 3-28), situación post-aluviones, continúan indicando altos valores de S en los filtros, resultados que coinciden con el continuo funcionamiento de la fundición Paipote a pesar de la emergencia en la Región de Atacama.

Por otro lado, el aumento de las concentraciones de elementos como el Al, Ca, Mg y Fe se debe al polvo que es re-suspendido con el movimiento de maquinarias y vehículos durante los procesos de remoción del lodo seco. Por lo tanto, los filtros de material particulado confirman el efecto de la fundición en la ciudad, como también el aporte natural. En el Anexo X se indican las concentraciones en los filtros de PM₁₀ para todos los elementos medidos.

Tabla 3-27: Concentración elemental de filtros PM₁₀ de Copiapó noviembre 2014.

Lugar	Copiapó 2014										
	CESFAM	Hotel	Centro Cultural	CESFAM	Centro Cultural	Hotel	Centro Cultural	Hotel	CESFAM	Centro Cultural	Hotel
Fecha	18-03-2014	18-03-2014	18-03-2014	19-03-2014	19-03-2014	19-03-2014	20-03-2014	20-03-2014	20-03-2014	21-03-2014	21-03-2014
Al	0,8525	0,4619	0,5537	0,5352	0,2509	0,3519	0,4825	0,4333	0,6567	0,3564	0,2873
As	0,0069	0,0043	< LD	< LD	< LD	< LD	0,0055	0,0081	< LD	< LD	< LD
Ca	1,6821	0,9174	0,9666	1,0693	0,6101	0,7633	1,1031	0,9447	1,4558	0,8436	0,6715
Cd	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Cl	0,5091	0,4019	0,4382	0,7499	0,6565	0,8712	1,8059	1,7672	2,5909	2,4374	2,2227
Cu	0,0375	0,0179	0,0214	0,0203	0,0075	0,0100	0,0552	0,0637	0,0435	0,0241	0,0248
Fe	1,0249	0,5868	0,7265	0,6021	0,3443	0,4136	0,7617	0,7018	0,8745	0,5198	0,4303
Hg	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	0,0018	< LD	< LD	< LD
Mg	0,1998	0,1384	0,2292	0,1780	0,1223	0,1517	0,1995	0,2015	0,2992	0,1951	0,1557
Pb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	0,0211	0,0101	0,0103	< LD	< LD	< LD
S	1,7633	1,5139	1,5635	1,1609	1,0178	1,1423	1,9529	1,9411	1,9290	1,7124	1,6921
Sr	0,0064	0,0029	0,0031	0,0028	0,0015	0,0022	0,0057	0,0054	0,0068	0,0028	0,0008
Ti	0,0629	0,0364	0,0382	0,0355	0,0210	0,0279	0,0425	0,0375	0,0539	0,0297	0,0244
Zn	0,0250	0,0233	0,0180	0,0133	0,0066	0,0093	0,0780	0,1049	0,0488	0,0487	0,0487

*< LD = Valores bajo el límite de detección del equipo

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-28: Concentración elemental de filtros PM₁₀ de Copiapó abril 2015.

Lugar	Copiapó 2015							
	Municipalidad	Carabineros Paipote	Casale	Municipalidad	Casa Particular Sector Hospital	Casale	Carabineros Paipote	CESFAM El Palomar
Fecha	08-04-2015	08-04-2015	08-04-2015	09-04-2015	09-04-2015	09-04-2015	09-04-2015	09-04-2015
Al	2,6399	2,5603	4,7085	1,3368	0,8975	4,7489	2,4332	1,8847
As	0,0015	0,0101	0,0048	< LD	< LD	0,0046	0,0037	0,0015
Ca	2,5468	2,3560	4,0435	1,4108	0,8228	4,0596	2,1088	2,0052
Cd	0,0005	0,0057	0,0005	0,0041	0,0036	0,0005	0,0005	0,0006
Cl	0,8382	0,5682	0,7639	0,6411	0,5621	0,7615	0,5961	0,9078
Cu	0,0170	0,1309	0,0257	0,0135	0,0067	0,0222	0,0176	0,0228
Fe	2,3239	2,6651	4,1607	1,1360	0,7888	4,2319	1,9880	1,6645
Hg	0,0026	< LD	< LD	< LD	< LD	0,0017	< LD	< LD
Mg	0,9975	0,9932	1,6565	0,5586	0,4046	1,6879	0,8855	0,8099
Pb	0,0060	0,0035	0,0057	0,0021	< LD	0,0055	0,0076	0,0018
S	1,3890	1,3076	1,2956	0,9560	0,8838	0,9365	0,9398	1,0827
Sr	0,0157	0,0143	0,0258	0,0100	0,0022	0,0272	0,0116	0,0111
Ti	0,1992	0,1929	0,3842	0,1035	0,0637	0,3966	0,1816	0,1481
Zn	0,0162	0,0247	0,0237	0,0111	0,0060	0,0232	0,0167	0,0134

*< LD = Valores bajo el límite de detección del equipo

Fuente: Elaboración propia.

3.7.2 Métodos estadísticos

3.7.2.1 Análisis de correlación

La Tabla 3-29 y Tabla 3-30 indican los resultados de los análisis de correlación para la matriz de polvo de calles y suelos, respectivamente.

En las muestras de polvos de calles se observan buenas correlaciones entre el As, Cu, Fe, Zn y Pb elementos relacionados a la minería, relaves y emisiones de la fundición (Gidhagen et al., 2002; Hedberg et al., 2005; Parra, Bravo, Quiroz, Moreno, Karanasiou, Font, Vidal, & Cereceda, 2014; Ramadan, Song, & Hopke, 2000; Viana et al., 2008). El Al, Ca, Mg, Sr y Ti presentan correlaciones muy altas entre si mostrando que poseen un origen en común, asociado a fuentes naturales (Ondov et al., 1982; Rueda-Holgado et al., 2016; Tasdemir, Kural, Cindoruk, & Vardar, 2006). Las correlaciones entre el Co, Cr, Fe Mn, Ni y V sugieren un aporte de una originado en las emisiones de vehículos y desgaste de frenos (Salmanighabeshi et al., 2015; Viana et al., 2008). El Hg no muestra ninguna correlación en las muestras de polvos de calle exceptuando con el Pb con un alfa de 0,05.

De la misma forma, las correlaciones en las muestras de suelos urbanos muestran que el Al, Cr, Li, Mg, Ni, Sr y Ti están relacionados a un origen en común, fuentes naturales. Las correlaciones entre el As, Pb, Zn y Hg nos sugieren una fuente relacionada a los actuales y antiguos procesos mineros. Las correlaciones entre el Ca, Co, Cu, Mn y Fe sugieren una fuente originada en el tráfico, al igual que en la matriz de polvos de calles. En resumen se destacan tres fuentes principales que afectan a ambas matrices sólidas de la ciudad, una fuente natural, el tráfico y las actividades mineras de la zona.

Tabla 3-29: Análisis de correlación de Pearson para muestras de polvo de calles.

	Al	As	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Sr	Ti	V	Zn	Hg
Al	1	-0,08	0,37	-0,01	-0,02	-0,12	-0,14	0,23	0,80	0,29	0,27	-0,12	-0,04	0,32	0,79	-0,06	-0,01	-0,06
As		1	-0,14	0,18	0,36	0,96	0,60	0,13	0,04	0,38	-0,05	0,19	0,29	-0,13	-0,03	0,20	0,92	0,08
Ca			1	-0,13	-0,06	-0,23	-0,21	-0,03	0,50	0,21	0,11	-0,18	0,04	0,88	0,13	-0,16	-0,09	0,09
Co				1	0,23	0,22	0,52	0,42	0,02	0,39	0,47	0,42	0,08	-0,15	0,08	0,47	0,14	-0,05
Cr					1	0,48	0,58	0,00	0,03	0,42	-0,17	0,55	0,69	-0,08	0,16	0,39	0,49	-0,09
Cu						1	0,70	0,09	-0,03	0,44	-0,07	0,35	0,29	-0,19	-0,06	0,25	0,94	0,00
Fe							1	0,15	-0,05	0,63	-0,09	0,69	0,19	-0,25	0,09	0,79	0,61	-0,08
Li								1	0,38	0,40	0,60	0,13	-0,07	-0,09	0,24	0,14	-0,01	0,02
Mg									1	0,40	0,26	-0,07	0,02	0,38	0,59	0,01	0,03	0,02
Mn										1	0,11	0,46	0,15	0,16	0,24	0,42	0,38	-0,02
Na											1	-0,09	-0,03	0,13	0,17	-0,09	-0,08	0,09
Ni												1	0,14	-0,20	-0,03	0,52	0,26	-0,02
Pb													1	0,07	0,02	0,07	0,36	0,30
Sr														1	0,04	-0,22	-0,07	0,17
Ti															1	0,23	0,03	-0,07
V																1	0,16	-0,13
Zn																	1	0,03
Hg																		1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación alfa=0,01

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-30: Análisis de correlación de Pearson para muestras de suelo.

	Al	As	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Sr	Ti	V	Zn	Hg
Al	1	0,27	-0,02	-0,33	0,86	-0,37	-0,05	0,91	0,93	-0,17	0,08	0,73	-0,03	0,65	0,85	0,23	0,33	-0,07
As		1	0,12	-0,04	0,27	0,04	-0,07	0,27	0,29	0,06	-0,12	0,26	0,74	0,22	0,12	-0,01	0,83	0,66
Ca			1	0,68	0,03	0,80	0,39	0,04	0,26	0,78	-0,03	0,15	0,12	0,16	-0,32	-0,36	0,04	0,03
Co				1	-0,25	0,82	0,60	-0,34	-0,13	0,55	-0,04	0,10	0,04	-0,29	-0,56	0,09	-0,18	-0,05
Cr					1	-0,26	-0,04	0,86	0,76	-0,19	-0,23	0,83	-0,04	0,56	0,82	0,18	0,27	-0,06
Cu						1	0,30	-0,39	-0,16	0,66	-0,09	-0,15	0,15	-0,32	-0,58	-0,40	-0,08	0,03
Fe							1	-0,09	0,11	0,57	-0,09	0,36	-0,17	-0,22	-0,24	0,53	-0,22	-0,18
Li								1	0,91	-0,11	0,07	0,76	-0,04	0,73	0,79	0,18	0,31	-0,05
Mg									1	0,13	0,17	0,71	-0,02	0,68	0,68	0,16	0,32	-0,08
Mn										1	0,07	-0,02	0,00	-0,18	-0,45	-0,26	-0,09	-0,07
Na											1	-0,17	-0,10	0,12	-0,14	-0,08	-0,09	-0,05
Ni												1	0,00	0,47	0,56	0,47	0,24	-0,02
Pb													1	0,13	-0,13	-0,20	0,88	0,97
Sr														1	0,55	-0,01	0,39	0,15
Ti															1	0,28	0,22	-0,13
V																1	-0,09	-0,16
Zn																	1	0,82
Hg																		1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación alfa=0,01

Fuente: Elaboración propia.

3.7.2.2 Análisis de componentes principales

A partir de la varianza explicada y el valor propio de cada componente principal, se determinaron 6 factores principales significativos para las muestras de polvos de calles y 5 factores para las muestras de suelo. En la Tabla 3-31 se indican los valores propios, varianza explicada y los factores de carga para cada elemento y cada factor en ambas matrices sólidas de estudio.

Tabla 3-31: Análisis de componentes principales para muestras de polvo de calles y de suelos.

	Muestras de polvo de calles						Muestras de suelo				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Valor propio	5,1	3,4	2,2	1,6	1,4	1,2	6,2	3,6	3,4	1,7	1,1
% de la varianza total	18,3	14,2	18,5	11,4	12	8,5	31,7	19,5	20,9	10,4	6,8
Varianza explicada acumulada (%)	18,3	32,5	51,1	62,5	74,5	83	31,7	51,2	72,1	82,5	89,4
Al	-0,03	0,91	-0,09	0,13	0,23	-0,05	0,95	0,05	-0,15	0,07	0,06
As	0,97	-0,03	0,12	0,06	-0,05	0,09	0,24	0,84	0,07	0,04	-0,07
Ca	-0,1	0,2	-0,07	-0,02	0,93	0,04	0,16	0,06	0,95	-0,14	0
Co	0,05	-0,07	0,58	0,62	-0,08	0,02	-0,25	-0,02	0,8	0,34	-0,07
Cr	0,29	0,16	0,61	-0,23	-0,08	0,54	0,91	0,03	-0,09	0,05	-0,31
Cu	0,95	-0,06	0,25	0,02	-0,11	0,08	-0,27	0,04	0,89	-0,15	-0,15
Fe	0,51	-0,03	0,82	0,04	-0,11	-0,01	-0,02	-0,14	0,53	0,78	-0,02
Li	0,07	0,25	0,13	0,81	-0,06	-0,06	0,96	0,05	-0,11	0,01	0,07
Mg	0,06	0,78	-0,01	0,22	0,4	-0,03	0,94	0,06	0,14	0,07	0,19
Mn	0,37	0,27	0,61	0,24	0,32	-0,02	-0,05	-0,03	0,87	0,04	0,15
Na	-0,06	0,13	-0,11	0,87	0,07	0,06	0,02	-0,08	-0,01	-0,05	0,96
Ni	0,11	-0,11	0,81	0,03	-0,07	0,09	0,79	0,09	0,1	0,46	-0,2
Pb	0,21	0,06	0,16	-0,11	0,01	0,89	-0,08	0,98	0,06	-0,09	-0,03
Sr	-0,07	0,1	-0,13	-0,02	0,93	0,09	0,75	0,19	-0,09	-0,2	0,19
Ti	-0,05	0,91	0,12	0,06	-0,08	0,02	0,81	-0,06	-0,47	0	-0,18
V	0,05	0,08	0,83	0,01	-0,14	-0,1	0,15	-0,08	-0,29	0,91	-0,04
Zn	0,94	0,04	0,16	-0,06	-0,02	0,16	0,28	0,93	-0,07	-0,08	-0,02
Hg	0,01	-0,17	-0,21	0,23	0,16	0,61	-0,11	0,95	-0,04	-0,07	0,02

Fuente: Elaboración propia.

Los componentes principales de las muestras de polvo de calles se interpretaron como sigue:

- PC1: Este componente principal se relaciona al As, Cu y Zn con factores de carga sobre 0,94 y una explicación de la varianza total de 18,3%. Este componente se encuentra altamente relacionado a las actividades mineras, dado los análisis de correlación entre estos tres metales, este componente principal se puede interpretar como el efecto de la fundición y la industria minera sobre las muestras de polvo de calle (Ettler, 2015; Hedberg et al., 2005). Se descarta que este componente se relacione al efecto de los relaves antiguos, debido a que no existe relación alguna con el Hg.
- PC2: El segundo componente se encuentra muy relacionado a Al, Mg y Ti con factores de carga sobre 0,78 y una varianza explicada del 14,2%. Estos tres elementos, junto con sus factores de enriquecimiento y análisis de correlación, indican que este

componente principal corresponde al aporte natural en las muestras de polvo (De Gregori et al., 2003; Rueda-Holgado et al., 2016; Tasdemir et al., 2006).

- PC3: Este componente se relaciona con el Fe, Ni y V con cargas de factores sobre 0,81; y con el Cr y Mn con cargas de 0,61; este componente explica 18,5% de la varianza total en las muestras. Estos cinco elementos poseen altas correlaciones y factores de enriquecimiento mayores en el centro de la ciudad, indicando que este componente principal corresponde a emisiones vehiculares, tanto de combustión como de desgaste de materiales (Salmanighabeshi et al., 2015; Viana et al., 2008). Por otro lado, cabe destacar que el Pb no se relaciona a este factor y como se nombró previamente se explica en la prohibición de combustibles plomados que se reemplazaron por compuestos orgánicos de Mn (Wong et al., 2006).

- PC4: Este componente principal se relaciona principalmente al Li y al Na con cargas factoriales sobre 0,81 y con el Co con una carga de 0,61; este componente explica 11,4% de la varianza total. Al igual que el PC2 estos elementos se relacionan a la composición de suelos naturales, pero en el caso del Li y el Na fueron identificados como un componente principal distinto debido a que ambos elementos poseen comportamientos similares al ser ambos elementos alcalinos.

- PC5: Este componente principal se relaciona con el Ca y el Sr con un factor de carga de 0,93 y explica 12% de la varianza total de las muestras. Al igual que PC2 y PC4 estos elementos se encuentran muy relacionados a los suelos naturales, pero en este caso ambos elementos poseen comportamientos similares al ser elementos alcalinos térreos.

- PC6: Este componente principal se relaciona al Pb con factor de carga 0,89 y al Hg con 0,61, explica un 8,5% de la varianza total. Se interpretó como el efecto de los relaves ricos en mercurio a las muestras de polvos de calles, fundado en las concentraciones indicadas en secciones anteriores, los análisis de correlación y los

factores de enriquecimiento. Ambos elementos se encuentran en los antiguos relaves de la ciudad (CENMA, 2012).

Los componentes principales de las muestras de suelos se interpretaron como sigue:

- PC1: Este componente se relaciona a Al, Cr, Li, Mg, Ni y Ti con cargas factoriales sobre 0,79 y explica un 32% de la varianza total en las muestras de suelo. Debido a los análisis de correlación y los factores de enriquecimiento de estos elementos este componente principal fue identificado como el aporte natural a los suelos de la ciudad (De Gregori et al., 2003; Rueda-Holgado et al., 2016; Tasdemir et al., 2006). Se destaca también la gran magnitud de variabilidad explicada por este factor, que indica que más del 30% del material del suelo se relaciona a un origen natural.
- PC2: Este componente principal está altamente relacionado con el As, Hg, Pb y Zn, con cargas factoriales sobre 0,84 y una variabilidad explicada de 19,5%. Dada las altas correlaciones entre estos metales y del componente principal con el Hg se puede interpretar que este factor se relaciona a los relaves mineros de la minería del oro, donde la presencia de As, Pb y Zn son también a la vez considerables (CENMA, 2012).
- PC3: Este componente se relaciona a Ca, Co, Cu y Mn con cargas factoriales sobre 0,8; y explica un 20,9% de la varianza total de las muestras de suelo. Dada los análisis de correlación y la alta relación de este componente principal con el Cu, se identificó como el aporte de las emisiones de la fundición a los suelos de la ciudad. Este tipo de elementos se encuentran muy relacionados a emisiones de fundiciones de cobre (Ettler, 2015).
- PC4: Este componente se encuentra muy relacionado al Fe y el V con cargas factoriales de 0,78 y 0,91 respectivamente; explica un 10,4% de la varianza total de las muestras. Los análisis de correlación entre estos elementos sugieren que este componente principal está relacionado a las emisiones de tráfico y desgaste de materiales (Rueda-Holgado et al., 2016; Salmanighabeshi et al., 2015).

- PC5: Este componente principal se relaciona con el Na con un factor de carga de 0,96 y una varianza explicada de 6,8%. Dado que no tiene relación con otros metales este factor puede interpretarse tanto como un aporte natural, como el aporte de las prácticas de manejo en los suelos de la ciudad, irrigación y fertilización en parques urbanos o predios agrícolas (Cai et al., 2012; Molina et al., 2009; Xue et al., 2014).

Cabe destacar que el método de identificación de fuentes por medio de análisis de componentes principales, depende ampliamente del conjunto de datos utilizados. Esto se debe a que información con mucha variabilidad puede resultar en componentes principales muy variables (Comero et al., 2012), como es el caso de los datos de concentraciones heterogéneas en la ciudad de Copiapó. Este análisis es útil para una identificación preliminar de las principales fuentes que afectan a la ciudad.

3.7.2.3 Matriz de factorización positiva

Este modelo fue realizado para el conjunto de datos de concentraciones obtenidos de polvos de calles y suelos de la ciudad. En la Tabla 3-32 se indican los parámetros y desempeño de los modelos PMF utilizados y obtenidos para cada matriz sólida.

Tabla 3-32: Parámetros y calidad de modelación PMF para polvo de calles y suelos de Copiapó.

	Modelo polvo de calles	Modelo suelos
N° de muestras	71	40
N° elementos utilizados	10	12
Q teórico	305	272
Q modelo	311	273,7
Incertidumbre adicional (%)	10,5	8,3
N° factores utilizados	5	4
Valor FPEAK	0	-0,1
N° datos perdidos	0	0
N° datos bajo el LQ	0	0
N° bootstraps corridos	100	100
% bootstraps bien mapeados	97	84
N° de swap de factores	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Se destaca que dos muestras de suelo fueron descartadas para la modelación por considerarse casos excepcionales de enriquecimiento, por ejemplo la plaza Colipi un ex relave minero. De la misma forma, elementos que aportaban mucha inestabilidad y variabilidad a los resultados fueron descartados.

Las diferencias entre el valor de Q teórico y el modelado es menor a 2% en ambos casos. En pos de una mejor interpretación de los factores, en el modelo de suelos se realizó una rotación con FPEAK de -0,1. Por otro lado no se reportaron valores de concentración bajo los límites de cuantificación del equipo ni tampoco valores perdidos.

La relación de los *Boostraps* con la solución inicial respectiva, en ambos modelos es superior a 84%, lo que implica que no existen grandes grupos de muestras que influyan en la solución final (Reff et al., 2007). Por otro lado el *Displacement* de las soluciones no resultó en ningún intercambio de factores o swaps, se consideraron ambas soluciones de los modelos como estables (Brown, Eberly, Paatero, & Norris, 2015; EPA, 2014; Reff et al., 2007).

La Figura 3-59 indica los perfiles químicos de los factores identificados en el modelo de polvo de calles y la Figura 3-60 para el modelo de suelos de la ciudad.

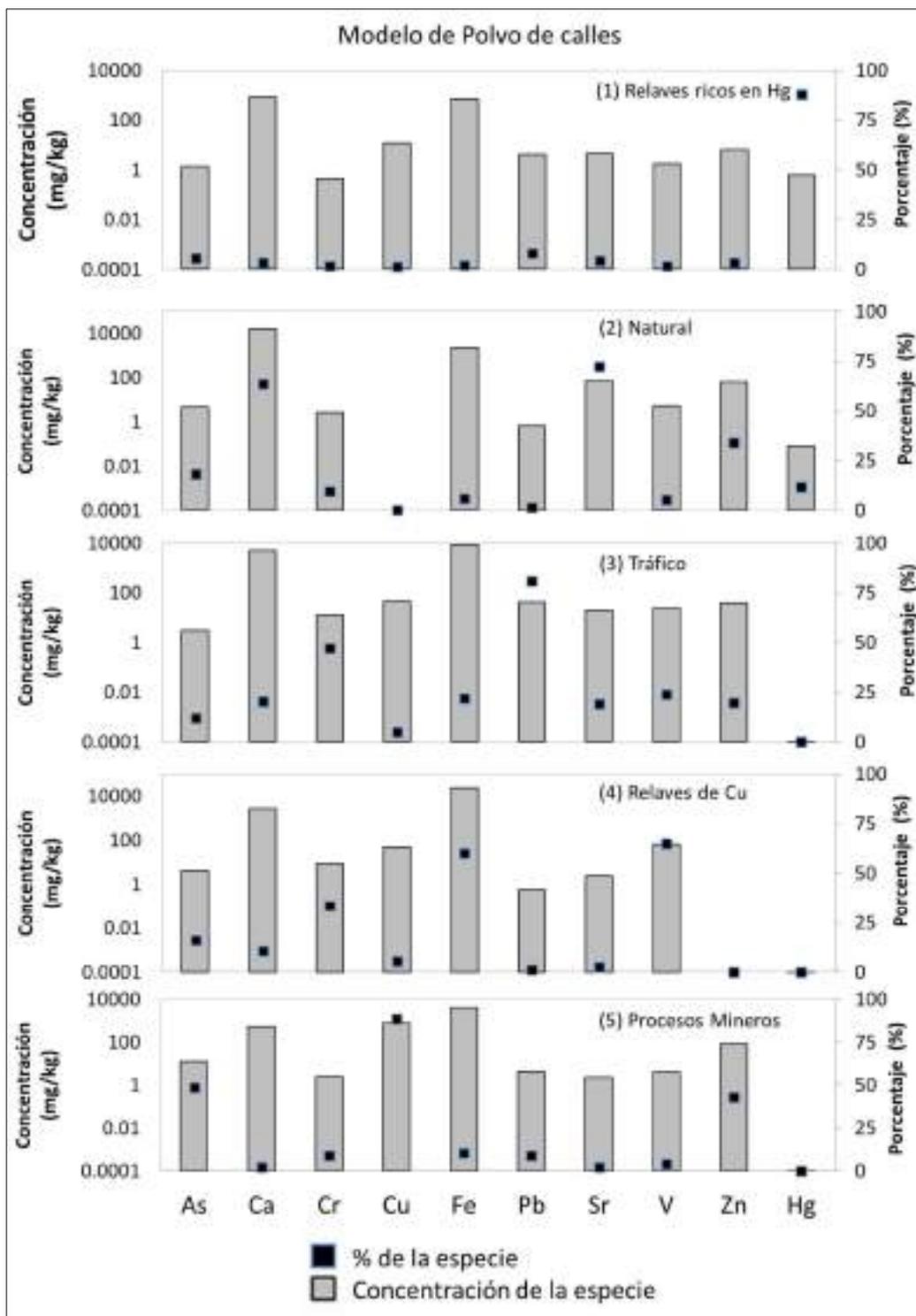


Figura 3-59: Perfil químico de los factores en modelo PMF para polvos de calles. Se destaca en el modelo de polvo de calles el efecto de los relaves ricos en mercurio que aportan la mayor parte del total de Hg, como también el aporte natural que aporta parte del As y Hg de las muestras. Fuente: Elaboración propia.

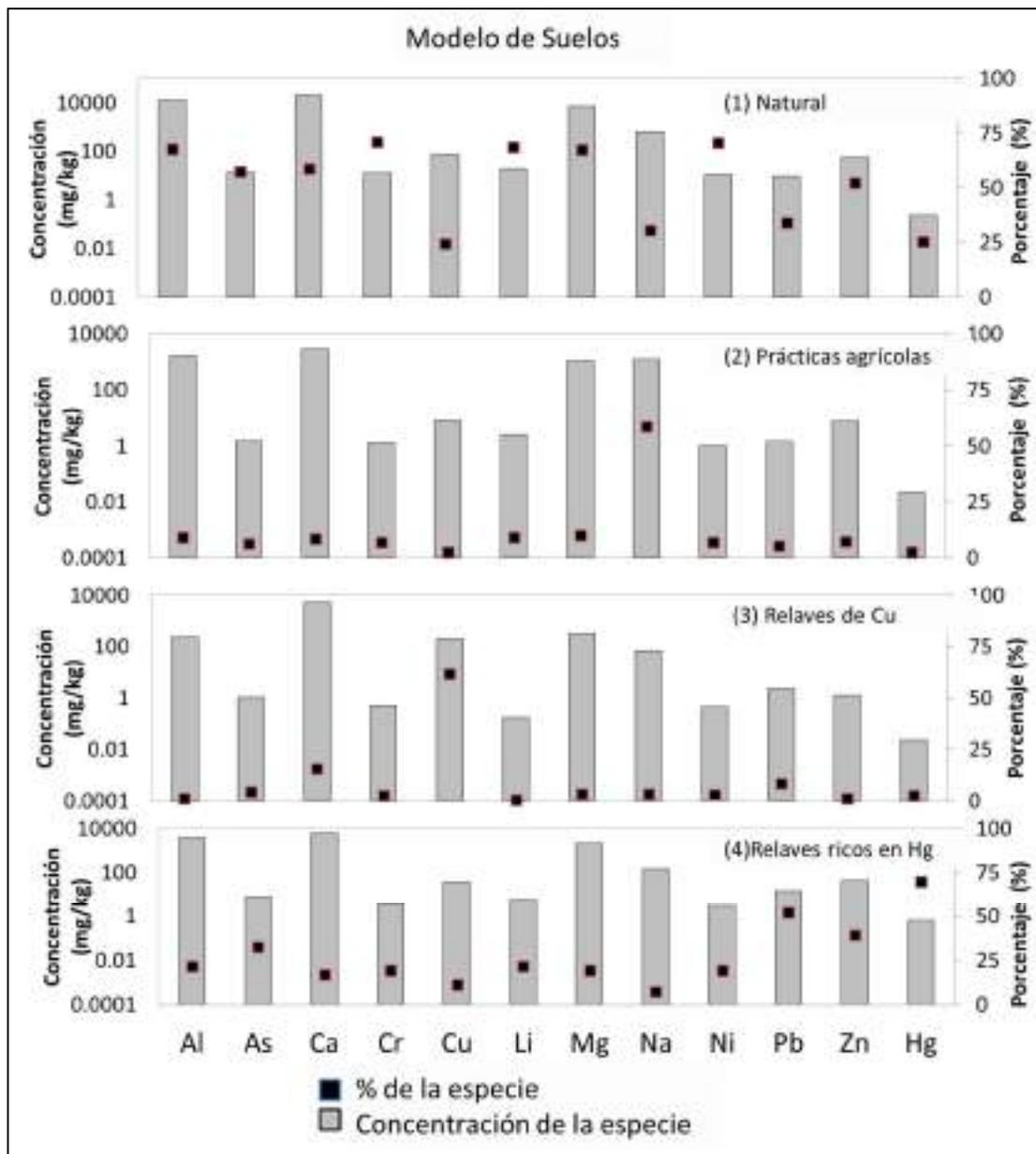


Figura 3-60: Perfil químico de los factores en modelo PMF para suelos. Se destaca en el modelo de suelos, el factor relaves ricos en Hg que aportan la mayor parte del Hg a los suelos y el factor relaves de Cu que aportan el este metal a los suelos. Fuente: Elaboración propia.

El modelo PMF utiliza las concentraciones en las muestras para otorgar un perfil químico a los distintos factores, optimizando la explicación completa de las concentraciones en las muestras. Dependiendo del perfil químico del factor, una contribución baja puede corresponder a una alta concentración en la muestra como también una contribución baja no implica bajas concentraciones, es dependiente del perfil químico otorgado a cada factor.

En el modelo de polvos de calles los factores fueron identificados de la siguiente manera:

- **Factor 1:** Este factor contribuye con el 88,2% del Hg en polvos de calles, el 8,5% del Pb y el 5,4% del As (Figura 3-59). Fue identificado como la contribución de los relaves ricos en Hg a las muestras, estos se encuentran ubicados en las zonas agrícolas y cercanos al centro de la ciudad (CENMA, 2012). Por otra parte, los FE de Hg sugieren un alto enriquecimiento de este metal en toda la ciudad, al menos un 24% de las muestras se encuentran con algún nivel de enriquecimiento; también el alto enriquecimiento de la fracción fina apoya el aporte de fuentes antropogénicas a los polvos de calles. Además como se observa en la Figura 3-61 las mayores contribuciones de este factor se encuentran cercano a los relaves de la ciudad. Cabe destacar que esta fuente aporta a gran parte de la ciudad, sugiriendo un enriquecimiento generalizado por parte de los antiguos relaves. La falta de caracterización de todos los relaves de la ciudad podría entregar un esclarecimiento del origen del Hg en la ciudad. Cabe destacar también que el enriquecimiento en Hg no es originado en las emisiones de la fundición de cobre, debido a que las muestras *background* enriquecidas no poseen valores altos de Hg, bajo la suposición de una dispersión regional de las emisiones.

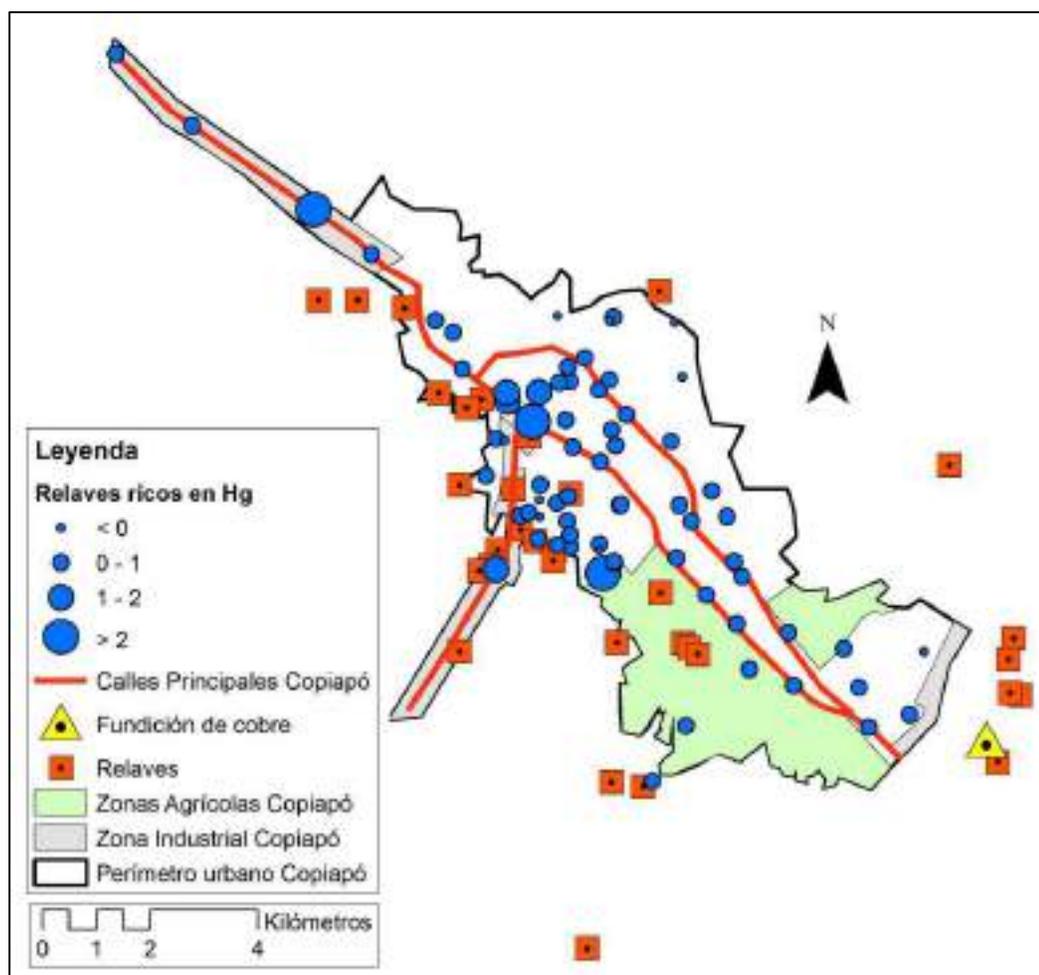


Figura 3-61: Mapa de contribución del Factor Relaves ricos en Hg a muestras de polvos de calles. Se destacan los altos aportes en sectores cercanos a relaves, como también los aportes de menor magnitud homogéneamente en toda la ciudad. Fuente: Elaboración propia.

- **Factor 2:** Este factor contribuye con el 63,5% del Ca, 72,2% del Sr, 34% del Zn, 11,8% del As y 11,8% del Hg (Figura 3-59). Fue identificado como el aporte natural a las muestras de polvo. La presencia de elementos como el Ca y el Sr (Chow, Lowenthal, Chen, Wang, & Watson, 2015), como también aportes bajos de As, Hg y Zn, correspondientes a las concentraciones en las muestras *background*, prueban que el origen de este factor se encuentra en los suelos *background* o naturales alrededor de la ciudad. Además, la distribución homogénea de los aportes de este factor a las muestras de polvo

en la ciudad, sugieren una contribución similar a todas las muestras, es decir una fuente ubicua en toda la ciudad (Figura 3-62).

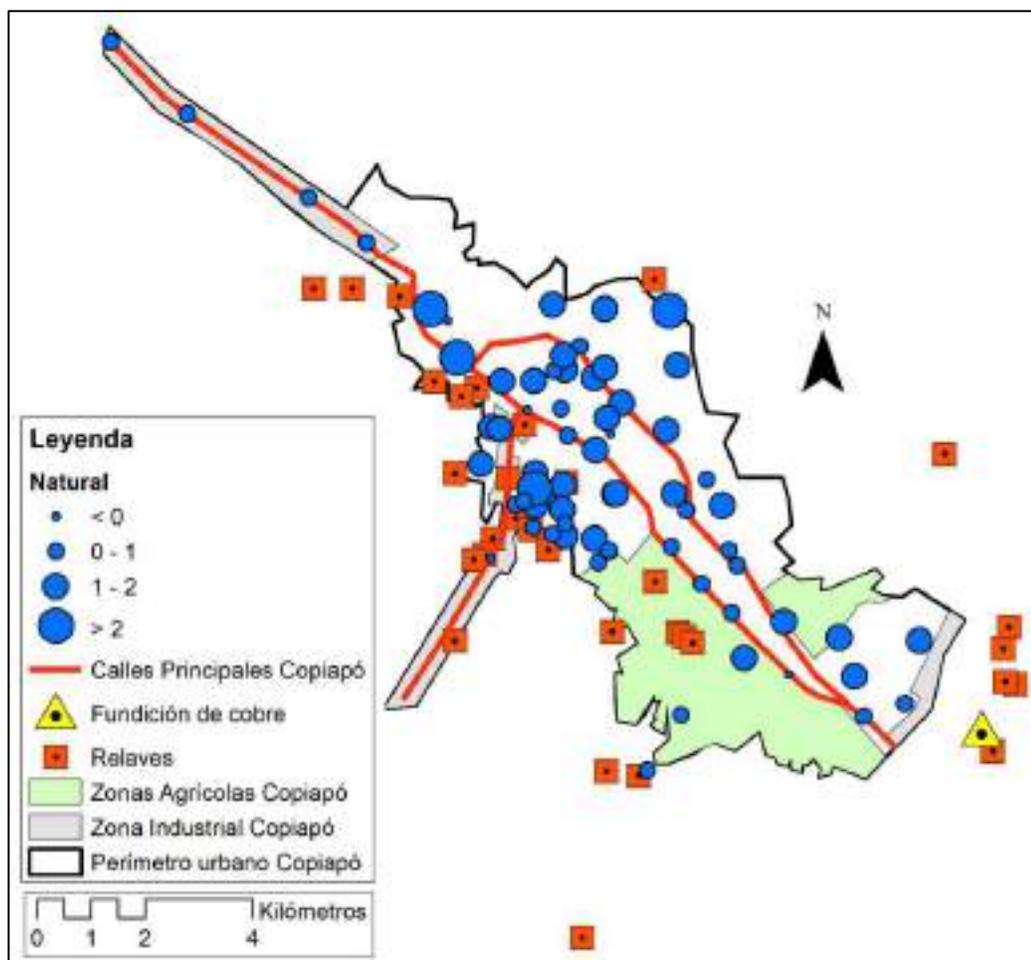


Figura 3-62: Mapa de contribución del Factor Natural a muestras de polvos de calles. El aporte homogéneo de los suelos naturales a la ciudad se observa al no identificar ningún tipo de distribución en los mapas. Fuente: Elaboración propia.

- **Factor 3:** Este factor contribuye con el 80,7% del Pb, 46,9% del Cr y cerca del 20% de Ca, Fe, V y Zn (Figura 3-59). La presencia de Cr, Pb, V y Zn en este factor sugieren que está altamente relacionado a las emisiones del tráfico y el desgaste de frenos (Ayrault, Senhou, Moskura, & Gaudry, 2010; Meza-Figueroa et al., 2009; Sternbeck et al., 2002; Viana et al., 2008). La Figura 3-63 indica que la contribución de este factor se encuentra concentrada en el centro de la ciudad, como también en las vías principales de

la ciudad (Avenida Copayapu, Antigua Ruta 5); lugares con alta densidad de tráfico, que confirma la identificación de una fuente de contaminación proveniente de vehículos.

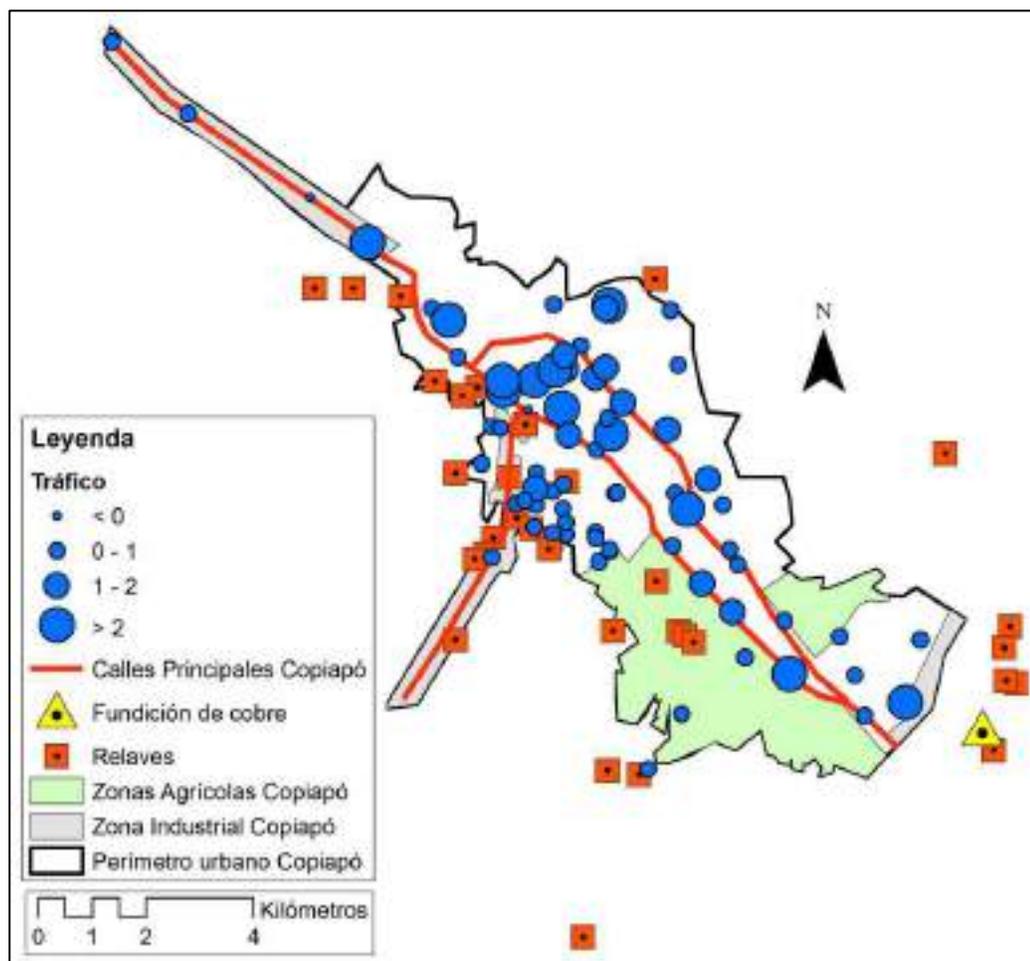


Figura 3-63: Mapa de contribución del Factor Tráfico a muestras de polvos de calles. La distribución espacial de las contribuciones del tráfico se concentran en las vías principales y la zona centro de Copiapó. Fuente: Elaboración propia.

- **Factor 4:** Este factor contribuye con el 64,8% de V; 60,2% de Fe; 33,3% de Cr, 16% de As, 10,6% de Ca y 5,4% de Cu (Figura 3-59). Todos estos elementos se explican en la presencia de relaves de la minería del cobre en la ciudad, estos residuos mineros son ricos en Fe, Cu y As como se analizó en las secciones anteriores y en estudios previos (Carkovic et al., 2016; CENMA, 2012). Por otra parte los análisis de XRD apoyan la identificación del efecto de los relaves en la ciudad, mediante la detección de fases

cristalinas propias de relaves en las muestras de polvo (magnetita, pirita y nantokita). La Figura 3-64 indica la distribución espacial de las contribuciones de este factor, mostrando que las muestras de polvo cercanas a relaves o en las direcciones del viento se encuentran con más contribución de este factor. Esto se observa principalmente en el sector sur y agrícola de la ciudad.

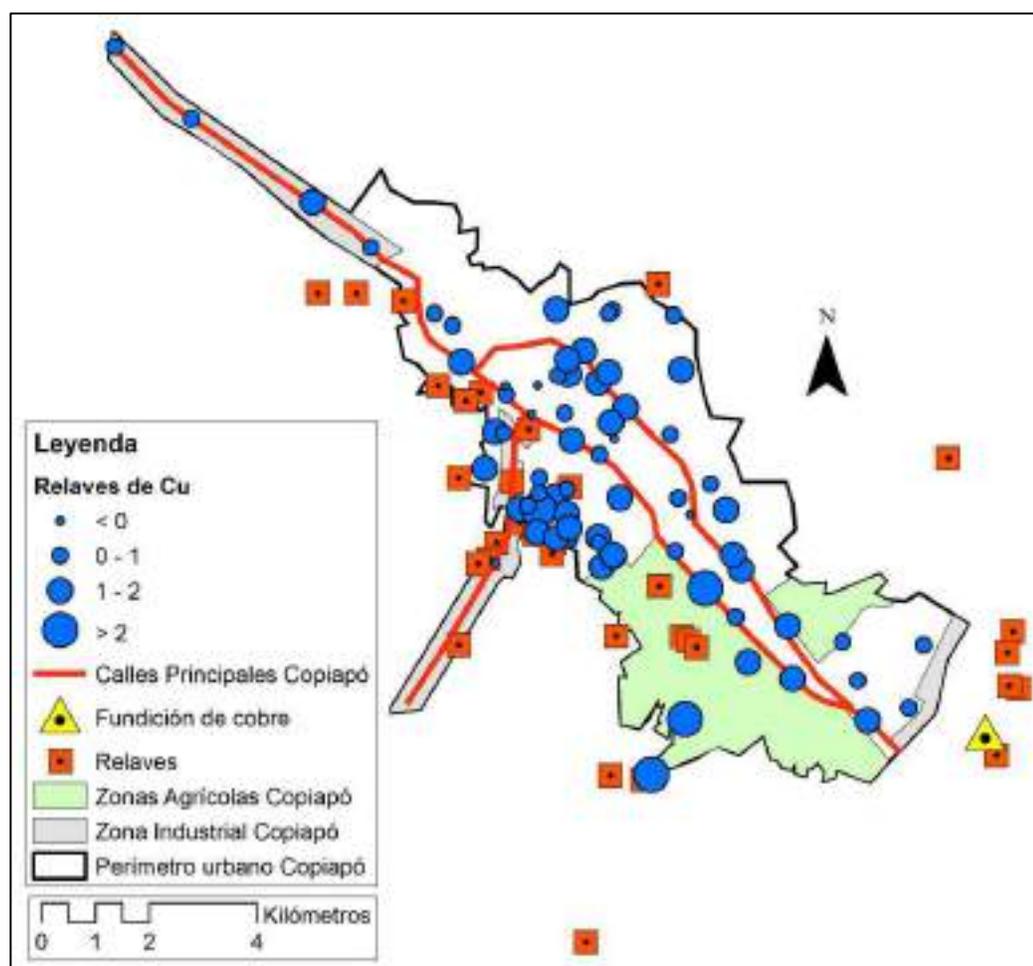


Figura 3-64: Mapa de contribución del Factor Relaves de Cu a muestras de polvos de calles. Las contribuciones de los relaves de Cu se concentran en las zonas cercanas a relaves, como también los sectores ubicados en las direcciones de viento principales desde los relaves. Fuente: Elaboración propia.

- **Factor 5:** Este factor contribuye con el 88,4% del Cu, 48,5% del As, 42,9% del Zn y 8,7% del Pb (Figura 3-59). Este factor fue identificado como la contribución de todos

los procesos mineros en los alrededores de la ciudad a las muestras de polvo, incluida la fundición de cobre. El As, Cu, Pb y Zn son metales altamente relacionados a fundiciones de cobre y la industria de la minería (De Gregori et al., 2003; Hedberg et al., 2005; Parra, Bravo, Quiroz, Moreno, Karanasiou, Font, Vidal, & Cereceda, 2014; Salmanighabeshi et al., 2015). Por otro lado la presencia de partículas esféricas en las muestras de polvo de calle, prueba el efecto de las emisiones de la fundición en la ciudad. La Figura 3-65 indica que existen grandes contribuciones en las zonas industriales y mineras de la ciudad, en el sur este y sur oeste de la ciudad. Por otro lado existe contribución de este factor a lo largo de toda la ciudad lo que se relaciona a la deposición atmosférica de las emisiones de la fundición. Las muestras *background* enriquecidas encontradas en este estudio y otros previos (Gidhagen et al., 2002), sugieren que el efecto de la fundición no solo se extiende por la ciudad sino que también por toda la región.

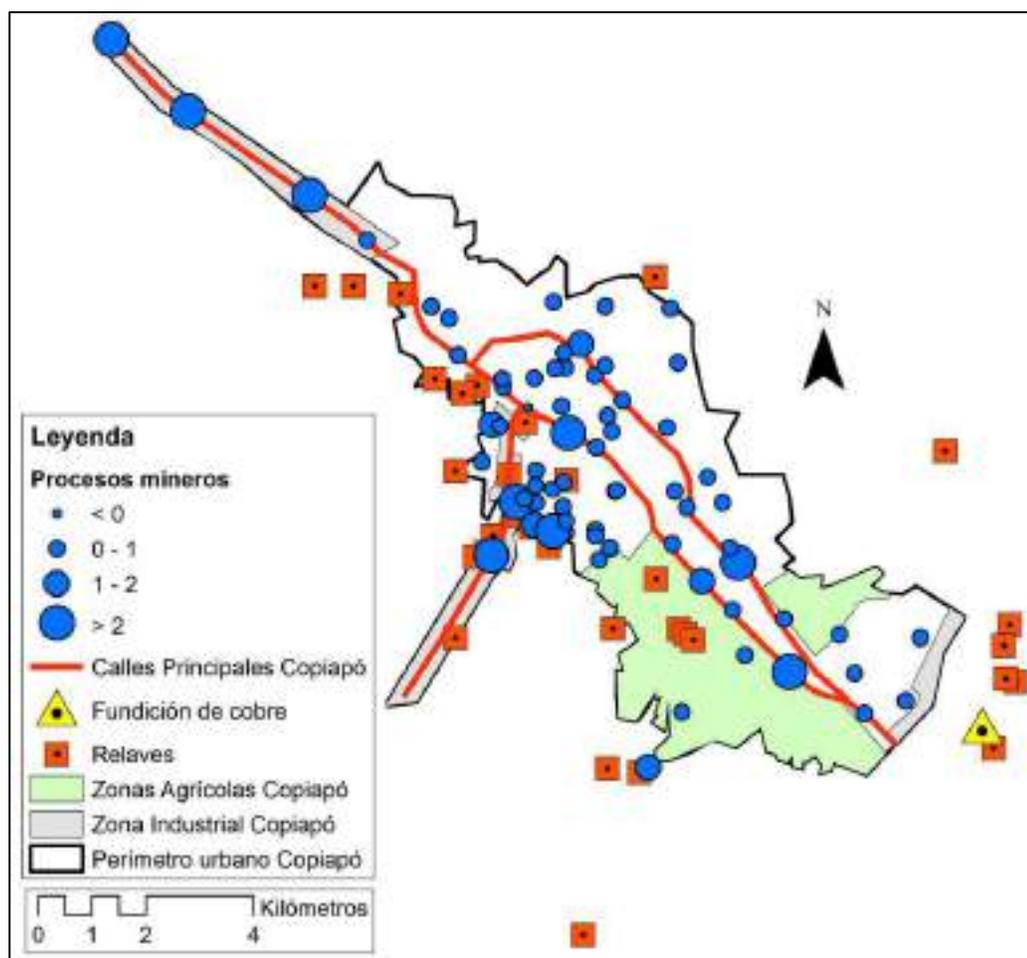


Figura 3-65: Mapa de contribución del Factor Procesos Mineros a muestras de polvos de calles. Las contribuciones de los procesos mineros se concentran en las zonas industriales y mineras de la ciudad. Fuente: Elaboración propia.

En el modelo de suelos los factores fueron identificados de la siguiente manera:

- **Factor 1:** Este factor contribuye con sobre el 52% del Al, As, Ca, Cr, Li, Mg, Ni y Zn (Figura 3-60). Fue identificado como la contribución natural a los suelos de la ciudad, al igual que en el modelo de polvos de calles, con la diferencia que este factor explica gran parte del As total, debido principalmente a que el enriquecimiento en As es más bajo en los suelos de la ciudad con respecto a los polvos de calles. También el enriquecimiento de los suelos naturales por las emisiones de la fundición de cobre que funciona desde el año 1952, pueden explicar el alto contenido de As en el aporte natural de la zona. Los FE de

Al, Cr, Li, Mg, Ni y Zn se categorizaron como enriquecimiento mínimo o moderado, indicando también que la principal fuente de estos elementos proviene de origen natural. Además la Figura 3-66 muestra que la contribución de este factor está distribuida homogéneamente en todas las muestras.

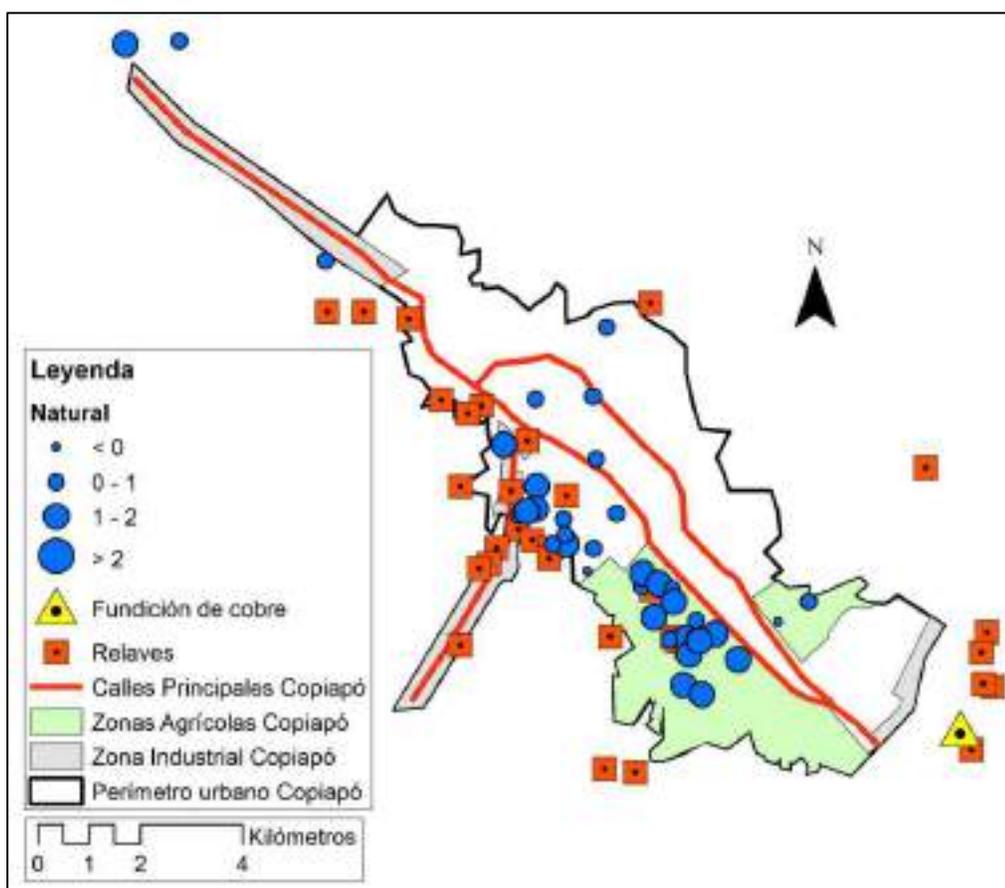


Figura 3-66: Mapa de contribución del Factor Natural a muestras de suelos. Las contribuciones del factor natural son homogéneas en toda la ciudad, aumentando levemente en la zona agrícola.
Fuente: Elaboración propia.

- **Factor 2:** Este factor contribuye con 58,8% del Na y 10,1% del Mg (Figura 3-60). Fue identificado como la contribución de las prácticas agrícolas a los suelos de la ciudad, por medio de la fertilización e irrigación (Cai et al., 2012; Molina et al., 2009; Xue et al., 2014). La Figura 3-67 muestra que la contribución de este factor se concentra en la parte

sur de la ciudad, que puede atribuirse a las prácticas agrícolas como también a la mantención de parques urbanos.

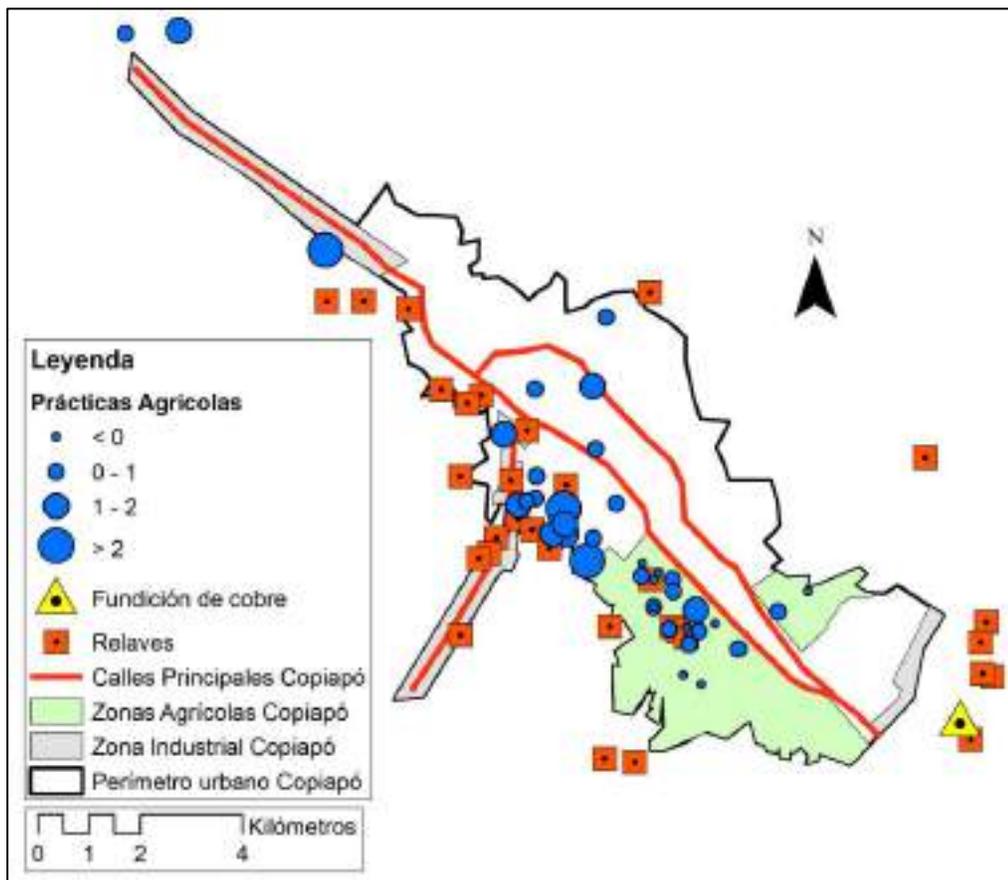


Figura 3-67: Mapa de contribución del Factor Prácticas Agrícolas a muestras de suelos. Las contribuciones de esta fuente son mayores en zonas de parques urbanos, debido a las prácticas de mantención y fertilización de las plazas Fuente: Elaboración propia.

- **Factor 3:** Este factor contribuye con el 61,8% del Cu; 8,6% del Pb y 15,8% del Ca (Figura 3-60), elementos asociados con la minería actual y los relaves en la zona (Carkovic et al., 2016; CENMA, 2012; Gidhagen et al., 2002; Hedberg et al., 2005; Parra, Bravo, Quiroz, Moreno, Karanasiou, Font, Vidal, & Cereceda, 2014). La Figura 3-68 indica que la contribución de este factor se concentra en sectores cercanos a relaves mineros. Por otro lado la identificación de pirita y nantokita mediante el uso de XRD en

las muestras de suelos, como también los FE de Cu y Pb, sugieren una alta contribución de los relaves a los suelos cercanos.

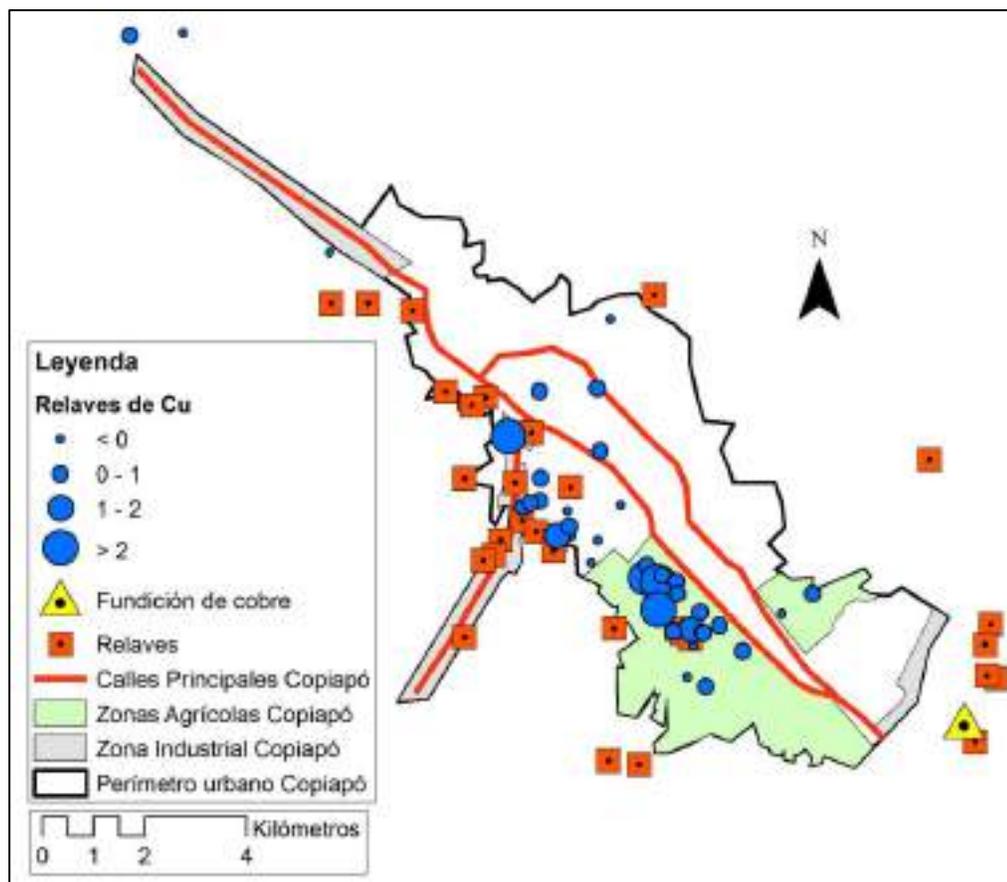


Figura 3-68: Mapa de contribución del Factor Relaves de Cu a muestras de suelos. Las contribuciones de los relaves de Cu en los suelos, son mayores en los sectores cercanos a estos residuos mineros. Fuente: Elaboración propia.

- **Factor 4:** Este factor contribuye el 69,7% del Hg; 52,3% del Pb; 39,5% del Zn y 32,3% del As (Figura 3-60). Al igual que en el modelo de polvo de calles, este factor fue identificado como el efecto de los relaves ricos en Hg a la matriz de suelo. Los FE de Hg en suelos indican altos enriquecimientos de este metal en toda el área de la ciudad, sugiriendo un amplio efecto de los relaves a través de toda la ciudad. Por otro lado la Figura 3-69 muestra que la contribución de este factor se concentra en las áreas cercanas a relaves mineros.

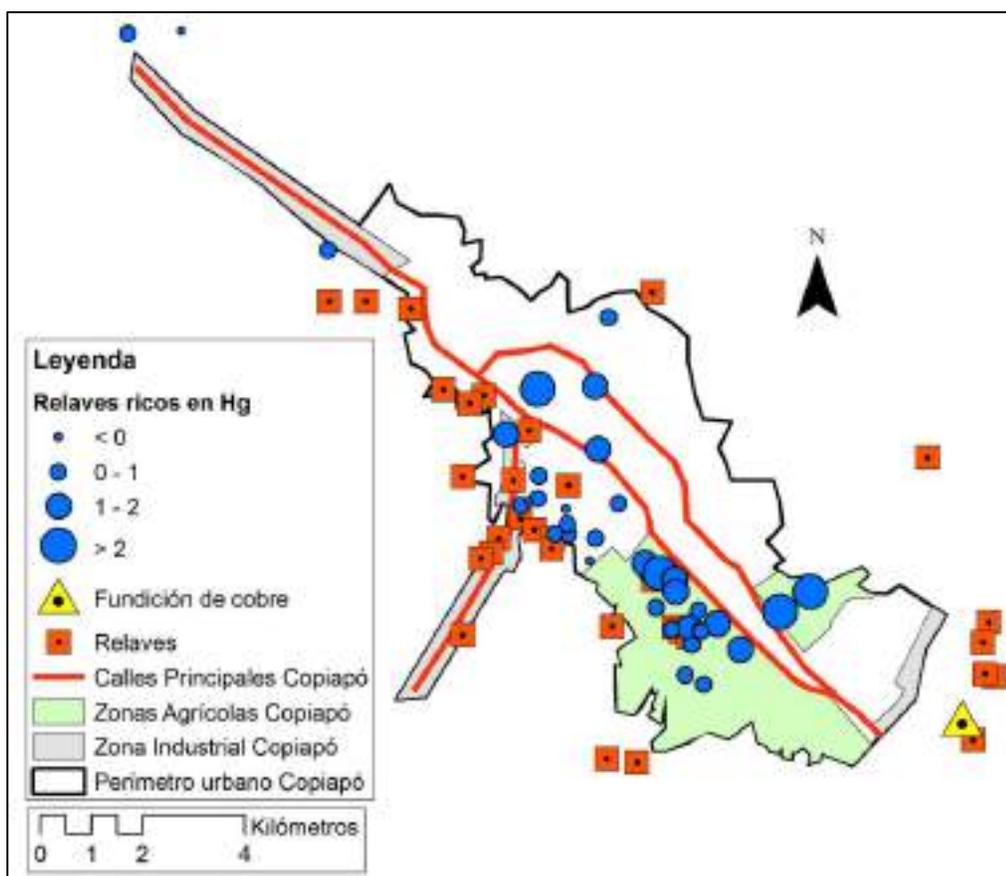


Figura 3-69: Mapa de contribución del Factor Relaves ricos en Hg a muestras de suelos. Las contribuciones de los relaves ricos en Hg se centran en las zonas cercanas al relave Ojancos como también las zonas agrícolas cercanas a relaves. Fuente: Elaboración propia.

La contribución de la fuente natural, relaves ricos en Hg y relaves de la minería de cobre fueron identificados en ambos modelos. La fuente agrícola fue identificada solo en el modelo de suelos, coincidente con las prácticas de mantención que se realizan en parques urbanos y cultivos. El tráfico se identificó solo en el modelo de polvo de calles, que es la matriz sólida afectada directamente por las emisiones de los vehículos y el material proveniente del desgaste de material (neumáticos y frenos). La contribución de los procesos mineros solo fue detectada en la matriz de polvo de calles, a pesar que se identificaron partículas esféricas en suelos y polvos de la ciudad. Como se observó en ambos modelos tanto la minería antigua como la actual y sus procesos asociados, afectan a ambas matrices sólidas urbanas convirtiéndose en las principales fuentes de contaminación de la ciudad.

3.8 Zonificación de la ciudad según aporte de fuentes

3.8.1 Relaves y grupos socioeconómicos

A partir de la información sobre los grupos socioeconómicos predominantes en la ciudad de Copiapó, realizado por la fundación Un Techo para Chile en 2014, se identificó la ubicación de los relaves dentro de la ciudad y su relación con los grupos socioeconómicos existentes.

Tabla 3-33: Número de relaves en cada sector según grupo socioeconómico predominante

Grupo socioeconómico predominante	Nº Relaves
ABC1	0
C2	0
C3	0
D	8
E	6

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3-33 se observa que de los 28 relaves ubicados en el sector urbano y periurbano de la ciudad, 8 se ubican en sectores con grupo socioeconómico predominante D y 6 relaves en grupo E, los dos estratos socioeconómicos con menor ingreso monetario. De la misma forma esto se explica debido a que los terrenos a las afueras de la ciudad son de menor valor y de más fácil acceso para la gente de menor ingreso monetario, a cambio de exponerse también al contacto directo con tranques de relave abandonados. En la Figura 3-70 se observan los 14 relaves ubicados en los sectores de mayor pobreza de la ciudad. Por último cabe resaltar que algunos terrenos clasificados como de altos o bajos ingresos pueden tener valores distintos a los reales, ya que muchos predios agrícolas son arrendados a personas de menor ingreso monetario para el cultivo y explotación agrícola.

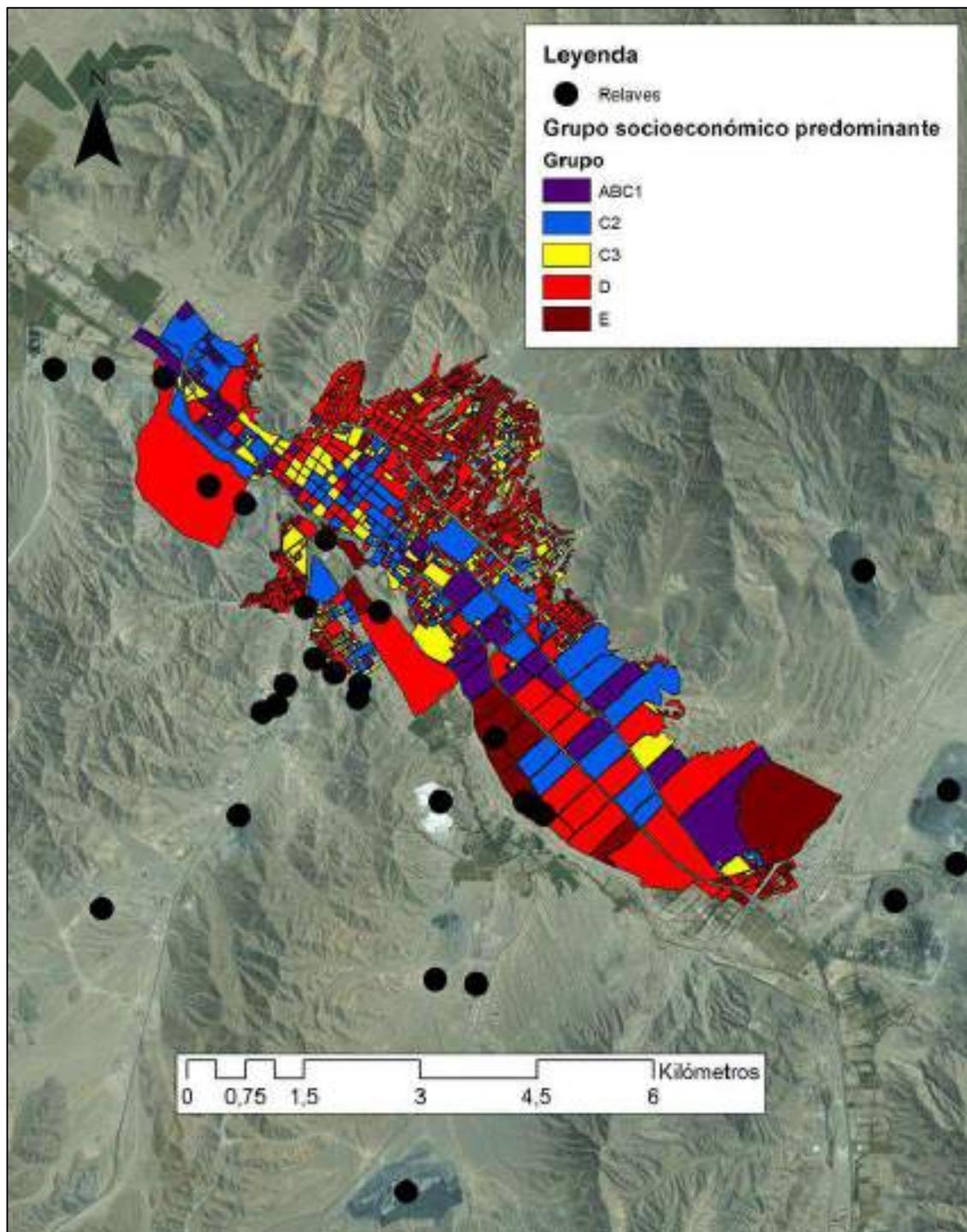


Figura 3-70: Relaves y grupos socioeconómicos predominantes en Copiapó. Se observa que los relaves mineros se ubican predominantemente en grupos de sectores socioeconómicos D y E. Fuente: Elaboración propia en base a Centro de Investigación Social de TECHO Chile, 2014.

3.8.2 Grupos socioeconómicos y enriquecimiento de metales

Dada la amplia distribución espacial de las muestras de polvo de calle por toda la ciudad, se utilizarán éstas para caracterizar las zonas enriquecidas y las que reciben contribución de las fuentes cercanas. En la Tabla 3-34 se indica el factor de enriquecimiento promedio para cada elemento según grupo socioeconómico predominante. Se observa que el FE de Hg y Pb son elevados sin importar el sector socioeconómico en estudio, es decir, existe un enriquecimiento generalizado de estos metales en los polvos de calles de la ciudad. El Co, Cu y Zn poseen en promedio mayor enriquecimiento en los grupos E y D, estos metales también poseen valores de enriquecimiento máximo más elevados que los otros grupos socioeconómicos. Esta situación se atribuye a la presencia de relaves en los sectores con menor ingreso económico como se demostró en la sección 2.8.1. Por último, el As, Cr, Fe, Mn, Ni, P, Ti y V no presentan altos enriquecimientos ni distribución alguna entre los grupos socioeconómicos.

Tabla 3-34: Factor de enriquecimiento medio en sectores según grupo socioeconómico predominante.

FE Elemento	Grupo socioeconómico				
	ABC1	C2	C3	E	D
FE As	1,6 ± 0,2 (1-2,3)	1,6 ± 0,3 (1-2,3)	1,6 ± 0,3 (1,1-2,3)	1,7 ± 0,2 (1,1-5)	1,7 ± 0,3 (1-5)
FE Co	1,7 ± 0,4 (1-3,5)	1,7 ± 0,3 (1,1-3,5)	1,6 ± 0,4 (1,1-4,2)	1,8 ± 0,5 (1,1-5)	1,9 ± 0,6 (1,1-4,8)
FE Cr	2,2 ± 0,3 (1,5-2,9)	2,3 ± 0,3 (1,5-2,9)	2,3 ± 0,3 (1,4-2,9)	2,2 ± 0,2 (1,6-2,8)	2,3 ± 0,3 (1,5-2,9)
FE Cu	7,9 ± 3,8 (2-13,6)	6,6 ± 2,8 (2-13,7)	5,3 ± 2,8 (2,1-13,6)	9,7 ± 3,5 (2,2-23,7)	7 ± 4 (2-23,7)
FE Fe	1,9 ± 0,2 (1,4-2,3)	1,9 ± 0,2 (1,4-2,4)	1,8 ± 0,2 (1,4-2,3)	2 ± 0,2 (1,5-2,5)	1,9 ± 0,2 (1,4-2,9)
FE Hg	7,3 ± 9,3 (2,3-32,2)	10,7 ± 11,8 (2-34,1)	12,9 ± 13,5 (1,9-34,1)	6,3 ± 7,7 (2-32,2)	10,9 ± 12,6 (1,9-34,2)
FE Mn	1,1 ± 0,1 (0,9-1,2)	1 ± 0 (0,9-1,2)	1,1 ± 0 (0,9-1,2)	1,1 ± 0 (0,9-1,2)	1,1 ± 0 (0,9-1,5)
FE Ni	1,7 ± 0,6 (1,1-4,6)	1,7 ± 0,6 (1-4,5)	1,5 ± 0,3 (1,1-3,1)	1,4 ± 0,3 (0,9-4)	1,7 ± 0,5 (1-4,1)
FE P	3 ± 2,2 (1,6-8,5)	3,4 ± 2,3 (1,6-8,5)	3,8 ± 2,1 (1,7-8,6)	2,1 ± 1 (1,6-8,3)	3,5 ± 2 (1,6-8,5)
FE Pb	5,9 ± 2,1 (1,8-11,4)	6,6 ± 2,2 (2,1-11,2)	6,7 ± 2,6 (1,8-11,4)	5,1 ± 1,2 (2,4-10,8)	6,5 ± 2,4 (1,8-11,4)
FE Ti	1 ± 0 (1-1,1)	1 ± 0 (1-1,2)	1,1 ± 0 (1-1,2)	1 ± 0 (1-1,2)	1,1 ± 0 (1-1,2)
FE V	1,6 ± 0,1 (1,2-1,9)	1,6 ± 0,1 (1,2-2)	1,5 ± 0,1 (1,2-1,9)	1,7 ± 0,1 (1,2-2,1)	1,6 ± 0,1 (1,2-2,1)
FE Zn	2,1 ± 0,4 (1,2-3,2)	2,2 ± 0,5 (1,4-3,2)	2,3 ± 0,4 (1,3-3,2)	2,1 ± 0,4 (1,2-4,5)	2,3 ± 0,4 (1,3-4,5)

*Datos se presentan en el formato: Media ± Desviación estándar (Mínimo – Máximo)

Fuente: Elaboración propia.

3.8.3 Grupos socioeconómicos y contribución de fuentes

Se analizó la contribución de cada fuente identificada en el modelo PMF de polvos según el grupo socioeconómico predominante de la zona afectada. En la Tabla 3-35 se indican el aporte promedio a cada sector de cada una de las fuentes. Se puede observar que la fuente Relaves de Cu aporta de manera similar a todos los grupos económicos de la ciudad. En el caso de los Relaves ricos en Hg, poseen un mayor aporte promedio en los C2, C3 y D, pero los máximos aportes de esta fuente afectan a todos los grupos por igual. En cuanto a la fuente Tráfico aporta de manera similar a todos los grupos al igual que la fuente Natural. Por último, la fuente de Procesos Mineros aporta en promedio más a los grupos de menor ingreso económico, pero también los aportes máximos de esta fuente se concentran en estas zonas.

Tabla 3-35: Contribución media de cada fuente en sectores según grupo socioeconómico predominante.

Fuente aportante	Grupo Socioeconómico				
	ABC1	C2	C3	E	D
Relaves Cu	1 ± 0,2 (0,5 - 1,3)	0,9 ± 0,2 (0,5 - 1,4)	0,8 ± 0,1 (0,5 - 1,3)	1,1 ± 0,1 (0,5 - 1,5)	0,9 ± 0,2 (0,5 - 1,5)
Relaves Hg	0,8 ± 1,2 (0,1 - 4,1)	1,3 ± 1,5 (0,1 - 4,3)	1,5 ± 1,7 (0,1 - 4,3)	0,7 ± 1 (0,1 - 4,1)	1,3 ± 1,6 (0,1 - 4,3)
Tráfico	1 ± 0,3 (0,3 - 1,8)	1,1 ± 0,3 (0,3 - 1,8)	1,2 ± 0,4 (0,3 - 1,8)	0,8 ± 0,2 (0,3 - 1,9)	1,1 ± 0,4 (0,3 - 1,9)
Natural	0,9 ± 0,1 (0,7 - 1,1)	0,9 ± 0,1 (0,6 - 1,3)	1 ± 0,1 (0,7 - 1,3)	0,8 ± 0,1 (0,6 - 1,3)	0,9 ± 0,1 (0,6 - 1,4)
Procesos Mineros	0,6 ± 0,2 (0,1 - 1)	0,5 ± 0,2 (0,1 - 1)	0,4 ± 0,2 (0,1 - 1)	0,7 ± 0,2 (0,1 - 2,8)	0,5 ± 0,2 (0,1 - 2,8)

*Datos se presentan en el formato: Media ± Desviación estándar (Mínimo – Máximo)

Fuente: Elaboración propia.

3.8.3.1 Zonas de la ciudad según contribución de fuentes

La Figura 3-71, Figura 3-72, Figura 3-73, Figura 3-74 y Figura 3-75 muestran los aportes que realizan cada una de las fuentes identificadas en la ciudad con el modelo PMF para polvos de calles. Se establecieron niveles de aportes cualitativos, aporte muy bajo ($<0,5$), aporte bajo ($0,5 - 1$), aporte medio ($1 - 2$), aporte alto ($2 - 3$) y aporte muy alto (>3). En la Figura 3-71 se observa que el aporte de la fuente Natural es homogéneo en toda la ciudad y varía entre aportes bajos y medios, cabe destacar que este aporte se basa en las muestras de polvos de calles, por lo que la zona agrícola de la ciudad posee una menor densidad de calles, menor número de muestras y menor contribución de la fuente.

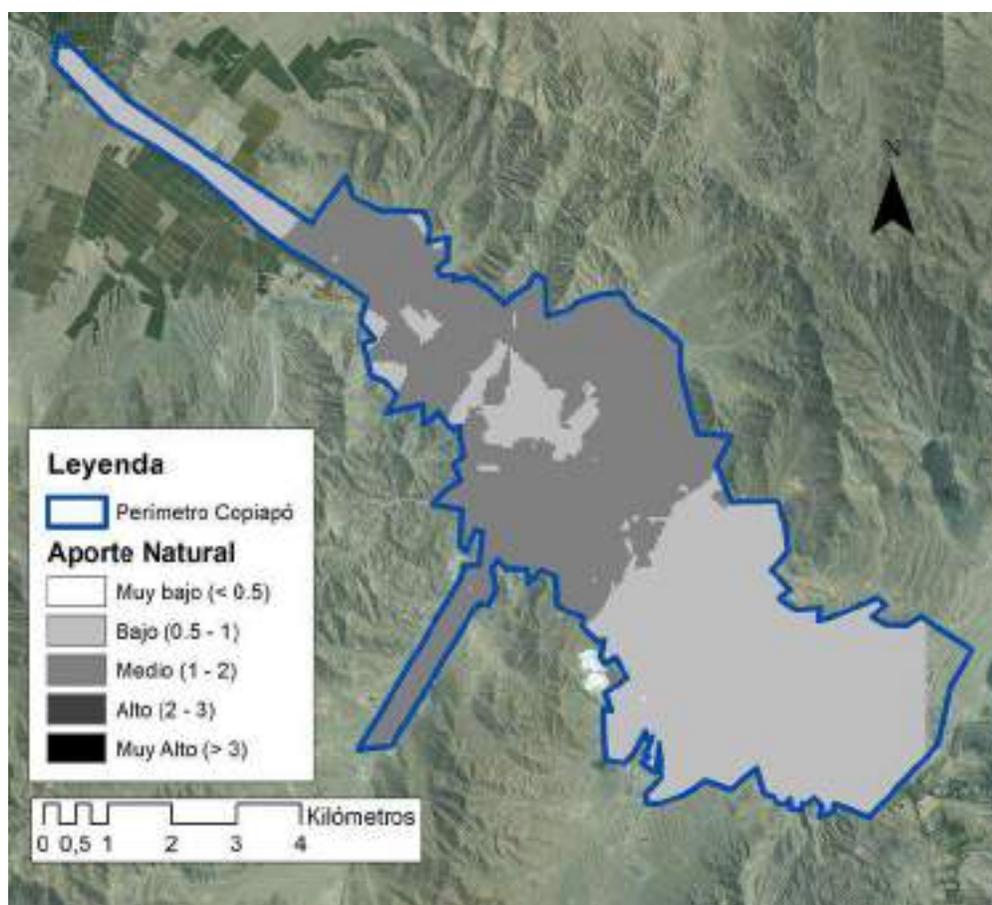


Figura 3-71: Zonas de la ciudad según nivel de aporte de la fuente Natural. Se observa que el aporte natural en la ciudad es bajo o medio, y homogéneo en la zona urbana. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3-72, se indica el aporte de la fuente relacionada a los Procesos Mineros. Se puede observar que existen tres zonas con aportes altos y medios, primero el noroeste de la ciudad en donde se concentran numerosas empresas industriales. Segundo el suroeste en donde se concentran gran cantidad de la actividad minera de la ciudad y por último el sector sureste cercano a la fundición de cobre Paipote.

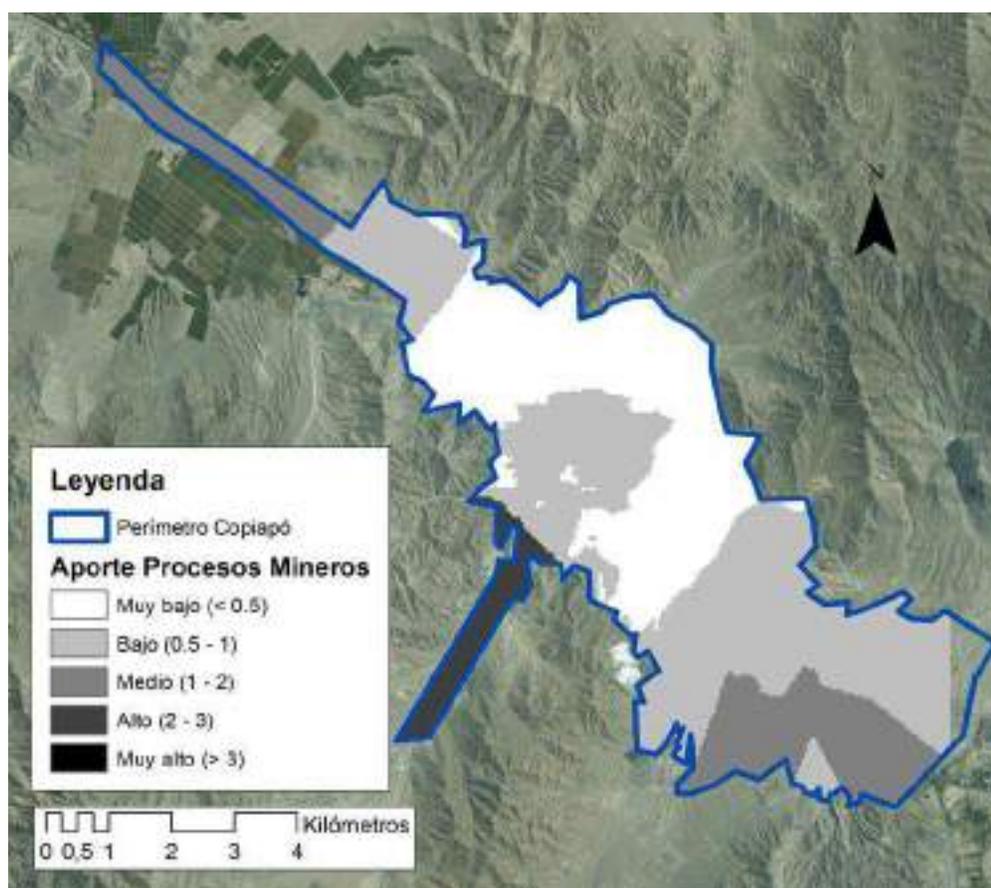


Figura 3-72: Zonas de la ciudad según nivel de aporte de la fuente Procesos Mineros. Los procesos mineros poseen altos aportes en la zona industrial y cercana a la fundición de cobre. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3-73 se observa que el aporte de los relaves de cobre se concentra principalmente en la zona agrícola y sur de la ciudad, lugar donde se concentra gran parte de los relaves en estudio. Por otro lado el resto de la ciudad recibe aportes bajos, pero esto indica que posiblemente toda la ciudad se encuentre bajo el efecto del material de relave.

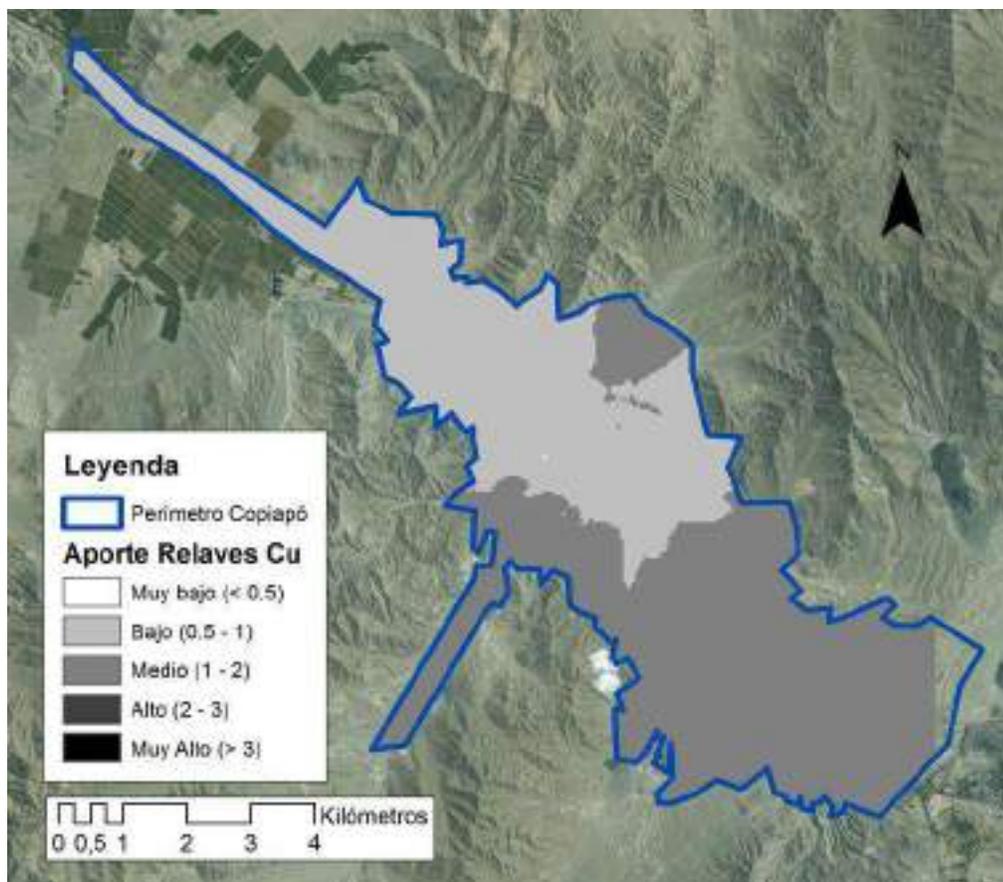


Figura 3-73: Zonas de la ciudad según nivel de aporte de la fuente Relaves de Cu. Los relaves poseen aportes bajos o medios en los sectores de mayor concentración de relaves. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3-74 se indica el aporte de los Relaves ricos en Hg. Se observa un área de la ciudad, cercana al centro, en que existe un alto aporte de esta fuente. Esta situación coincide con la presencia del relave Ojancos que posee material con altos valores de Hg. Por otro lado en la zona agrícola de la ciudad se observa un sector con aporte bajo, debido a la existencia de relaves con Hg en esa zona, como los relaves Santa Blanca y Porvenir.

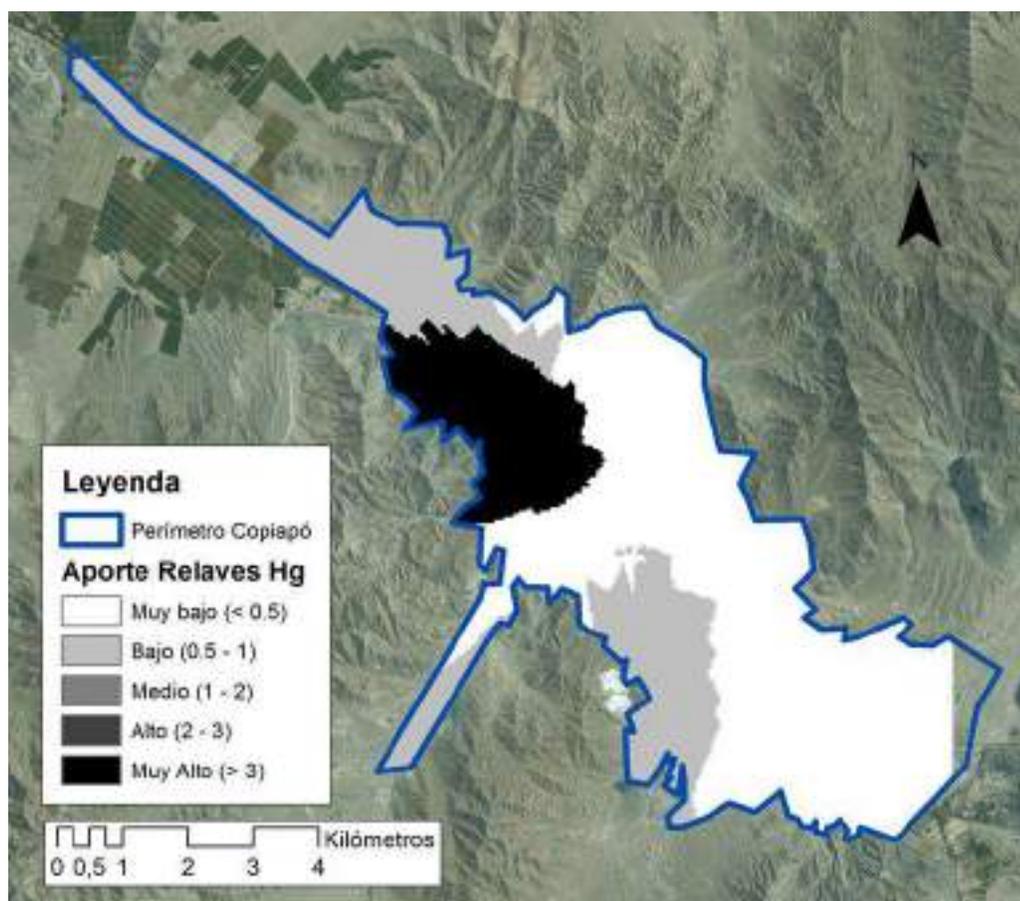


Figura 3-74: Zonas de la ciudad según nivel de aporte de la fuente Relaves ricos en Hg. Dos áreas son las más afectadas por las fuentes de Hg, el centro de la ciudad y las zonas agrícola de la ciudad.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3-75 se indica el aporte del Tráfico a la ciudad. Se observa que gran parte de la ciudad se encuentra con aporte bajo o medio de esta fuente, principalmente en la zona centro y carretera que va hacia el noroeste de la ciudad. Cabe destacar que la zona agrícola posee un menor aporte que el resto de la ciudad por la menor densidad vehicular del sector.

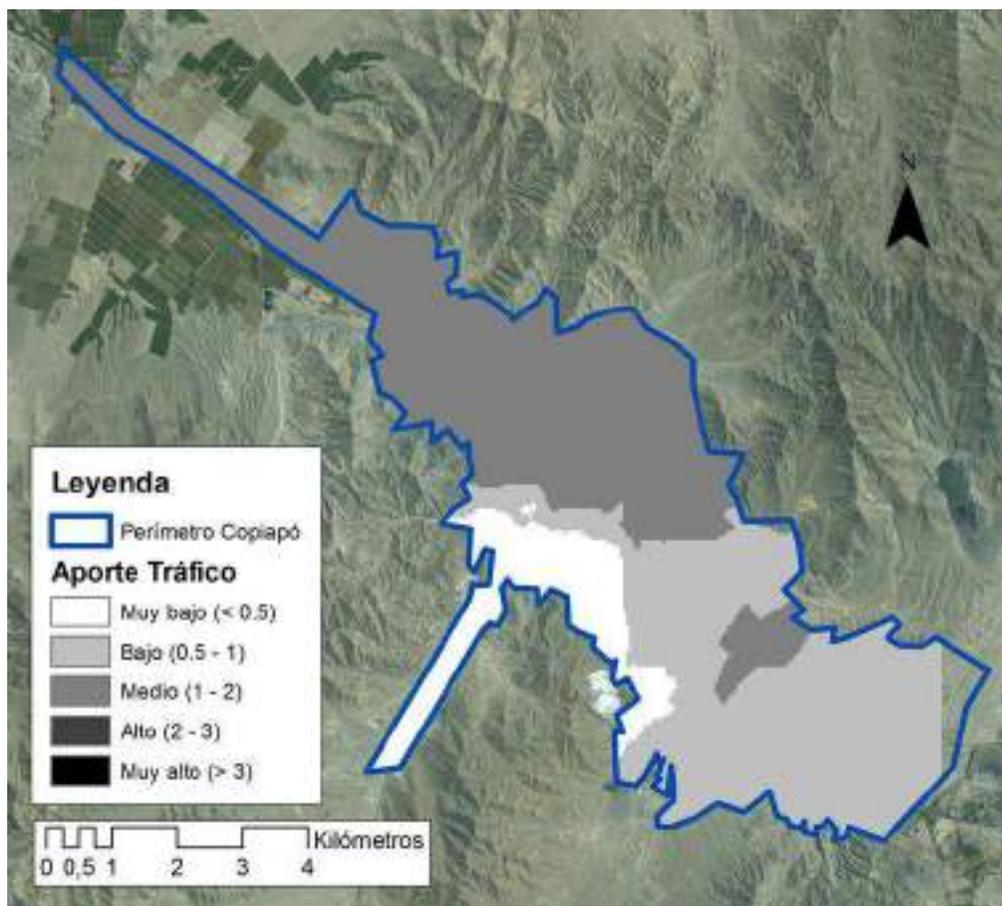


Figura 3-75: Zonas de la ciudad según nivel de aporte de la fuente tráfico. El aporte del tráfico es mayor en las zona centro de la ciudad, como también en las vías principales. Fuente: Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

En las siguientes secciones se abordarán las principales conclusiones en cada una de las temáticas abordadas en este estudio así como también proyecciones en diversos ámbitos centrados en un desarrollo más sustentable de la ciudad.

4.1 Calidad de análisis de laboratorio

Diversos análisis de control de calidad fueron utilizados para este estudio, obteniéndose resultados confiables y reproducibles. Según criterios de calidad de este estudio, se detectó alta variabilidad en las muestras, debido a la heterogeneidad de la matriz y a la no micronización de estas. El ajuste a los materiales de referencia certificados fue satisfactorio al igual que las concentraciones detectadas en las muestras blanco. La matriz de lodo fue la más homogénea dentro de las muestras de estudio seguido por los suelos, polvos de calles y muestras *background*. Para futuros estudios, la micronización de las muestras puede mejorar la homogenización de las muestras y disminuir la variabilidad de las concentraciones obtenidas.

4.2 Valores *background* para la región

Los valores *background* se obtuvieron por el método de Lepeltier. Estos valores son el primer intento regional por obtener un valor *background* representativo de las concentraciones naturales de metales en la Región de Atacama. Se identificó el enriquecimiento de las muestras *background* superficiales y de su fracción fina, en metales como el As, Cu, Pb y Zn, estas zonas geológicas se encuentran potencialmente más expuestas a la deposición atmosférica proveniente de las emisiones de la fundición de cobre. A pesar de esto el método de cálculo seleccionado, descarta estas muestras para obtener el valor *background*. Los valores *background* obtenidos para Co, Cu, Fe y Mn son altos respecto a otros estudios similares en otros países. Estos concuerdan con que toda la

región sea propicia para la explotación minera y posea una alta cantidad de depósitos minerales.

Cabe destacar que los valores *background* obtenidos son aplicables a toda la región de estudio, frente a métodos de medición de metales con metodologías similares a las utilizadas en este estudio. Elementos como Al y Cr son mejor extraídos de las muestras al utilizar ácidos más fuertes y no con la digestión parcial que se realizó en esta tesis.

4.3 Matrices sólidas urbanas

Las muestras de suelo contienen concentraciones heterogéneas de metales. Elementos como el As, Cu, Hg, Pb y Zn superan los valores *background* calculados. De la misma forma los polvos de calles poseen también concentraciones de metales muy variadas a lo largo de la ciudad. En ambos casos se detectó la existencia de zonas con altas concentraciones dentro de la ciudad como también zonas de bajas concentraciones.

La fracción fina de los polvos de calles y suelos, se encuentra enriquecida en metales asociados a fuentes antropogénicas, como por ejemplo el As, Hg y Cu. Por otro lado, todas las concentraciones aumentan en la fracción fina con respecto a la gruesa pero en caso de los macro elementos como el Al, Fe, Ca, Mg y P su aumento es atribuido al efecto que el tamaño de partícula posee sobre las concentraciones. La fracción fina de los polvos de calles está extremadamente enriquecida con respecto a su fracción gruesa, indicando un alto aporte antropogénico en la ciudad.

La digestión total versus la parcial en las matrices sólidas urbanas indicó que elementos como el Na, Cr y Li se encuentran altamente relacionados a la matriz natural. En el caso de estudio de Copiapó, el Cr no posee niveles de enriquecimiento altos, las concentraciones encontradas son propias del material natural. Por otro lado el Cu, Pb, As y Zn presentan menor relación con esta indicando que mayoritariamente se relacionan a fuentes externas a la formación de la matriz sólida, es decir, de origen antropogénico.

4.4 Pasivos ambientales y dispersión de material minero

El mecanismo de dispersión del material de relave que predomina en Copiapó es el viento y la erosión eólica sobre la superficie descubierta de éstos. Las características propias de los relaves, el porcentaje de materia orgánica y la gran cantidad de finos en el material, favorece la dispersión del material fino hacia la ciudad. En base a los resultados de esta investigación se pudo estimar un rango de dispersión del material de relave de al menos 300 metros desde el relave, a diferencia del propuesto por otros de estudios de 1.800 metros. En base a este último rango los relaves pueden potencialmente afectar a un 75% de toda el área urbana de Copiapó. Pero en base a la estimación realizada el área afectada es de un 9,2%. Este rango de dispersión puede aumentar frente a futuros estudios. Metales identificadores de relaves como el Hg mejorarán la estimación del rango de dispersión, este metal a diferencia del cobre, no poseen un nivel base natural tan alto.

La alta heterogeneidad de las muestras de relaves indica que existen, dentro de un mismo relave, zonas con concentraciones extremadamente altas como también zonas con bajas concentraciones. Esta situación determinará el tipo de material que se está dispersando a la ciudad y el posible riesgo que puede implicar sobre la población. Por otro lado, también existe alta heterogeneidad en la composición elemental de los relaves de la ciudad. El caso del relave Ojancos, que posee altos contenidos de Hg especialmente en la fracción fina del material ($< 53\mu\text{m}$) y se ubica cerca de la zona centro de Copiapó, debe ser prioridad para futuras intervenciones. Este relave se diferencia de otros relaves de la minería del cobre, que en general no poseen altos valores Hg, pero sí de Cu y As.

Por último, la amplia distribución de los relaves de la minería del cobre, ha generado un aporte generalizado por toda la ciudad, homogéneo y con mayores aportes cerca de los relaves.

4.5 Aluviones

Los aluviones del Marzo del 2015 arrastraron material de relave, las concentraciones de metales pesados en el material minero fue diluida debido a la alta cantidad de lodos en el flujo aluvional. Los aluviones son un evento excepcional que pueden poner en riesgo la estabilidad de los relaves, estos se encuentran ubicados en los cauces principales de los flujos de la quebrada de Paipote y del río Copiapó. Ante posibles eventos futuros debe priorizarse la remoción de estos relaves en los cauces.

Las concentraciones elementales en los lodos son cercanas o bajo los valores *background* calculados. Las concentraciones fueron homogéneas entre las muestras, lo que indican un origen en común para los lodos, el geomaterial de los cerros cercanos. El hecho de que las concentraciones de los lodos sean menores que lo valores *background*, confirma la validez de estos valores calculados y les otorga valor como una buena representación de la línea base de metales en la región.

La única excepción en la concentraciones de los elementos es el Hg, que presenta altos valores con respecto a los valores *background* calculados, incluso mayores que suelos y polvos de la ciudad. Tanto los altos valores de los factores de enriquecimiento para el Hg como la homogénea distribución espacial de estos, sugieren la existencia de una posible fuente externa de Hg en los lodos. Esta fuente debe estar ubicada previamente a que el flujo entrará en la ciudad, posiblemente en la quebrada de Paipote.

4.6 Factores de enriquecimiento

Estos factores de enriquecimiento (FE) fueron calculados en base a muestras *background*, obtenidas con el objetivo de evitar zonas potencialmente enriquecidas. Como se analizó en este estudio, las emisiones de la fundición pueden alcanzar distancias mayores a 200 km desde la chimenea. Debido a este rango de efecto, la fundición potencialmente afecta a gran parte de la región y el efecto sobre la ciudad podría encontrarse oculto por valores

background mayores a los naturales. A pesar de esto, los valores obtenidos son ahora las concentraciones naturales en la zona.

Los FE en suelos y polvos de calles indican que estas matrices son los sumideros de metales pesados de la ciudad. La alta heterogeneidad espacial de los FE sugiere que las fuentes antropogénicas aportan a los polvos y suelos que son cercanos a ellas. Existen zonas de la ciudad con altos enriquecimientos para As, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb y Zn como también FE de metales como el As, Co, Mn y Ni que se mantienen en gran parte de las muestras bajos. Los FE de Hg presentan los mayores valores en ambas matrices, pudiendo significar un riesgo para la salud de las personas.

En promedio los FE de polvos son mayores que los de suelos y para elementos como el As y Zn el enriquecimiento debe ser estudiado más a fondo debido a un potencial efecto en la salud de la población; en el caso del Cu, Hg y Pb es urgente que se realice un análisis de riesgo da la salud de la población.

La distribución espacial de las muestras de polvo otorga una perspectiva completa del enriquecimiento en la ciudad. Los sectores cercanos a relaves son los más afectados por el enriquecimiento de metales como el As, Cu, Hg, Pb y Zn; destacando el aporte de otras fuentes antropogénicas, como el tráfico y la agricultura.

4.7 Identificación de fuentes contaminantes

Se utilizaron tres métodos estadísticos para la identificación de fuentes contaminantes análisis de correlación (CA), análisis de componentes principales (PCA) y Matriz de Factorización Positiva (PMF).

Análisis de correlación:

Mediante este método se identificó la relación entre metales y de esta forma posibles fuentes originarias para estos. En polvos de calles, potenciales fuentes son las emisiones de los procesos mineros (As, Cu, Fe, Zn y Pb); el aporte del polvo natural de la región (Al, Ca, Mg, Sr y Ti) y el aporte del tráfico (Co, Cr, Fe, Mn, Ni y V). En los suelos de la ciudad,

las posibles fuentes fueron el polvo natural de la región (Al, Cr, Li, Mg, Ni, Sr y Ti); la antigua minería del oro (Pb, Zn y Hg) y el tráfico (Ca, Co, Cu, Mn y Fe).

En polvos y suelos la componente natural se identificó y diferenció del resto de las fuentes antropogénicas, las actividades mineras y el tráfico. Este análisis fue el punto de partida para la interpretación de los análisis de PCA y PMF posteriores.

Análisis de componentes principales:

PCA es un método de análisis altamente dependiente de la heterogeneidad de las concentraciones entre las muestras, este método entregará resultados con mayor sentido físico en la medida que las muestras sean similares entre sí, caso contrario al de Copiapó. Esta condición resultó en identificaciones ambiguas de fuentes en el caso de estudio. A pesar de esto, en la matriz de polvos se identificó el aporte de la fuente geológica natural, como también fuentes antropogénicas; los procesos mineros, relaves y tráfico. En el caso de la matriz de suelo se identificaron los mismos factores anteriores más el aporte de las prácticas agrícolas y de mantención de parques.

Matriz de Factorización Positiva:

Utilizando el modelo PMF se pudo identificar y diferenciar el efecto antropogénico del natural, incluso en un ambiente con muy altas concentraciones naturales de metales. Este modelo pudo ser aplicado en dos matrices sólidas urbanas. Las muestras de polvo de calles resultaron en un modelo más estable debido principalmente a la homogeneidad en el tipo de muestras, a diferencia de las muestras de suelo que varían entre parques urbanos y zonas agrícolas, generando un modelo más inestable.

Con este modelo se identificaron en la matriz de polvos de calles 5 fuentes: los relaves de la minería del Cu, los relaves ricos en Hg, el tráfico, los procesos mineros y la fuente natural. Por otro lado, en suelos urbanos se identificaron 4 fuentes: las prácticas agrícolas y de mantención de parques, los relaves de la minería del Cu, los relaves ricos en Hg y la fuente natural.

Como se observó en ambos modelos la mayor cantidad de fuentes aportantes a las matrices sólidas se relacionan con las actividades mineras; los relaves de Cu, los relaves ricos en Hg y los procesos mineros.

Los mapas de distribución espacial de la contribución de las fuentes permitieron fundamentar la identificación realizada. Basados en la ubicación de cada fuente como también los cambios espaciales observados en las contribuciones.

Por último, el aporte natural, los relaves de Cu y los relaves enriquecidos en Hg fueron identificados en ambos modelos realizados. Por el contrario, la fuente de procesos mineros se identificó solo en polvo de calles y los aportes de las prácticas agrícolas solo en los suelos.

4.8 Métodos de identificación complementarios del efecto de fuentes contaminantes

Para la estimación de las direcciones de vientos, la utilización del Explorador eólico es una buena aproximación a la situación real. Con esta información es posible interpretar la potencial dispersión de contaminantes en diversos sectores de la ciudad.

El análisis XRD indica el posible aporte de los relaves a las matrices sólidas urbanas, a través de la identificación de fases minerales correspondientes a relaves.

La identificación de partículas esféricas en las muestras sólidas urbanas permitió detectar el efecto de la fundición en la ciudad y estimar un rango de dispersión de al menos 10 km desde la chimenea de la fundición Paipote.

Los filtros de aire con alto contenido de azufre indican que la fundición tiene un constante aporte de emisiones hacia la ciudad.

La utilización de diferentes técnicas analíticas como justificación de los resultados obtenidos por medio de los modelos matemáticos, permite validar la identificación cualitativa de las fuentes, y por medio de cada técnica, el efecto de cada una de las fuentes según alguna característica particular.

4.9 Planificación urbana y grupos socioeconómicos

Se analizaron los mapas de los sectores socioeconómicos predominantes para la ciudad y se comparó con la información generada en este estudio, ubicación de relaves, factores de enriquecimiento y aporte de las fuentes contaminantes.

La ubicación de los relaves se relaciona directamente con los niveles de pobreza, donde 8 relaves se ubican en sectores de grupo socioeconómico D y otros 6 relaves en grupo E. Al crecer la ciudad la gente de menor ingreso se ubica en las zonas periféricas donde se encuentran los relaves y donde los terrenos son de menor costo, de forma contraria la gente con mayores ingresos se aleja de los relaves.

En las zonas con menor ingreso monetario existen factores de enriquecimiento mayores en el Co, Cu y Zn. Por otro lado, los factores de enriquecimiento del Hg y Pb son altos en toda la ciudad sin una relación con la distribución de ingresos.

El material de los relaves de Cu, las emisiones del tráfico y el material natural, aportan de manera similar a toda la ciudad. A diferencia de los relaves enriquecidos en Hg y los procesos mineros, que tienen más aporte en las zonas más pobres.

En particular el aporte de los relaves de Hg a la ciudad es mayor en el centro y zona agrícola, siendo estos sitios la prioridad para el control del material de relave enriquecido. Por otro lado, los mapas de las zonas de la ciudad que identifican el aporte de cada fuente, pueden ser utilizados para regular la expansión urbana según la exposición a fuentes contaminantes.

5. PERSPECTIVAS

Salud pública: La presencia de altos enriquecimientos dentro de la ciudad es un tema de preocupación, ya que se desconoce el detalle del riesgo que esto implica para la población de Copiapó. Elementos como el As, Cu, Hg, Pb y Zn deben ser estudiados en un futuro desde el punto de vista de la salud pública; realizar futuros estudios de riesgo dentro de la ciudad, donde no solo se evalúe el riesgo que producen los relaves sino que también el riesgo que generan los suelos y polvos enriquecidos de la ciudad.

Planificación urbana: El crecimiento constante y descontrolado de la ciudad, sin el conocimiento previo de la calidad de sus suelos, puede conducir al asentamiento de nuevas poblaciones en sitios que pueden presentar un potencial riesgo para la salud. Es deber de los planificadores urbanos el considerar el posible enriquecimiento dentro de la ciudad para así considerar los potenciales riesgos a la salud, que son previsibles y evitables con una correcta planificación urbana.

Socioeconómicas: Los relaves afectan a toda la población de Copiapó de igual forma, sin importar su grupo socioeconómico. Pero por el contrario, los relaves se ubican contiguos a zonas donde los ingresos monetarios son menores, principalmente debido a que los terrenos periurbanos de la ciudad son más económicos, a costa de vivir más cerca de los relaves mineros.

Normativa: Chile necesita establecer valores de referencias o normas de metales para suelos. Esta norma deberá ser diferenciada según cada región del país de modo de incorporar la variabilidad geológica del país dentro de la norma. Copiapó es el primer caso de estudio generalizado de matrices sólidas de la región. Para establecer normas sectoriales correspondientes, se deben evaluar cada ciudad en particular, evaluar su estado ambiental actual, las concentraciones naturales regionales y las fuentes contaminantes que afectan la ciudad.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, J. A., Faz, A., Kalbitz, K., Jansen, B., & Martínez-Martínez, S. (2014). Partitioning of heavy metals over different chemical fraction in street dust of Murcia (Spain) as a basis for risk assessment. *Journal of Geochemical Exploration*, 144(PB), 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.02.004>
- Acosta, J. A., Martínez-Martínez, S., Faz, A., & Arocena, J. (2011). Accumulations of major and trace elements in particle size fractions of soils on eight different parent materials. *Geoderma*, 161(1–2), 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.001>
- Agriquem América S.A. (2009). *Informe final: Análisis químico de suelos de la ciudad de arica*.
- Ajmone-Marsan, F., Biasioli, M., Kralj, T., Grčman, H., Davidson, C. M., Hursthouse, A. S., ... Rodrigues, S. (2008). Metals in particle-size fractions of the soils of five European cities. *Environmental Pollution*, 152(1), 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.05.020>
- Aksoy, H., & Kavvas, M. L. (2005). A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *Catena*, 64(2–3), 247–271. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.008>
- Al-Khashman, O. A. (2007). Determination of metal accumulation in deposited street dusts in Amman, Jordan. *Environmental Geochemistry and Health*, 29(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10653-006-9067-8>
- Ayrault, S., Senhou, A., Moskura, M., & Gaudry, A. (2010). Atmospheric trace element concentrations in total suspended particles near Paris, France. *Atmospheric Environment*, 44(30), 3700–3707. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.035>
- Balladares, E., Kelm, U., Helle, S., Parra, R., & Araneda, E. (2014). Chemical-mineralogical characterization of copper smelting flue dust. *Dyna*, 81(186), 11–18. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n186.32852>
- Banerjee, A. D. K. (2003). Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India. *Environmental Pollution*, 123(1), 95–105. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00337-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00337-8)
- Benhaddya, M. L., Boukhelkhal, A., Halis, Y., & Hadjel, M. (2016). Human Health Risks Associated with Metals from Urban Soil and Road Dust in an Oilfield Area of Southeastern Algeria. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 70(3), 556–571. <https://doi.org/10.1007/s00244-015-0244-6>
- Brown, S. G., Eberly, S., Paatero, P., & Norris, G. A. (2015). Methods for estimating uncertainty in PMF solutions: Examples with ambient air and water quality data and guidance on reporting PMF results. *Science of the Total Environment*, 518–519, 626–635. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.022>
- Cai, L., Xu, Z., Ren, M., Guo, Q., Hu, X., Hu, G., ... Peng, P. (2012). Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong Province, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 78, 2–8.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.07.004>

- Calcagni, M. S. (2016). *Screening geoquímico urbano: ocurrencia, distribución y biodisponibilidad de metales y metaloides en matrices sólidas en Copiapó*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Carkovic, A. B., Calcagni, M. S., Vega, A. S., Coquery, M., Moya, P. M., Bonilla, C. A., & Pastén, P. A. (2016). Active and legacy mining in an arid urban environment: challenges and perspectives for Copiapó, Northern Chile. *Environmental Geochemistry and Health*, 38(4), 1001–1014. <https://doi.org/10.1007/s10653-016-9793-5>
- CEDEUS. (2015). *Screening Geoquímico en Áreas Urbanas de Atacama : Evaluación Ambiental Preliminar y Perspectivas Post Aluviones de Marzo de 2015*.
- CENMA. (2011). *Evaluación de Riesgos a la Salud en la Comuna de Andacollo*.
- CENMA. (2012). *INFORME FINAL “ Investigación suelos con potencial presencia de Comunas de Copiapó y Tierra*.
- Centro de Investigación Social de TECHO Chile. (2014). *Grupos socioeconómicos Copiapó: Mapas de Vulnerabilidad Territorial*. Retrieved from <http://www.techo.org/paises/chile/cis/vulnerabilidad/>
- Chirenje, T., Ma, L. Q., Hornsby, A. G., Portier, K., Harris, W., Latimer, S., & Zillioux, E. J. (2001). Protocol development for assessing arsenic background concentrations in Florida urban soils. *Journal of Environmental Forensics*, 2, 141–153. <https://doi.org/10.1006/enfo.2001.0046>
- Chow, J. C., Lowenthal, D. H., Chen, L.-W. A., Wang, X., & Watson, J. G. (2015). Mass reconstruction methods for PM_{2.5}: a review. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8(3), 243–263. <https://doi.org/10.1007/s11869-015-0338-3>
- CIGIDEN. (2015). *Adaptación ambiental y salud pública post aluvión : Chañaral y Atacama*.
- Comero, S., Servida, D., De Capitani, L., & Gawlik, B. M. (2012). Geochemical characterization of an abandoned mine site: A combined positive matrix factorization and GIS approach compared with principal component analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 118, 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.04.003>
- Corral, S., Sáez, D., Lam, G., Lillo, P., Sandoval, R., Lancellotti, D., ... Pancetti, F. (2013). Neurological and neuropsychological deterioration in artisanal gold miners from the town of Andacollo, Chile. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 95(2), 344–358. <https://doi.org/10.1080/02772248.2013.766191>
- Cortes, S. (2009). *Percepción y medición del riesgo a metales en una población expuesta a residuos mineros*. Retrieved from <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/116517>
- Davies, B. E., & White, H. M. (1981). Environmental pollution by wind blown lead mine waste: A case study in wales, U.K. *Science of the Total Environment*, 10(1), 57–74. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(81\)90036-X](https://doi.org/10.1016/0048-9697(81)90036-X)

- De Gregori, I., Fuentes, E., Rojas, M., Pinochet, H., & Potin-Gautier, M. (2003). Monitoring of copper, arsenic and antimony levels in agricultural soils impacted and non-impacted by mining activities, from three regions in Chile. *Journal of Environmental Monitoring: JEM*, 5(2), 287–295. <https://doi.org/10.1039/b211469k>
- Departamento de Geofísica, F. de F. U. D. C. (2012). El Explorador Eólico 2012.
- DGA. (2004). *Cuenca del Río Copiapó*.
- Dordević, D., Mihajlidi-Zelić, A., & Relić, D. (2005). Differentiation of the contribution of local resuspension from that of regional and remote sources on trace elements content in the atmospheric aerosol in the Mediterranean area. *Atmospheric Environment*, 39(34), 6271–6281. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.07.006>
- EPA, U. (2014). EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 User Guide.
- Ettler, V. (2015). Soil contamination near non-ferrous metal smelters: A review. *Applied Geochemistry*, 64, 56–74. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.09.020>
- Gidhagen, L., Kahelin, H., Schmidt-Thomé, P., & Johansson, C. (2002). Anthropogenic and natural levels of arsenic in PM10 in central and northern Chile RN - Atmos. Environ. 36, 3803-3817. *Atmospheric Environment*, 36, 3803–3817.
- Ginocchio, R., Carvallo, G., Toro, I., Bustamante, E., Silva, Y., & Sepúlveda, N. (2004). Micro-spatial variation of soil metal pollution and plant recruitment near a copper smelter in Central Chile. *Environmental Pollution*, 127(3), 343–352. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2003.08.020>
- Glennon, M. M., Harris, P., Ottesen, R. T., Scanlon, R. P., & O'Connor, P. J. (2014). The Dublin SURGE Project: Geochemical baseline for heavy metals in topsoils and spatial correlation with historical industry in Dublin, Ireland. *Environmental Geochemistry and Health*, 36(2), 235–254. <https://doi.org/10.1007/s10653-013-9561-8>
- HABITERRA S.A. (2011). Diagnóstico reconversión urbana y modificación plan regulador comunal en zona con presencia de polimetales en arica.
- Hedberg, E., Gidhagen, L., & Johansson, C. (2005). Source contributions to PM10 and arsenic concentrations in Central Chile using positive matrix factorization. *Atmospheric Environment*, 39(3), 549–561. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.11.001>
- INE. (2005). Chile: Ciudades, pueblos, aldeas y caseríos., 300.
- INE. (2014). Actualización De Población 2002-2012 Y Proyecciones 2013-2020. Retrieved from http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/familias/demograficas_vitales.php
- INE. (2015). Medio Ambiente: Informe Anual 2015.
- Jorquera, H., & Barraza, F. (2013). Source apportionment of PM10 and PM2.5 in a desert region in northern Chile. *Science of the Total Environment*, 444, 327–335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.007>

- Kim, J. A., Park, J. H., & Hwang, W. J. (2016). Heavy metal distribution in street dust from traditional markets and the human health implications. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/ijerph13080820>
- Kutchko, B. G., & Kim, A. G. (2006). Fly ash characterization by SEM-EDS. *Fuel*, 85(17–18), 2537–2544. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.05.016>
- Leiva G., M. A., & Morales, S. (2013). Environmental assessment of mercury pollution in urban tailings from gold mining. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 90, 167–173. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.12.026>
- Li, X., Poon, C. S., & Liu, P. S. (2001). Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong. *Applied Geochemistry*, 16(11–12), 1361–1368. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00045-2)
- Loredo, J., Ordóñez, A., Charlesworth, S., & De Miguel, E. (2003). Influence of industry on the geochemical urban environment of Mieres (Spain) and associated health risk. *Environmental Geochemistry and Health*, 25(3), 307–323. <https://doi.org/10.1023/A:1024521510658>
- Luo, X. S., Yu, S., & Li, X. D. (2011). Distribution, availability, and sources of trace metals in different particle size fractions of urban soils in Hong Kong: Implications for assessing the risk to human health. *Environmental Pollution*, 159(5), 1317–1326. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.013>
- Marrero, J., Polla, G., Jiménez Rebagliati, R., Plá, R., Gómez, D., & Smichowski, P. (2007). Characterization and determination of 28 elements in fly ashes collected in a thermal power plant in Argentina using different instrumental techniques. *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*, 62(2), 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2007.01.007>
- Masson, M., Blanc, G., & Schafer, J. (2006). Geochemical signals and source contributions to heavy metal (Cd, Zn, Pb, Cu) fluxes into the Gironde Estuary via its major tributaries. *Science of the Total Environment*, 370(1), 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.06.011>
- Matschullat, J., Ottenstein, R., & Reimann, C. (2000). Geochemical background - Can we calculate it? *Environmental Geology*, 39(9), 990–1000. <https://doi.org/10.1007/s002549900084>
- Meza-Figueroa, D., Maier, R. M., de la O-Villanueva, M., Gómez-Alvarez, A., Moreno-Zazueta, A., Rivera, J., ... Palafox-Reyes, J. (2009). The impact of unconfined mine tailings in residential areas from a mining town in a semi-arid environment: Nacozari, Sonora, Mexico. *Chemosphere*, 77(1), 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.04.068>
- Molina, M., Aburto, F., Calderón, R., Cazanga, M., & Escudey, M. (2009). Trace Element Composition of Selected Fertilizers Used in Chile: Phosphorus Fertilizers as a Source of Long-Term Soil Contamination. *Soil and Sediment Contamination*, 18(4), 497–511. <https://doi.org/10.1080/15320380902962320>
- Morgan, R. P. C., & Quinton, J. N. (2001). Erosion Modeling. In R. S. Harmon & W. W. Doe

- (Eds.), *Landscape Erosion and Evolution Modeling* (pp. 117–143). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0575-4_6
- Navarro, M. C., Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M. J., Vidal, J., Tovar, P. J., & Bech, J. (2008). Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: A case study in a semi-arid zone. *Journal of Geochemical Exploration*, *96*(2–3), 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2007.04.011>
- Nezhad, M. T., Tabatabaie, S. M., & Gholami, A. (2015). Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, *152*, 91–109. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.02.005>
- Nicholson, F. A., Smith, S. R., Alloway, B. J., Carlton-Smith, C., & Chambers, B. J. (2003). An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *Science of the Total Environment*, *311*(1–3), 205–219. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00139-6)
- Ondov, J. M., Zoller, W. H., & Gordon, G. E. (1982). Trace element emissions on aerosols from motor vehicles. *Environ. Sci. Technol.*, *16*(6), 318–328. <https://doi.org/10.1021/es00100a004>
- Paatero, P., & Tapper, U. (1994). Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values. *Environmetrics*, *5*(2), 111–126. <https://doi.org/10.1002/env.3170050203>
- Parra, S., Bravo, M. A., Quiroz, W., Moreno, T., Karanasiou, A., Font, O., ... Cereceda-Balic, F. (2014). Source apportionment for contaminated soils using multivariate statistical methods. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *138*, 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2014.08.003>
- Parra, S., Bravo, M. A., Quiroz, W., Moreno, T., Karanasiou, A., Font, O., ... Cereceda, F. (2014). Distribution of trace elements in particle size fractions for contaminated soils by a copper smelting from different zones of the Puchuncaví Valley (Chile). *Chemosphere*, *111*, 513–521. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.127>
- Parra, S., Bravo, M. A., Quiroz, W., Querol, X., & Paipa, C. (2015). Distribution and pollution assessment of trace elements in marine sediments in the Quintero Bay (Chile). *Marine Pollution Bulletin*, *99*(1–2), 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.066>
- Plumlee, G. S., & Ziegler, T. L. (2003). The Medical Geochemistry of Dusts, Soils, and Other Earth Materials. *Treatise on Geochemistry*, *9–9*, 1–61. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/09050-2>
- Polissar, A. V., Hopke, P. K., Paatero, P., Malm, W. C., & Sisler, J. F. (1998). Atmospheric aerosol over Alaska: 2. Elemental composition and sources. *Journal of Geophysical Research*, *103*(98), 19045. <https://doi.org/10.1029/98JD01212>
- Programa de Naciones Unidas para el Medio ambiente América Latina y el Caribe. (2008). Perspectivas del medio ambiente urbano: GEO Copiapó. Retrieved from <http://www.pnuma.org/deat1/pdf/2009 - GEO Copiapo.pdf>
- Ramadan, Z., Song, X. H., & Hopke, P. K. (2000). Identification of sources of Phoenix aerosol

- by positive matrix factorization. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 50(8), 1308–1320. <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464173>
- Reff, A., Eberly, S. I., & Bhave, P. V. (2007). Receptor modeling of ambient particulate matter data using positive matrix factorization: review of existing methods. *J Air Waste Manag Assoc*, 57(February), 146–154. <https://doi.org/10.1080/10473289.2007.10465319>
- Romo-Kröger, C. M., Morales, J. R., Dinator, M. I., Llona, F., & Eaton, L. C. (1994). Heavy metals in the atmosphere coming from a copper smelter in Chile. *Atmospheric Environment*, 28(4), 705–711. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)90047-7](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)90047-7)
- Rueda-Holgado, F., Calvo-Blázquez, L., Cereceda-Balic, F., & Pinilla-Gil, E. (2016). Temporal and spatial variation of trace elements in atmospheric deposition around the industrial area of Puchuncaví-Ventanas (Chile) and its influence on exceedances of lead and cadmium critical loads in soils. *Chemosphere*, 144, 1788–1796. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.10.079>
- Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Gez, R., Mora, M. D. L. L., Flores, H., & Neaman, A. (2006). Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revision 2006. *Serie Actas-Instituto de Investigaciones Agropecuarias*.
- Salim, M., & Madany, I. (1993). Heavy metals in street and house dust in Bahrain. *Water, Air, and Soil Pollution*, 66(1), 111–119. <https://doi.org/10.1007/bf00477063>
- Salmanighabeshi, S., Palomo-Marín, M. R., Bernalte, E., Rueda-Holgado, F., Miró-Rodríguez, C., Fadic-Ruiz, X., ... Pinilla-Gil, E. (2015). Long-term assessment of ecological risk from deposition of elemental pollutants in the vicinity of the industrial area of Puchuncaví-Ventanas, central Chile. *Science of the Total Environment*, 527–528, 335–343. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.010>
- Sernageomin. (2003). Mapa geológico de Chile: versión digital. *Publicación Geología Digital*, 4, 25. Retrieved from <http://geoportal.sernageomin.cl/geovisor/GeoVisor/index.html?resources=map:ags@http://geogarcis.sernageomin.cl/ArcGIS/rest/services/geoportal/GeologiaBase/MapServer>
- Sernageomin. (2015). Catastro Nacional de depósitos de relave. Depósitos Activos y No Activos, 59.
- SERNAGEOMIN. (2014). Anomalías Geoquímicas en el Norte Grande y Norte Chico, 22–54.
- Shomar, B. H., Müller, G., & Yahya, A. (2005). Geochemical features of topsoils in the Gaza Strip: Natural occurrence and anthropogenic inputs. *Environmental Research*, 98(3), 372–382. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2004.10.008>
- Sims, D. B., Hooda, P. S., & Gillmore, G. K. (2013). Mining Activities and Associated Environmental Impacts in Arid Climates: A Literature Review. *Environment and Pollution*, 2(4), 22–43. <https://doi.org/10.5539/ep.v2n4p22>
- Song, Y., Zhang, Y., Xie, S., Zeng, L., Zheng, M., Salmon, L. G., ... Slanina, S. (2006). Source apportionment of PM_{2.5} in Beijing by positive matrix factorization. *Atmospheric Environment*, 40(8), 1526–1537. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.10.039>

- Sternbeck, J., Sjodin, A., & Andréasson, K. (2002). Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension—results from two tunnel studies. *Atmospheric Environment*, *36*, 4735–4744.
- Sun, G., Li, Z., Liu, T., Chen, J., Wu, T., & Feng, X. (2017). Metal Exposure and Associated Health Risk to Human Beings by Street Dust in a Heavily Industrialized City of Hunan Province, Central China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *14*(3), 261. <https://doi.org/10.3390/ijerph14030261>
- Sutherland, R. a. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, *39*(6), 611–627. <https://doi.org/10.1007/s002540050473>
- Tasdemir, Y., Kural, C., Cindoruk, S. S., & Vardar, N. (2006). Assessment of trace element concentrations and their estimated dry deposition fluxes in an urban atmosphere. *Atmospheric Research*, *81*(1), 17–35. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2005.10.003>
- Tye, A. M., Hodgkinson, E. S., & Rawlins, B. G. (2006). Microscopic and chemical studies of metal particulates in tree bark and attic dust: evidence for historical atmospheric smelter emissions, Humberside, UK. *Journal of Environmental Monitoring : JEM*, *8*(9), 904–12. <https://doi.org/10.1039/b605729b>
- US EPA. (1995). *Establishing Background Levels*.
- Vaccaro, S., Sobiecka, E., Contini, S., Locoro, G., Free, G., & Gawlik, B. M. (2007). The application of positive matrix factorization in the analysis, characterisation and detection of contaminated soils. *Chemosphere*, *69*(7), 1055–1063. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.04.032>
- Vandeberg, G. S., Martin, C. W., & Pierzynski, G. M. (2011). Spatial distribution of trace elements in floodplain alluvium of the upper Blackfoot River, Montana. *Environmental Earth Sciences*, *62*(7), 1521–1534. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0637-9>
- Viana, M., Kuhlbusch, T. A. J., Querol, X., Alastuey, A., Harrison, R. M., Hopke, P. K., ... Hitztenberger, R. (2008). Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and results. *Journal of Aerosol Science*, *39*(10), 827–849. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.05.007>
- Villarroel, L., Morales, J., Miranda, P., Díaz, C., Arce, A., & Campos, C. (2009). Captura, cuantificación y caracterización del material particulado sedimentable en techumbres de la ciudad de Copiapó. *IDESIA*, *27*(3), 47–57.
- Wang, X. T., Miao, Y., Zhang, Y., Li, Y. C., Wu, M. H., & Yu, G. (2013). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils of the megacity Shanghai: Occurrence, source apportionment and potential human health risk. *Science of the Total Environment*, *447*, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.086>
- Wang, Y., Yang, L., Kong, L., Liu, E., Wang, L., & Zhu, J. (2015). Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediments from Dongping Lake, Shandong, East China. *Catena*, *125*, 200–205. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.023>

- Williams, M. D., & Brown, M. J. (1994). *DEVELOPMENT OF METHODS FOR EVALUATING OPTIONS FOR IMPROVING THE AIR QUALITY IN SANTIAGO, CHILE AND ITS ENVIRONS*.
- Wong, C. S. C., Li, X., & Thornton, I. (2006). Urban environmental geochemistry of trace metals. *Environmental Pollution*, *142*(1), 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.09.004>
- Xue, J. long, Zhi, Y. you, Yang, L. ping, Shi, J. chun, Zeng, L. zao, & Wu, L. sheng. (2014). Positive matrix factorization as source apportionment of soil lead and cadmium around a battery plant (Changxing County, China). *Environmental Science and Pollution Research*, *21*(12), 7698–7707. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2726-x>
- Yadav, S., & Rajamani, V. (2006). Air quality and trace metal chemistry of different size fractions of aerosols in N-NW India - Implications for source diversity. *Atmospheric Environment*, *40*(4), 698–712. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.10.005>
- Yu, W., Liu, R., Wang, J., Xu, F., & Shen, Z. (2015). Source apportionment of PAHs in surface sediments using positive matrix factorization combined with GIS for the estuarine area of the Yangtze River, China. *Chemosphere*, *134*, 263–271.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.04.049>
- Zagal, E., & Sadzwaka, A. (2007). Protocolo de Métodos de Análisis para suelos y lodos. *SAG Servicio Agrícola Y Ganadero. Chile*, 1–103. Retrieved from
https://www.sag.cl/sites/default/files/METODOS_LODOS_SUELOS.pdf
- Zdanowicz, C. M., Banic, C. M., Paktunc, D. A., & Kliza-Petelle, D. A. (2006). Metal emissions from a Cu smelter, Rouyn-Noranda, Québec: characterization of particles sampled in air and snow. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, *6*(2–3), 147–162.
<https://doi.org/10.1144/1467-7873/05-089>
- Zhang, J., Wang, J., Hua, P., & Krebs, P. (2015). The qualitative and quantitative source apportionments of polycyclic aromatic hydrocarbons in size dependent road deposited sediment. *Science of the Total Environment*, *505*, 90–101.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.091>
- Zhang, Y., Li, F., Li, J., Liu, Q., Tu, C., Suzuki, Y., & Huang, C. (2015). Spatial Distribution, Potential Sources, and Risk Assessment of Trace Metals of Groundwater in the North China Plain. *Human and Ecological Risk Assessment*, *21*(3), 726–743.
<https://doi.org/10.1080/10807039.2014.921533>

ANEXOS

ANEXO A : DETALLE DE MUESTRAS OBTENIDAS POR CAMPAÑA

Tabla A - 1: Detalle de muestras obtenidas según campaña a terreno.

Nombre	Campaña	Tipo Matriz	Punto GPS	UTM E	UTM N	Nombre relave
P103	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	103	368240	6970768	-
P104	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	105	367917	6970257	-
P106	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	106	368515	6970464	-
P108	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	108	368702	6970579	-
P110	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	110	368243	6970245	-
P112	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	112	368693	6970181	-
P113	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	113	368218	6969872	-
P114	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	114	368743	6969752	-
P115	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	115	369291	6969319	-
P116	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	116	369477	6969498	-
P117	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	117	369229	6969801	-
P121	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	121	368652	6971838	-
P146	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	146	371585	6969292	-
P147	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	147	367528	6969369	-
P148	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	148	367343	6970908	-
P149	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	149	367501	6971513	-
P150	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	150	365420	6974517	-
P151	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	151	364454	6975246	-
P152	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	152	362438	6976607	-
P153	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	153	361160	6977772	-
P158	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	158	368098	6971808	-
P160	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	160	368199	6972284	-
P162	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	162	369417	6973536	-
P164	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	164	369196	6972341	-
P166	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	166	369232	6971158	-
P168	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	168	369544	6970444	-
P170	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	170	367645	6971488	-
P175	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	175	369232	6969700	-
P176	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	176	368234	6970515	-
P177	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	177	368050	6970310	-
P181	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	181	368532	6969777	-
P184	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	184	368741	6969949	-
P805	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	805	374603	6968091	-
P806	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	806	374373	6967056	-
P807	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	807	373697	6966838	-

P808	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	808	373530	6967494	-
P809	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	809	373272	6968127	-
P810	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	810	372455	6967511	-
P811	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	811	372360	6968375	-
P812	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	812	371719	6967778	-
P813	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	813	370686	6966824	-
P814	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	815	370145	6965913	-
P816	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	816	371503	6968513	-
P817	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	817	370995	6968982	-
P818	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	818	371444	6969537	-
P819	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	819	370498	6969592	-
P820	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	820	371323	6970277	-
P821	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	821	370531	6970453	-
P822	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	822	370391	6971495	-
P823	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	823	369474	6971422	-
P824	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	824	369581	6970458	-
P826	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	826	369467	6969517	-
P829	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	829	370733	6970193	-
P830	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	830	371071	6970690	-
P831	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	831	370564	6972567	-
P832	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	832	370423	6973458	-
P833	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	833	369357	6973482	-
P834	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	834	368954	6972856	-
P835	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	835	369364	6972507	-
P836	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	836	369654	6971936	-
P837	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	837	369410	6971682	-
P838	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	839	368771	6971391	-
P840	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	840	368703	6972470	-
P841	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	841	368535	6972455	-
P842	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	842	368499	6973540	-
P843	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	843	366488	6973452	-
P844	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	844	366773	6973256	-
P845	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	845	366937	6972653	-
P846	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	846	367688	6972122	-
P847	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	847	367670	6972273	-
P848	Copiapó Noviembre 2014	Polvo	848	368684	6972708	-
C1	Copiapó Noviembre 2014	Relave	209	368480	6969658	Porvenir
C2	Copiapó Noviembre 2014	Relave	210	368482	6969642	Porvenir
C3	Copiapó Noviembre 2014	Relave	210	368482	6969642	Porvenir

C4	Copiapó Noviembre 2014	Relave	210	368482	6969642	Porvenir
C5	Copiapó Noviembre 2014	Relave	210	368482	6969642	Porvenir
C6	Copiapó Noviembre 2014	Relave	210	368482	6969642	Porvenir
C7	Copiapó Noviembre 2014	Relave	211	368493	6969614	Porvenir
R185-2	Copiapó Noviembre 2014	Relave	186	368492	6969677	Porvenir
R185	Copiapó Noviembre 2014	Relave	186	368492	6969677	Porvenir
R186	Copiapó Noviembre 2014	Relave	187	368494	6969689	Porvenir
R187	Copiapó Noviembre 2014	Relave	188	368494	6969697	Porvenir
R188	Copiapó Noviembre 2014	Relave	189	368512	6969678	Porvenir
R189	Copiapó Noviembre 2014	Relave	190	368513	6969685	Porvenir
R190	Copiapó Noviembre 2014	Relave	191	368513	6969689	Porvenir
R191	Copiapó Noviembre 2014	Relave	192	368518	6969695	Porvenir
R192	Copiapó Noviembre 2014	Relave	193	368536	6969687	Porvenir
R193	Copiapó Noviembre 2014	Relave	194	368537	6969694	Porvenir
R194	Copiapó Noviembre 2014	Relave	195	368498	6969658	Porvenir
R195	Copiapó Noviembre 2014	Relave	196	368510	6969658	Porvenir
R196	Copiapó Noviembre 2014	Relave	197	368527	6969658	Porvenir
R197	Copiapó Noviembre 2014	Relave	198	368518	6969728	Porvenir
R198	Copiapó Noviembre 2014	Relave	199	368497	6969724	Porvenir
R199	Copiapó Noviembre 2014	Relave	200	368562	6969721	Porvenir
R200	Copiapó Noviembre 2014	Relave	201	368548	6969729	Porvenir
R201	Copiapó Noviembre 2014	Relave	202	368530	6969735	Porvenir
R202	Copiapó Noviembre 2014	Relave	203	368510	6969744	Porvenir
R203	Copiapó Noviembre 2014	Relave	205	368488	6969751	Porvenir
R204	Copiapó Noviembre 2014	Relave	206	368462	6969745	Porvenir
R205	Copiapó Noviembre 2014	Relave	207	368442	6969734	Porvenir
R206	Copiapó Noviembre 2014	Relave	208	368440	6969703	Porvenir
S102	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	102	368236	6970773	-
S104	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	104	367927	6970263	-
S107	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	107	368705	6970582	-
S109	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	109	368221	6970374	-
S111	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	111	368703	6970204	-
S122	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	122	370082	6969062	-
S123	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	123	370088	6969279	-
S124	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	124	370286	6969002	-
S125	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	125	370369	6969108	-
S126	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	128	370617	6969013	-
S129	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	129	370874	6968181	-
S130	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	130	370877	6968181	-

S131	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	131	371032	6968481	-
S132	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	132	370564	6968144	-
S133	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	133	370298	6968526	-
S134	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	134	370299	6968524	-
S135	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	135	370632	6968797	-
S136	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	136	370917	6967885	-
S137	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	137	371368	6968253	-
S138	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	138	371070	6968129	-
S140	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	140	370814	6967354	-
S141	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	141	371087	6968117	-
S142	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	142	371141	6967192	-
S143	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	143	371772	6967816	-
S144	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	144	372452	6968474	-
S145	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	145	372978	6968818	-
S154	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	154	361004	6978354	-
S155	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	155	361928	6978413	-
S156	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	156	364517	6974642	-
S157	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	157	368105	6971810	-
S159	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	159	368199	6972284	-
S161	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	161	369417	6973536	-
S163	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	163	369196	6972342	-
S165	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	165	369266	6971251	-
S167	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	167	369625	6970317	-
S169	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	169	367657	6971483	-
S171	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	171	369128	6969310	-
S174	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	174	369228	6969702	-
S178	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	178	368061	6970336	-
S179	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	179	368763	6969768	-
S180	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	180	368528	6969777	-
S183	Copiapó Noviembre 2014	Suelo	183	368744	6969947	-
Centro Cultural	Copiapó Noviembre 2014	PM10	-	367266	6972577	-
Hotel	Copiapó Noviembre 2014	PM10	-	368719	6971913	-
CESFAM	Copiapó Noviembre 2014	PM10	-	367951	6970386	-
T1-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	926	374623	6968141	-
T1-3	Copiapó Abril 2015	Lodo	928	373721	6966819	-
T1-4	Copiapó Abril 2015	Lodo	929	372705	6966598	-
T1-5	Copiapó Abril 2015	Lodo	930	373030	6966915	-
T2-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	933	372723	6968723	-
T2-2	Copiapó Abril 2015	Lodo	934	372411	6968419	-

T2-3	Copiapó Abril 2015	Lodo	935	371994	6968027	-
T2-4	Copiapó Abril 2015	Lodo	936	371441	6967456	-
T4-2	Copiapó Abril 2015	Lodo	939	368251	6972212	-
T4-3	Copiapó Abril 2015	Lodo	941	368115	6971797	-
T4-4	Copiapó Abril 2015	Lodo	942	368810	6971106	-
T4-5	Copiapó Abril 2015	Lodo	943	368436	6971219	-
T4-5B	Copiapó Abril 2015	Lodo	943	368436	6971219	-
T3-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	945	369954	6969139	-
T3-3	Copiapó Abril 2015	Lodo	949	370304	6969419	-
T3-4	Copiapó Abril 2015	Lodo	950	370822	6970178	-
T5-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	952	364970	6975240	-
T5-3	Copiapó Abril 2015	Lodo	954	364867	6975126	-
T5-4	Copiapó Abril 2015	Lodo	955	364509	6974644	-
T5-6	Copiapó Abril 2015	Lodo	957	364576	6974774	-
T5-7	Copiapó Abril 2015	Lodo	959	364558	6974733	-
T6-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	960	362493	6976327	-
T6-2	Copiapó Abril 2015	Lodo	961	362536	6976339	-
T6-3	Copiapó Abril 2015	Lodo	962	362541	6976528	-
T6-4	Copiapó Abril 2015	Lodo	963	362626	6976672	-
R213-3	Copiapó Abril 2015	Lodo	213	368101	6971539	-
L218	Copiapó Abril 2015	Lodo	218	367378	6972269	-
L221-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	221	370613	6968138	-
L221-2	Copiapó Abril 2015	Lodo	221	370613	6968138	-
L221-3	Copiapó Abril 2015	Lodo	221	370613	6968138	-
L224-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	224	370843	6967936	-
L224-2	Copiapó Abril 2015	Lodo	224	370843	6967936	-
L226-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	226	374817	6967234	-
L227-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	227	375818	6967232	-
L228-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	228	375991	6967114	-
L229-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	229	374928	6968175	-
R230-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	232	375739	6969624	-
R230-2	Copiapó Abril 2015	Lodo	232	375739	6969624	-
L233-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	233	377565	6972862	-
L233-2	Copiapó Abril 2015	Lodo	233	377565	6972862	-
L234-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	234	377511	6973120	-
L234-2	Copiapó Abril 2015	Lodo	234	377511	6973120	-
L235-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	235	374731	6968414	-
L235-2	Copiapó Abril 2015	Lodo	235	374731	6968414	-
L235-3	Copiapó Abril 2015	Lodo	235	374731	6968414	-

L238-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	238	368809	6970708	-
L238-2	Copiapó Abril 2015	Lodo	238	368809	6970708	-
L240-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	240	368036	6971795	-
L240-2	Copiapó Abril 2015	Lodo	240	368036	6971795	-
L240-3	Copiapó Abril 2015	Lodo	240	368036	6971795	-
L246-1	Copiapó Abril 2015	Lodo	246	364210	6974828	-
L246-2	Copiapó Abril 2015	Lodo	246	364210	6974828	-
L246-2x	Copiapó Abril 2015	Lodo	246	364210	6974828	-
R213-1	Copiapó Abril 2015	Relave	213	368101	6971539	Victoria
R213-2	Copiapó Abril 2015	Relave	213	368101	6971539	Victoria
R215-1.1	Copiapó Abril 2015	Relave	215	367010	6972138	Ojancos 1
R215-1.2	Copiapó Abril 2015	Relave	215	367010	6972138	Ojancos 1
R215-1.3	Copiapó Abril 2015	Relave	215	367010	6972138	Ojancos 1
R215-1.4	Copiapó Abril 2015	Relave	215	367010	6972138	Ojancos 1
R215-2	Copiapó Abril 2015	Relave	215	367010	6972138	Ojancos 1
R215	Copiapó Abril 2015	Relave	215	367010	6972138	Ojancos 1
R216-1.1	Copiapó Abril 2015	Relave	216	366466	6972219	Ojancos 2
R216-1.2	Copiapó Abril 2015	Relave	216	366466	6972219	Ojancos 2
R216-1.3	Copiapó Abril 2015	Relave	216	366466	6972219	Ojancos 2
R216-1.4	Copiapó Abril 2015	Relave	216	366466	6972219	Ojancos 2
R216-2	Copiapó Abril 2015	Relave	216	366466	6972219	Ojancos 2
R216-3	Copiapó Abril 2015	Relave	216	366466	6972219	Ojancos 2
R216-4	Copiapó Abril 2015	Relave	216	366466	6972219	Ojancos 2
R217-1.1	Copiapó Abril 2015	Relave	217	366791	6972264	Ojancos 3
R217-1.2	Copiapó Abril 2015	Relave	217	366791	6972264	Ojancos 3
R217-1.3	Copiapó Abril 2015	Relave	217	366791	6972264	Ojancos 3
R219-1	Copiapó Abril 2015	Relave	219	370079	6969059	Base San Esteban
R219-2.1	Copiapó Abril 2015	Relave	219	370079	6969059	Base San Esteban
R219-2.2	Copiapó Abril 2015	Relave	219	370079	6969059	Base San Esteban
R220-1.1	Copiapó Abril 2015	Relave	220	370099	6969044	San Esteban
R220-1.2	Copiapó Abril 2015	Relave	220	370099	6969044	San Esteban
R220-1.3	Copiapó Abril 2015	Relave	220	370099	6969044	San Esteban
R220-1.4	Copiapó Abril 2015	Relave	220	370099	6969044	San Esteban
R220-1.5	Copiapó Abril 2015	Relave	220	370099	6969044	San Esteban
R220-2.1	Copiapó Abril 2015	Relave	220	370099	6969044	San Esteban
R220-2.2	Copiapó Abril 2015	Relave	220	370099	6969044	San Esteban
R221-1	Copiapó Abril 2015	Relave	221	370613	6968138	Llaucavén 1
R221-2	Copiapó Abril 2015	Relave	221	370613	6968138	Llaucavén 1

R221-3	Copiapó Abril 2015	Relave	221	370613	6968138	Llaucavén 1
R222-1.1	Copiapó Abril 2015	Relave	222	370646	6968106	Llaucavén 2
R222-1.2	Copiapó Abril 2015	Relave	222	370646	6968106	Llaucavén 2
R222-1.3	Copiapó Abril 2015	Relave	222	370646	6968106	Llaucavén 2
R227-1	Copiapó Abril 2015	Relave	227	375818	6967232	Planta Matta
R228-1	Copiapó Abril 2015	Relave	228	375991	6967114	Planta Matta
R237-1	Copiapó Abril 2015	Relave	237	369892	6969024	Santa Blanca
R237-2	Copiapó Abril 2015	Relave	237	369892	6969024	Santa Blanca
R238-1	Copiapó Abril 2015	Relave	238	368809	6970708	Papapietro
R238-2	Copiapó Abril 2015	Relave	238	368809	6970708	Papapietro
R242	Copiapó Abril 2015	Relave	242	364908	6973908	Bodega Alto 1
R242-1.1	Copiapó Abril 2015	Relave	242	364908	6973908	Bodega Alto 1
R242-1.2	Copiapó Abril 2015	Relave	242	364908	6973908	Bodega Alto 1
R242-2	Copiapó Abril 2015	Relave	242	364908	6973908	Bodega Alto 1
R242-3	Copiapó Abril 2015	Relave	242	364908	6973908	Bodega Alto 1
R244-1	Copiapó Abril 2015	Relave	244	365488	6973754	Bodega Alto 2
R244-2	Copiapó Abril 2015	Relave	244	365488	6973754	Bodega Alto 2
R244-3	Copiapó Abril 2015	Relave	244	365488	6973754	Bodega Alto 2
R244-4	Copiapó Abril 2015	Relave	244	365488	6973754	Bodega Alto 2
R245-1	Copiapó Abril 2015	Relave	245	364256	6973832	Bodega Alto 0
R245-2	Copiapó Abril 2015	Relave	245	364256	6973832	Bodega Alto 0
R245-3.1	Copiapó Abril 2015	Relave	245	364256	6973832	Bodega Alto 0
R245-3.2	Copiapó Abril 2015	Relave	245	364256	6973832	Bodega Alto 0
T1-2	Copiapó Abril 2015	Suelo	927	374383	6967038	-
T1-6	Copiapó Abril 2015	Suelo	932	373850	6966592	-
T2-5	Copiapó Abril 2015	Suelo	937	371118	6967344	-
T4-1	Copiapó Abril 2015	Suelo	938	369227	6972337	-
T4-2B	Copiapó Abril 2015	Suelo	939	368251	6972212	-
T4-6	Copiapó Abril 2015	Suelo	944	368221	6970742	-
T3-2	Copiapó Abril 2015	Suelo	946	370144	6969307	-
T3-5	Copiapó Abril 2015	Suelo	951	371006	6970728	-
T5-2	Copiapó Abril 2015	Suelo	953	364925	6975203	-
T5-5	Copiapó Abril 2015	Suelo	956	364495	6974637	-
T6-5	Copiapó Abril 2015	Suelo	964	362774	6976831	-
L232-3	Copiapó Abril 2015	Suelo	233	377565	6972862	-
L232-4	Copiapó Abril 2015	Suelo	233	377565	6972862	-
CESFAM Palomar	Copiapó Abril 2015	PM10	-	367951	6970386	-
Casa Particular, Sector Hospital	Copiapó Abril 2015	PM10	-	369101	6971641	-
Municipalidad	Copiapó Abril 2015	PM10	-	368586	6972781	-

Retén de Carabineros de Paipote Oficina Minera Casale	Copiapó Abril 2015	PM10	-	374305	6967117	-	
	Copiapó Abril 2015	PM10	-	370172	6970034	-	
	RP004	Copiapó Octubre 2015	Relave	004	368740	6970721	Papapietro
	RP005	Copiapó Octubre 2015	Relave	005	368744	6970712	Papapietro
	RP006	Copiapó Octubre 2015	Relave	006	368722	6970714	Papapietro
	RP007	Copiapó Octubre 2015	Relave	007	368729	6970715	Papapietro
	RP008	Copiapó Octubre 2015	Relave	008	368730	6970729	Papapietro
	RP009	Copiapó Octubre 2015	Relave	009	368732	6970731	Papapietro
	RP010	Copiapó Octubre 2015	Relave	010	368732	6970735	Papapietro
	RP011	Copiapó Octubre 2015	Relave	011	368733	6970744	Papapietro
	RP012	Copiapó Octubre 2015	Relave	012	368738	6970711	Papapietro
	RP013	Copiapó Octubre 2015	Relave	013	368757	6970705	Papapietro
	RP014	Copiapó Octubre 2015	Relave	014	368759	6970723	Papapietro
	RP015	Copiapó Octubre 2015	Relave	015	368745	6970739	Papapietro
	RP016	Copiapó Octubre 2015	Relave	016	368742	6970781	Papapietro
	RP017	Copiapó Octubre 2015	Relave	017	368733	6970776	Papapietro
	RP018	Copiapó Octubre 2015	Relave	018	368734	6970731	Papapietro
	RP019	Copiapó Octubre 2015	Relave	019	368741	6970742	Papapietro
	RP020	Copiapó Octubre 2015	Relave	020	368738	6970717	Papapietro
	RP021	Copiapó Octubre 2015	Relave	021	368744	6970716	Papapietro
	RP021-B	Copiapó Octubre 2015	Relave	021	368744	6970716	Papapietro
	RP022	Copiapó Octubre 2015	Relave	022	368765	6970705	Papapietro
	RP023	Copiapó Octubre 2015	Relave	023	368754	6970698	Papapietro
	RP024	Copiapó Octubre 2015	Relave	024	368742	6970685	Papapietro
	RP025	Copiapó Octubre 2015	Relave	025	368736	6970715	Papapietro
	RP026	Copiapó Octubre 2015	Suelo	026	368695	6970676	Papapietro
	RP027	Copiapó Octubre 2015	Suelo	027	368688	6970721	Papapietro
	RP028	Copiapó Octubre 2015	Suelo	028	368677	6970619	Papapietro
	RP029	Copiapó Octubre 2015	Suelo	029	368731	6970588	Papapietro
	RP030	Copiapó Octubre 2015	Suelo	030	368703	6970605	Papapietro
	Qf-1.1	Copiapó Octubre 2015	Background	040	393627	6917744	-
	Qf-1.2	Copiapó Octubre 2015	Background	041	393619	6917749	-
	Qf-1.3	Copiapó Octubre 2015	Background	042	393518	6917993	-
Qf-1.4	Copiapó Octubre 2015	Background	043	393208	6917807	-	
Qf-1.5	Copiapó Octubre 2015	Background	044	392939	6917947	-	
Qf-2.1	Copiapó Octubre 2015	Background	046	396893	6915561	-	
Qf-2.2	Copiapó Octubre 2015	Background	047	396946	6915508	-	
Qf-2.3	Copiapó Octubre 2015	Background	048	396567	6915535	-	
Qf-2.3 sup	Copiapó Octubre 2015	Background	048	396567	6915535	-	

Qf-2.3 prof	Copiapó Octubre 2015	Background	048	396567	6915535	-
Qf-2.4	Copiapó Octubre 2015	Background	049	396769	6915652	-
Qf-2.4 sup	Copiapó Octubre 2015	Background	049	396769	6915652	-
Qf-2.4 prof	Copiapó Octubre 2015	Background	049	396769	6915652	-
Qf-2.5	Copiapó Octubre 2015	Background	050	396693	6915707	-
Qf-2.5 sup	Copiapó Octubre 2015	Background	050	396693	6915707	-
Qf-2.5 prof	Copiapó Octubre 2015	Background	050	396693	6915707	-
Ki2c-2.1	Copiapó Octubre 2015	Background	051	385227	6981409	-
Ki2c-2.2	Copiapó Octubre 2015	Background	052	385204	6981441	-
Ki2c-2.3	Copiapó Octubre 2015	Background	053	385196	6981440	-
Ki2c-2.3 superficial	Copiapó Octubre 2015	Background	053	385196	6981440	-
Ki2c-2.3 profundo	Copiapó Octubre 2015	Background	053	385196	6981440	-
Ki2c-2.4	Copiapó Octubre 2015	Background	054	385222	6981452	-
Ki2c-2.5	Copiapó Octubre 2015	Background	055	385226	6981458	-
Ki2c-2.5 superficial	Copiapó Octubre 2015	Background	055	385226	6981458	-
Ki2c-2.5 profundo	Copiapó Octubre 2015	Background	055	385226	6981458	-
Qa-2.1	Copiapó Octubre 2015	Background	056	385219	6981468	-
Qa-2.1 superficial	Copiapó Octubre 2015	Background	056	385219	6981468	-
Qa-2.1 profundo	Copiapó Octubre 2015	Background	056	385219	6981468	-
Qa-2.2	Copiapó Octubre 2015	Background	057	397243	6982399	-
Qa-2.3	Copiapó Octubre 2015	Background	058	397317	6982621	-
Qa-2.4	Copiapó Octubre 2015	Background	059	397293	6982701	-
Qa-2.5	Copiapó Octubre 2015	Background	060	397476	6982627	-
Qa-2.5 superficial	Copiapó Octubre 2015	Background	060	397476	6982627	-
Qa-2.5 profundo	Copiapó Octubre 2015	Background	060	397476	6982627	-
Qa-1.1	Copiapó Octubre 2015	Background	061	397092	6976655	-
Qa-1.1 superficial	Copiapó Octubre 2015	Background	061	397092	6976655	-
Qa-1.1 profundo	Copiapó Octubre 2015	Background	061	397092	6976655	-
Qa-1.2	Copiapó Octubre 2015	Background	062	397099	6976551	-
Qa-1.2 superficial	Copiapó Octubre 2015	Background	062	397099	6976551	-
Qa-1.2 profundo	Copiapó Octubre 2015	Background	062	397099	6976551	-
Qa-1.3	Copiapó Octubre 2015	Background	063B	396999	6976548	-
Qa-1.4	Copiapó Octubre 2015	Background	064	396993	6976551	-
Qa-1.5	Copiapó Octubre 2015	Background	065	396827	6976787	-
Ki1m-1.1	Copiapó Octubre 2015	Background	066	380455	6968250	-
Ki1m-1.2	Copiapó Octubre 2015	Background	067	380410	6968247	-
Ki1m-1.3	Copiapó Octubre 2015	Background	068	380361	6968266	-
Ki1m-1.4	Copiapó Octubre 2015	Background	069	380338	6968214	-
Ki1m-1.5	Copiapó Octubre 2015	Background	070	380453	6968204	-

JK3-1.1	Copiapó Octubre 2015	Background	071	379159	6971637	-
JK3-1.2	Copiapó Octubre 2015	Background	072	379147	6971612	-
JK3-1.3	Copiapó Octubre 2015	Background	073	379076	6971546	-
JK3-1.4	Copiapó Octubre 2015	Background	074	379013	6971564	-
JK3-1.4 superficial	Copiapó Octubre 2015	Background	074	379013	6971564	-
JK3-1.4 profundo	Copiapó Octubre 2015	Background	074	379013	6971564	-
JK3-1.5	Copiapó Octubre 2015	Background	075	378924	6971636	-
JK3-2.1	Copiapó Octubre 2015	Background	076	379709	6971763	-
JK3-2.2	Copiapó Octubre 2015	Background	077	379659	6971754	-
JK3-2.2 superficial	Copiapó Octubre 2015	Background	077	379659	6971754	-
JK3-2.2 profundo	Copiapó Octubre 2015	Background	077	379659	6971754	-
JK3-2.3	Copiapó Octubre 2015	Background	078	379660	6971755	-
JK3-2.4	Copiapó Octubre 2015	Background	079	379612	6971735	-
JK3-2.5	Copiapó Octubre 2015	Background	080	379643	6971656	-
Kiag-1.1	Copiapó Octubre 2015	Background	081	361891	6967730	-
Kiag-1.1 superficial	Copiapó Octubre 2015	Background	081	361891	6967730	-
Kiag-1.1 profunda	Copiapó Octubre 2015	Background	081	361891	6967730	-
Kiag-1.2	Copiapó Octubre 2015	Background	082	361399	6967843	-
Kiag-1.3	Copiapó Octubre 2015	Background	083	361460	6967518	-
Kiag-1.4	Copiapó Octubre 2015	Background	084	361478	6967365	-
Kiag-1.5	Copiapó Octubre 2015	Background	085	361423	6967228	-
Kiag-2.1	Copiapó Octubre 2015	Background	086B	365932	6969960	-
Kiag-2.2	Copiapó Octubre 2015	Background	087B	365897	6969956	-
Kiag-2.3	Copiapó Octubre 2015	Background	088B	365853	6969989	-
Kiag-2.4	Copiapó Octubre 2015	Background	089	365962	6969990	-
Kiag-2.5	Copiapó Octubre 2015	Background	090	366014	6970031	-
Ki1m-2.1	Copiapó Octubre 2015	Background	091B	380220	6959033	-
Ki1m-2.1 superficial	Copiapó Octubre 2015	Background	091B	380220	6959033	-
Ki1m-2.1 profunda	Copiapó Octubre 2015	Background	091B	380220	6959033	-
Ki1m-2.2	Copiapó Octubre 2015	Background	092	380320	6958979	-
Ki1m-2.3	Copiapó Octubre 2015	Background	093	380412	6958900	-
Ki1m-2.4	Copiapó Octubre 2015	Background	094	380476	6958943	-
Ki1m-2.5	Copiapó Octubre 2015	Background	095	380543	6958965	-
Ki2c-1.1	Copiapó Octubre 2015	Background	101	373172	6972266	-
Ki2c-1.2	Copiapó Octubre 2015	Background	102	373205	6972271	-
Ki2c-1.2 superficial	Copiapó Octubre 2015	Background	102	373205	6972271	-
Ki2c-1.2 profundo	Copiapó Octubre 2015	Background	102	373205	6972271	-
Ki2c-1.3	Copiapó Octubre 2015	Background	103	373161	6972471	-
Ki2c-1.4	Copiapó Octubre 2015	Background	104	373159	6972493	-

Ki2c-1.5	Copiapó Octubre 2015	Background	105	373016	6972962	-
RSE-1	Copiapó Octubre 2015	Relave	130	370073	6969029	San Esteban
RSE-2	Copiapó Octubre 2015	Relave	131	370092	6969000	San Esteban
RSE-3	Copiapó Octubre 2015	Relave	132	370100	6968981	San Esteban
RSE-4	Copiapó Octubre 2015	Relave	133	370113	6968965	San Esteban
RSE-5	Copiapó Octubre 2015	Relave	134	370121	6968947	San Esteban
RSE-6	Copiapó Octubre 2015	Relave	135	370139	6968921	San Esteban
RSE-7	Copiapó Octubre 2015	Relave	136	370147	6968933	San Esteban
RSE-8	Copiapó Octubre 2015	Relave	137	370133	6968959	San Esteban
RSE-9	Copiapó Octubre 2015	Relave	138	370124	6968977	San Esteban
RSE-10	Copiapó Octubre 2015	Relave	139	370118	6968995	San Esteban
RSE-11	Copiapó Octubre 2015	Relave	140	370112	6969009	San Esteban
RSE-12	Copiapó Octubre 2015	Relave	141	370108	6969028	San Esteban
RSE-13	Copiapó Octubre 2015	Relave	142	370119	6969032	San Esteban
RSE-14	Copiapó Octubre 2015	Relave	143	370124	6969013	San Esteban
RSE-15	Copiapó Octubre 2015	Relave	144	370129	6969001	San Esteban
RSE-16	Copiapó Octubre 2015	Relave	145	370142	6968977	San Esteban
RSE-17	Copiapó Octubre 2015	Relave	146	370156	6968950	San Esteban
RSE-18	Copiapó Octubre 2015	Relave	147	370157	6968966	San Esteban
RSE-19	Copiapó Octubre 2015	Relave	148	370147	6968992	San Esteban
RSE-20	Copiapó Octubre 2015	Relave	149	370150	6969008	San Esteban
RSE-21	Copiapó Octubre 2015	Relave	150	370163	6968989	San Esteban
RSE-22	Copiapó Octubre 2015	Relave	151	370120	6968912	San Esteban
RSE-23	Copiapó Octubre 2015	Relave	152	370153	6968940	San Esteban
RSE-24	Copiapó Octubre 2015	Relave	153	370169	6968954	San Esteban
RSE-25	Copiapó Octubre 2015	Relave	154	370170	6968958	San Esteban
RSE-26	Copiapó Octubre 2015	Relave	155	370180	6969010	San Esteban
RSE-27	Copiapó Octubre 2015	Relave	156	370184	6969035	San Esteban
RSE-28	Copiapó Octubre 2015	Relave	157	370163	6969049	San Esteban
RSE-29	Copiapó Octubre 2015	Relave	158	370156	6969064	San Esteban
RSE-30	Copiapó Octubre 2015	Relave	159	370197	6969049	San Esteban
P1	Copiapó Agosto 2016	Polvo	285	368588	6969774	-
P3	Copiapó Agosto 2016	Polvo	286	368630	6969803	-
P4	Copiapó Agosto 2016	Polvo	288	368710	6969864	-
P5	Copiapó Agosto 2016	Polvo	289	368795	6969913	-
P6	Copiapó Agosto 2016	Polvo	297	368543	6969790	-
P7	Copiapó Agosto 2016	Polvo	298	368605	6969834	-
P8	Copiapó Agosto 2016	Polvo	299	368651	6969869	-
P9	Copiapó Agosto 2016	Polvo	P9	368691	6969897	-

P10	Copiapó Agosto 2016	Polvo	290	368771	6969952	-
P11	Copiapó Agosto 2016	Polvo	300	368862	6970010	-
P12	Copiapó Agosto 2016	Polvo	301	368942	6970081	-
P13	Copiapó Agosto 2016	Polvo	302	369038	6970165	-
P14	Copiapó Agosto 2016	Polvo	296	368501	6969792	-
P15	Copiapó Agosto 2016	Polvo	295	368515	6969833	-
P16	Copiapó Agosto 2016	Polvo	294	368545	6969881	-
P17	Copiapó Agosto 2016	Polvo	293	368611	6969916	-
P18	Copiapó Agosto 2016	Polvo	292	368662	6969948	-
P19	Copiapó Agosto 2016	Polvo	291	368737	6969995	-

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO B : CARACTERÍSTICAS DE MUESTRAS DE LODO EN TRANSECTOS DE ESTUDIO

Tabla B - 1: Detalle de muestras obtenidas según campaña a terreno concentraciones en mg/kg.

Nombre	Flujo	Punto	Al	As	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sr	Ti	V	Zn	Hg
L233-1	Paipote	1	25764	26	29145	18	20	101	34341	28	13060	865	956	18	782	33	139	1320	79	128	1,9
L233-2	Paipote	1	17998	21	25211	14	15	79	30361	21	10257	738	769	12	615	26	110	1271	81	101	1,1
L234-1	Paipote	1	36541	17	40365	17	16	71	35181	31	16844	850	1147	17	969	15	217	922	79	90	0,6
L234-2	Paipote	1	38743	18	39623	18	18	77	36107	32	16833	869	1265	18	989	16	205	1112	84	98	0,7
R230-1	Paipote	2	18986	25	23470	17	22	82	40094	22	10431	826	819	15	638	30	104	1301	103	116	1,4
R230-2	Paipote	2	22249	28	27923	17	16	113	35703	23	11260	819	1130	13	657	29	129	1526	87	121	1,5
L229-1	Paipote	3	20495	25	25726	16	18	125	34964	24	11523	820	914	13	641	30	120	1236	85	122	1,5
L235-1	Paipote	3	19402	27	24392	16	17	81	34718	22	10567	822	997	14	618	26	110	1250	85	111	1,3
L235-2	Paipote	3	20163	26	24516	15	17	94	33509	24	10861	774	934	14	696	32	115	1196	79	122	1,6
L235-3	Paipote	3	20245	27	26646	16	16	108	35754	24	11282	903	880	13	638	33	125	1277	86	129	1,4
T1-1	Paipote	3	26893	36	28847	18	17	158	36738	30	13572	967	1027	14	714	45	131	1487	84	157	2,9
T1-3	Paipote	4	20643	27	25458	16	16	120	34502	25	11629	830	1125	12	628	29	144	1224	85	127	1,1
T1-4	Paipote	5	17428	21	22115	14	16	67	32553	20	9880	781	842	12	596	24	94	1198	80	100	1,4
T1-5	Paipote	5	16412	18	22742	13	16	55	31681	19	9569	700	852	12	594	19	95	1220	79	89	1,0
T2-1	Paipote	6	27000	19	36676	17	20	69	35102	27	13356	847	1178	17	849	19	177	1514	83	99	0,9
T2-2	Paipote	6	23894	31	26925	17	16	142	33877	28	12755	885	1049	14	685	34	119	1136	76	127	1,7
T2-3	Paipote	6	19489	20	24758	15	17	69	34160	21	10514	724	907	13	654	27	130	1449	90	98	0,7
T3-3	Paipote	7	36650	43	32790	22	15	260	38463	38	17437	1206	1153	15	785	44	134	1303	81	158	2,1
T3-4	Paipote	7	22876	20	29926	16	20	78	35751	23	11915	807	1115	15	731	22	138	1512	90	99	1,0
T4-2	Paipote	8	26101	25	34302	19	21	108	38735	27	13737	912	1145	17	781	30	155	1590	93	127	1,3
T2-4	Copiapó	1	21841	18	65333	16	27	55	35151	32	11092	787	725	26	1109	18	191	1822	77	85	0,1
T3-1	Copiapó	2	18265	15	42127	15	19	51	33579	26	10218	753	957	16	801	17	146	1729	82	79	0,1
L238-1	Copiapó	3	19420	18	25600	16	18	69	35787	23	10893	779	884	14	695	23	118	1312	87	101	1,0
L238-2	Copiapó	3	24164	23	27713	16	20	76	35323	26	12008	826	909	17	740	29	140	1414	82	114	1,3
T4-5	Copiapó	4	21100	18	53617	18	28	66	40581	31	11654	845	761	23	1058	21	164	1979	97	91	0,1
T4-5B	Copiapó	4	17977	21	42875	19	22	69	40298	24	11728	972	986	16	802	23	152	1954	103	98	0,2
L240-1	Copiapó	5	21319	22	29906	16	22	173	39877	22	11454	842	1145	15	742	23	133	1674	107	107	0,9
L240-2	Copiapó	5	24762	24	30334	17	21	88	36363	26	12793	864	1086	17	774	27	144	1508	87	120	1,6
L240-3	Copiapó	5	25822	21	33459	17	21	101	35701	26	13377	859	1198	17	786	24	157	1420	85	109	1,7
R213-3	Copiapó	5	23591	20	27743	17	21	73	37643	27	12330	849	950	17	739	28	122	1479	86	116	1,2
T4-3	Copiapó	5	26086	24	35426	20	22	99	38564	27	13841	893	1301	18	811	28	162	1583	94	119	1,1
L218	Copiapó	6	24952	23	24573	18	19	117	35209	27	12100	835	859	17	718	35	127	1376	79	121	1,5
T5-1	Copiapó	7	32131	24	38255	21	23	106	38308	31	15863	957	1385	20	906	26	180	1574	88	122	1,4

T5-3	Copiapó	7	39346	31	39788	22	24	137	40717	39	18703	1055	1769	22	961	34	183	1473	87	154	2,5
T5-4	Copiapó	7	25677	25	31158	18	22	88	37952	28	13094	881	1073	18	794	31	147	1525	88	125	1,3
T5-6	Copiapó	7	21556	19	57228	17	22	62	32696	29	11474	773	1112	21	939	19	195	1661	74	92	0,3
T5-7	Copiapó	7	27443	20	33944	19	22	99	38881	29	13551	862	1061	18	849	25	157	1626	95	112	0,9
T6-1	Copiapó	8	28182	25	33348	19	22	95	38015	30	14072	945	1139	20	866	35	154	1495	87	132	1,6
T6-2	Copiapó	8	27918	22	34964	20	18	85	40461	28	13392	1043	1288	15	729	24	161	1490	101	111	0,2
T6-3	Copiapó	8	30114	22	37222	19	24	77	38780	29	14458	896	1279	19	872	22	181	1715	96	110	0,7
T6-4	Copiapó	8	29394	20	39168	17	20	73	34292	27	13783	820	1405	17	847	21	206	1644	81	102	0,7

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO C : DESCRIPCIÓN DE FORMACIONES GEOLÓGICAS

Tabla C-1: Descripción de formaciones geológicas y su época de formación.

	Época de formación	Descripción
Qf	Pleistoceno-Holoceno	Depósitos fluviales: gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas sub-actuales y llanuras de inundación
Kiag	Cretácico inferior alto-Cretácico Superior bajo	Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita. En la Cordillera de la Costa, regiones II a IV, al este del Sistema de Fallas Atacama-El Romeral y asociados a mineralización de Fe-Cu-Au (Candelaria) y Cu-Au (Andacollo); en la Cordillera de la Costa, regiones V a X.
Qa	Pleistoceno-Holoceno	Depósitos aluviales, subordinadamente coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. En la Depresión Central, regiones I a III: abanicos aluviales.
Ki2c	Cretácico inferior alto-Cretácico Superior	Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales, con escasas intercalaciones marinas: brechas sedimentarias y volcánicas, lavas andesíticas, ocoítas, conglomerados, areniscas, limolitas calcáreas lacustres con flora fósil; localmente calizas fosilíferas marinas en la base. En Cordillera de la Costa, regiones IV, V y Metropolitana: formaciones Quebrada Marquesa y Veta Negra.
JK3	Jurásico Superior-Cretácico inferior	Secuencias volcánicas: lavas basálticas a riolíticas, domos, brechas y aglomerados andesíticos a dacíticos con intercalaciones clásticas continentales y marinas. En la Precordillera, regiones I, III y IV: formaciones Punta del Cobre y Arqueros.
Ki1m	Cretácico inferior	Secuencias sedimentarias marinas litorales: calizas, calcarenitas, areniscas, margas y coquinas. En las regiones I a IV: formaciones Blanco, El Way, Grupo Chañarcillo y Río Tascadero.

Fuente: Elaboración propia en base a SERNAGEOMIN (2003).

ANEXO D : MAPAS DE CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS EN RELAVES

Cobalto

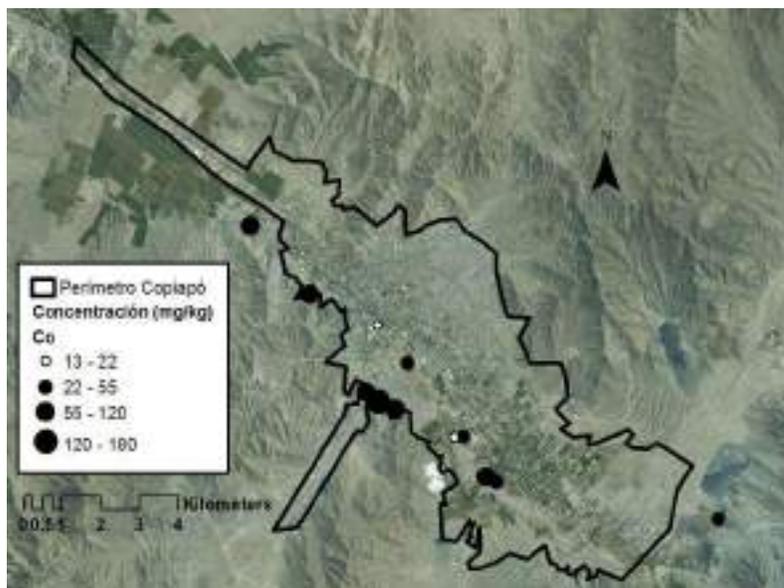


Figura D - 1: Concentración de Co en mg/kg para relaves muestreados en campañas y por CENMA.
Fuente: Elaboración propia.

Manganeso

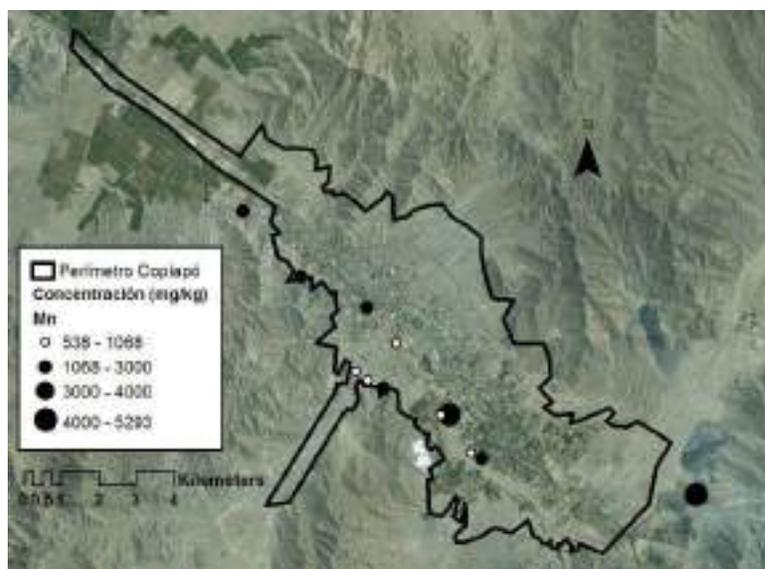


Figura D - 2: Concentración de Mn en mg/kg para relaves muestreados en campañas y por CENMA.
Fuente: Elaboración propia.

Hierro

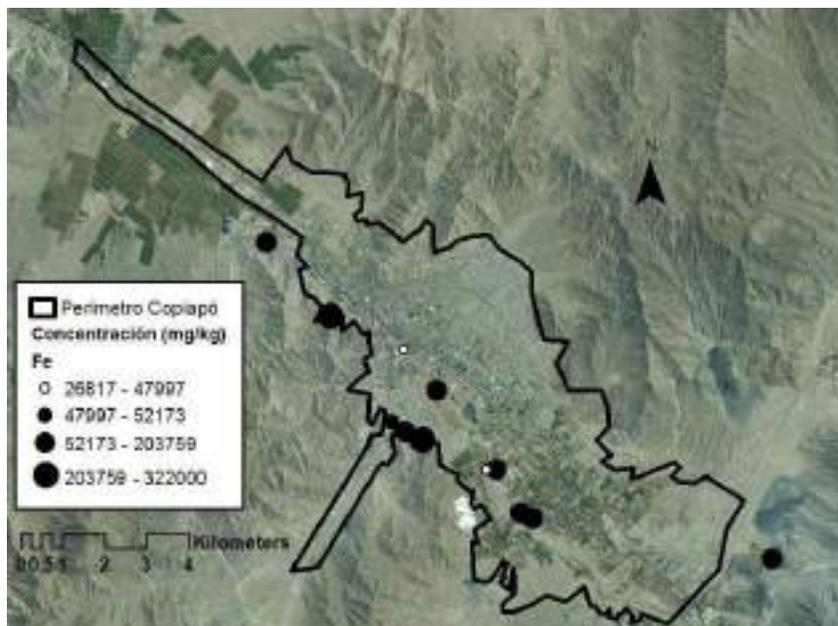


Figura D - 3: Concentración de Fe en mg/kg para relaves muestreados en campañas y por CENMA.
Fuente: Elaboración propia.

Plomo

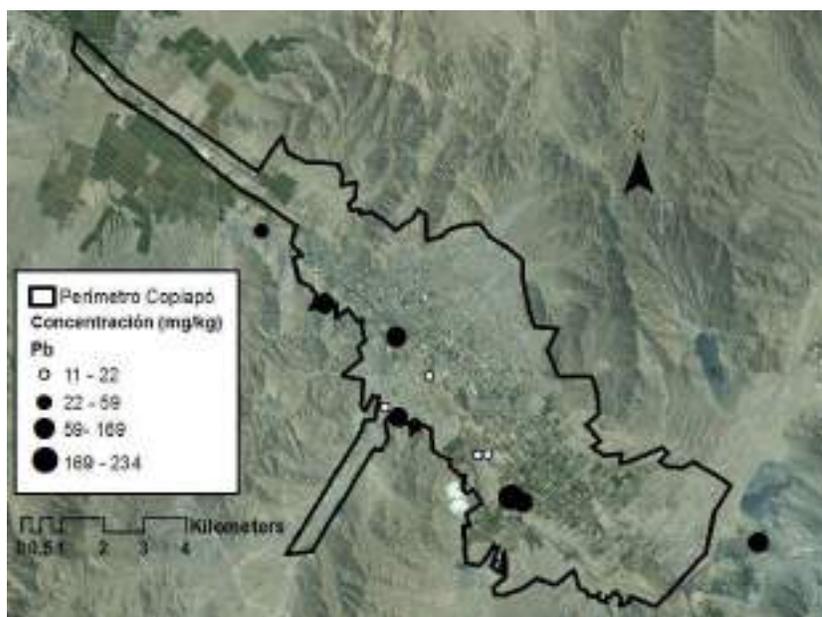


Figura D - 4: Concentración de Pb en mg/kg para relaves muestreados en campañas y por CENMA.
Fuente: Elaboración propia.

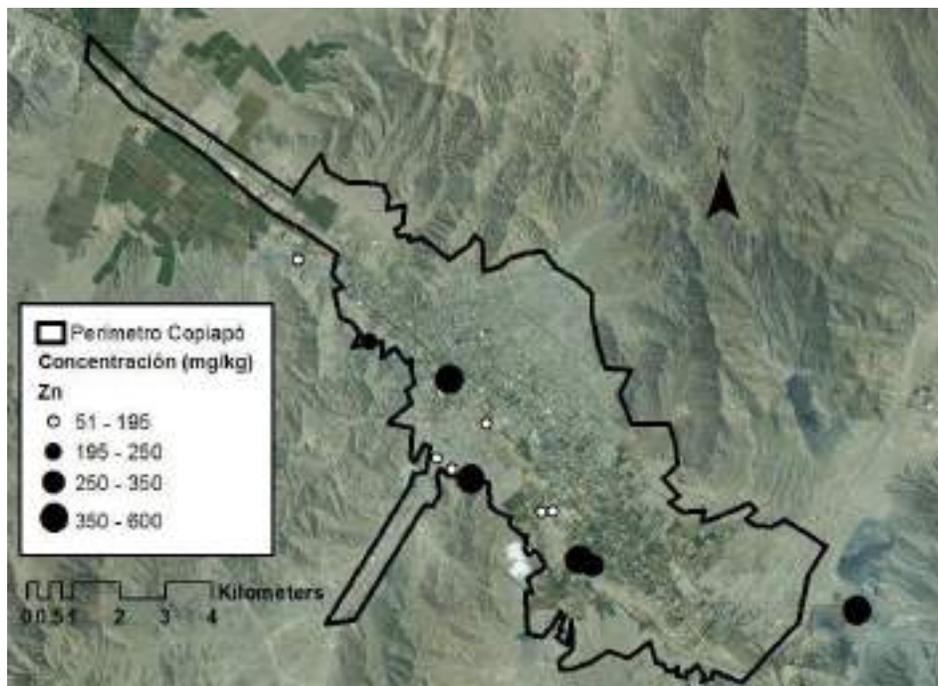
Zinc

Figura D - 5: Concentración de Zn en mg/kg para relaves muestreados en campañas y por CENMA.
Fuente: Elaboración propia.

ANEXO E : CALIDAD DE RESULTADOS

Tabla E-1: Desviación estándar relativa promedio (%) según elemento y matriz sólida.

RSD Promedio (%)	Suelo	Lodo	Polvo de Calles	Background
Al	4,7	2,7	5,5	5,7
As	6,9	4,7	8,3	7,0
Ca	9,8	2,0	4,6	6,8
Co	10,8	1,6	9,1	4,9
Cr	5,3	2,6	9,1	7,4
Cu	11,5	1,5	7,9	13,0
Fe	9,0	1,4	5,4	6,9
Li	2,4	1,3	4,0	5,0
Mg	2,2	1,5	4,5	4,9
Mn	5,1	1,1	7,4	6,1
Na	4,9	1,6	8,6	7,2
Ni	5,9	1,0	6,7	7,4
P	1,4	2,2	5,6	5,5
Pb	4,1	2,5	9,8	13,3
Sr	3,9	0,9	7,4	8,5
Ti	9,8	3,9	8,9	10,8
V	9,3	2,1	6,2	8,4
Zn	2,6	1,2	8,7	8,2
Hg	15,1	10,3	12,0	14,0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E-2: Desviación estándar relativa máxima según elemento y matriz sólida.

RSD máximo (%)	Suelo	Lodo	Polvo de Calles	Background
Al	5,8	3,8	13,1	10,6
As	11,1	10,2	24,2	10,1
Ca	15,3	3,8	12,9	16,9
Co	16,4	2,4	23,2	13,3
Cr	6,7	4,3	14,5	15,8
Cu	13,8	2,7	16,6	21,5
Fe	15,8	2,6	13,5	18,7
Li	3,5	2,1	9,5	10,0
Mg	3,0	2,7	11,2	10,7
Mn	6,0	1,7	10,3	8,8
Na	7,5	3,9	20,1	11,9
Ni	7,8	1,5	11,6	10,2
P	1,8	6,2	11,5	8,7
Pb	4,9	4,5	17,4	27,3
Sr	4,6	1,9	18,2	19,2
Ti	14,2	6,8	12,1	28,0
V	16,7	3,1	13,7	15,1
Zn	2,8	2,4	22,0	14,1
Hg	24,6	21,3	21,8	55,4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E-3: Desviación estándar relativa mínima según elemento y matriz sólida.

RSD % mínimo	Suelo	Lodo	Polvo de Calles	Background
Al	3,6	1,0	2,9	0,7
As	2,8	0,8	0,8	3,6
Ca	4,3	0,3	0,6	0,5
Co	5,2	1,0	1,8	0,4
Cr	3,9	1,6	2,4	2,8
Cu	9,3	1,1	1,0	2,0
Fe	2,2	0,4	0,8	0,9
Li	1,3	0,4	1,2	0,5
Mg	1,3	0,5	0,9	0,9
Mn	4,2	0,5	0,7	2,0
Na	2,3	0,3	1,5	0,8
Ni	4,1	0,7	1,1	1,8
P	1,0	0,4	0,5	2,4
Pb	3,3	1,5	2,1	2,3
Sr	3,1	0,2	0,6	1,4
Ti	5,4	1,8	6,0	2,9
V	1,8	0,7	1,6	1,4
Zn	2,4	0,6	0,4	0,7
Hg	4,9	1,2	4,8	1,0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E – 4: Concentración elemental en material de referencia certificado LGC6187.

LGC6187	Concentración (mg/kg)	Desviación estándar (mg/kg)
As	24	3,2
Cd	2,7	0,3
Cr	84	9,4
Cu	83,6	4,1
Fe	23.600	1.500
Pb	77,2	4,5
Mn	1240	60
Hg	1,4	0,1
Ni	34,7	1,7
Se	1,2	0,2
Sn	6,8	1,8
V	38,3	6,5
Zn	439	26

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E – 5: Concentración elemental en material de referencia certificado IAEA-158.

IAEA-158	Concentración (mg/kg)	Desviación estándar (mg/kg)
Ag	0,18	0,0033
As	11,5	1,2
Cd	0,372	0,039
Ce	61,1	5,4
Co	9,2	1,1
Cr	74,4	5,8
Cs	3,73	0,34
Cu	48,3	4,2
Eu	1.079	0,061
Ln	30,2	2,2
Mn	356	24
Ni	30,3	2,9
Pb	39,6	4,7
Rb	82	10
Sb	1,34	0,18
Sm	4,94	0,32
Sn	5,84	0,82
Sr	473	25
U	2,42	0,28
V	73	3,7
Zn	140,6	9,5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E-6: Ajuste promedio a LGC6187 según elemento y matriz sólida.

Ajuste promedio LGC6187 %	Suelo	Lodo	Polvo de Calles	Background
Al	-	-	-	-
As	104,4	102,2	106,2	101,7
Ca	-	-	-	-
Co	-	-	-	-
Cr	93,2	94,3	95,0	96,8
Cu	116,3	128,8	95,3	97,1
Fe	92,7	97,3	97,7	102,1
Li	-	-	-	-
Mg	-	-	-	-
Mn	91,8	95,0	93,8	96,7
Na	-	-	-	-
Ni	93,2	96,3	93,4	96,3
P	-	-	-	-
Pb	96,0	98,5	95,4	95,2
Sr	-	-	-	-
Ti	-	-	-	-
V	100,9	99,4	101,4	103,6
Zn	96,5	102,3	96,8	100,0
Hg	102,2	107,9	102,0	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E-7: Ajuste máximo a LGC6187 según elemento y matriz sólida.

Ajuste máximo LGC6187 %	Suelo	Lodo	Polvo de Calles	Background
Al	-	-	-	-
As	145,9	122,1	145,9	106,0
Ca	-	-	-	-
Co	-	-	-	-
Cr	96,3	104,1	99,1	100,3
Cu	276,0	494,0	99,4	99,3
Fe	104,8	109,4	104,8	106,5
Li	-	-	-	-
Mg	-	-	-	-
Mn	99,4	105,5	99,4	98,8
Na	-	-	-	-
Ni	107,2	108,6	99,8	100,8
P	-	-	-	-
Pb	110,7	125,8	113,6	99,9
Sr	-	-	-	-
Ti	-	-	-	-
V	104,9	107,3	106,2	109,5
Zn	107,6	147,4	101,6	103,8
Hg	106,2	111,4	111,7	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E-8: Ajuste promedio a LGC6187 según elemento y matriz sólida.

Ajuste mínimo LGC6187 %	Suelo	Lodo	Polvo de Calles	Background
Al	-	-	-	-
As	91,9	65,8	90,7	96,8
Ca	-	-	-	-
Co	-	-	-	-
Cr	88,4	85,9	91,8	92,4
Cu	89,0	91,0	90,9	95,6
Fe	82,2	86,3	86,6	98,6
Li	-	-	-	-
Mg	-	-	-	-
Mn	85,8	89,5	88,3	94,3
Na	-	-	-	-
Ni	86,1	90,9	80,1	91,5
P	-	-	-	-
Pb	87,0	80,2	80,2	92,5
Sr	-	-	-	-
Ti	-	-	-	-
V	95,3	94,0	94,2	96,4
Zn	92,4	91,5	92,8	96,9
Hg	98,3	104,4	95,7	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E-9: Ajuste promedio a IAEA-158 según elemento y matriz sólida.

Ajuste promedio IAEA-158 (%)	Suelo	Lodo	Polvo de Calles	Background
Al	23,5	24,7	24,3	25,2
As	122,9	107,9	111,3	94,4
Ca	90,0	94,2	95,7	98,5
Co	84,1	86,1	79,2	92,8
Cr	58,5	59,4	59,1	61,2
Cu	85,1	95,1	86,3	93,4
Fe	76,8	81,2	80,0	84,9
Li	77,3	78,0	75,6	80,4
Mg	81,8	84,0	82,3	89,1
Mn	77,3	79,2	77,9	81,0
Na	60,5	61,1	59,7	63,2
Ni	77,7	80,6	76,8	82,6
P	-	-	-	-
Pb	85,0	86,9	88,6	87,4
Sr	69,8	71,5	69,5	72,6
Ti	22,6	23,6	23,1	24,7
V	59,3	60,9	59,6	60,8
Zn	89,9	89,1	90,8	96,7

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E-10: Ajuste máximo a IAEA-158 según elemento y matriz sólida.

Ajuste máximo IAEA-158 (%)	Suelo	Lodo	Polvo de Calles	Background
Al	24,9	26,3	25,9	26,4
As	266,0	196,7	266,0	99,4
Ca	99,1	102,3	105,2	103,1
Co	101,0	108,4	93,3	97,7
Cr	61,8	64,8	63,0	64,0
Cu	88,7	103,4	91,4	97,1
Fe	82,6	87,6	86,1	88,8
Li	82,7	84,8	80,9	85,0
Mg	88,4	90,7	89,6	94,7
Mn	81,3	83,9	81,6	84,9
Na	70,5	73,2	70,5	75,1
Ni	90,0	87,3	86,3	87,5
P	-	-	-	-
Pb	104,0	122,3	123,0	94,6
Sr	73,7	75,9	73,0	73,9
Ti	23,7	25,4	25,0	26,6
V	62,1	64,7	62,6	62,4
Zn	100,4	98,7	95,7	102,0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E-11: Ajuste mínimo a IAEA-158 según elemento y matriz sólida.

Ajuste mínimo IAEA-158 %	Suelo	Lodo	Polvo de Calles	Background
Al	22,4	23,2	22,6	23,7
As	85,3	75,5	7,7	88,8
Ca	75,7	81,4	83,5	95,0
Co	65,2	63,5	53,0	87,7
Cr	56,1	48,6	55,6	57,5
Cu	81,3	89,3	81,9	90,9
Fe	67,8	71,6	69,3	82,5
Li	72,6	70,0	69,0	75,4
Mg	73,9	77,0	73,9	86,0
Mn	73,0	73,7	73,0	78,4
Na	50,1	51,7	49,9	51,8
Ni	61,3	76,2	61,3	77,2
P	-	-	-	-
Pb	75,5	67,4	76,9	78,7
Sr	64,0	66,1	64,0	70,9
Ti	21,4	22,0	21,4	22,6
V	56,8	58,2	56,8	58,2
Zn	73,2	71,1	85,0	88,5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E-12: Valores máximos en blancos según elemento y matriz sólida.

Máximo en Blancos	Suelo	Lodo	Polvo de Calles	Background
Al	< LQ	< LQ	< LQ	17,5
As	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Ca	< LQ	< LQ	< LQ	97,4
Co	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Cr	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Cu	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Fe	< LQ	< LQ	< LQ	19,6
Li	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Mg	< LQ	< LQ	< LQ	13,4
Mn	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Na	< LQ	< LQ	< LQ	300
Ni	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
P	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Pb	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Sr	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Ti	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
V	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Zn	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Hg	0,001432167	0,000452154	0,0010251	< LQ

Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO F : CONCENTRACIONES ELEMENTALES DE MUESTRAS DE
SUELO EN MG/KG.**

Tabla F - 1: Concentraciones elementales de muestras de suelo (< 2mm) en mg/kg.

Muestra	Al	As	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sr	Ti	V	Zn	Hg
S102	23608	43	60783	18	23	285	31818	47	15089	2019	1438	20	3350	29	230	1366	74	125	1,52
S104	14010	16	36286	48	14	148	49009	25	9630	722	2857	18	2660	13	157	850	107	76	0,59
S107	18445	115	30432	17	19	223	35454	27	10797	985	1022	15	2491	56	121	1135	93	188	0,54
S109	14863	22	28209	33	17	134	56582	24	9338	968	1202	22	2465	15	126	945	132	76	0,43
S111	18514	34	40623	16	14	103	29689	36	13083	2399	10631	13	2476	17	193	925	63	140	0,24
S122	11055	14	63527	28	13	845	67156	14	9420	3533	1021	11	1569	11	78	658	59	48	0,20
S123	22655	33	37104	16	23	208	33257	34	11846	940	958	20	4592	36	189	1413	75	167	1,41
S124	5072	25	109731	110	11	4013	44199	4	7131	3211	1229	10	920	76	40	235	30	47	0,85
S125	23597	35	39253	18	23	268	31884	38	13317	865	958	21	3146	40	194	1367	71	151	2,46
S126	17385	27	28005	13	20	141	27088	29	9774	720	913	18	2823	33	149	1164	61	131	1,83
S129	22640	32	36635	16	22	219	30327	36	12410	829	944	19	3775	36	185	1238	67	141	1,98
S130	21263	34	38079	17	24	356	30043	34	11944	827	1050	19	3757	38	195	1363	68	136	2,66
S131	14151	15	42189	11	14	117	24477	23	9000	577	1864	11	2653	22	304	1002	58	103	0,55
S132	15898	17	23248	13	16	207	29526	23	9002	552	1413	12	2803	28	112	1229	77	97	0,67
S133	18925	16	24537	15	18	70	34254	24	10507	788	1259	13	2442	15	125	1335	96	76	0,18
S134	18140	26	35304	33	21	1086	36362	27	10929	1156	939	16	3108	27	143	1173	76	116	1,07
S135	17821	28	31270	13	20	143	27165	29	10078	679	976	17	3047	26	170	1307	63	113	1,86
S136	20109	19	29426	15	18	80	31994	27	10594	647	1033	13	2192	18	147	1359	83	85	0,41
S137	21276	30	33217	15	22	146	31616	33	11761	798	983	18	2856	29	177	1476	77	122	1,15
S138	22333	28	36186	16	21	221	29610	35	12653	808	845	19	2955	25	179	1304	67	107	1,69
S140	24440	37	44215	16	26	132	32879	44	13677	902	1110	24	3258	28	206	1369	72	129	1,81
S141	19521	22	29313	16	19	139	34349	29	11626	864	1157	15	4492	25	154	1347	82	125	0,51
S142	24716	41	43002	17	26	271	34709	43	14101	909	1085	24	3519	29	199	1262	74	148	1,06
S143	25782	39	42226	17	24	198	34056	43	14454	935	1314	20	3739	36	220	1506	79	140	1,56
S144	22399	53	40610	16	22	186	31414	36	12939	860	1222	20	6413	92	215	1416	75	287	4,91
S145	24578	49	28724	17	18	311	33733	31	13754	885	750	15	3109	79	138	1278	82	224	1,13
S154	18248	21	48779	15	20	233	29833	31	11577	829	1322	15	4397	22	199	1202	68	122	1,28
S155	8393	11	17146	8	13	44	20034	12	5718	377	1877	7	2241	6	73	841	66	42	0,08
S156	18627	20	33577	14	19	85	30572	36	12424	728	5073	14	2624	21	190	1296	77	104	0,67
S157	14314	122	37470	16	16	425	22542	23	9059	734	1488	14	3985	410	199	891	58	506	70,00
S159	17506	20	37975	13	18	145	26527	25	10222	805	1200	12	5004	51	197	1137	67	143	1,66
S161	9960	14	11653	9	15	37	25617	21	6142	663	813	10	2018	33	70	967	67	64	0,35
S163	16333	18	36690	13	17	154	28690	26	10596	697	2009	12	3402	36	180	1124	72	107	1,03

S165	11372	15	16574	10	13	128	19723	16	6659	440	1057	8	2543	24	92	819	57	80	1,34
S167	11578	13	19071	10	15	68	26825	15	7303	479	992	9	2199	10	83	1068	77	56	0,27
S169	18745	45	52132	20	19	754	34003	35	13203	1585	2414	16	3645	36	200	1279	71	155	0,93
S171	21507	14	28281	14	16	73	28013	28	12315	637	17788	13	2106	14	166	1058	66	74	0,12
S174	10261	13	13026	9	16	40	26497	17	5987	454	771	11	1873	10	79	982	67	49	0,26
S178	18422	22	33302	63	19	150	59346	27	11087	993	1485	24	2823	18	141	1155	139	84	0,35
S179	18606	19	43159	13	19	103	26454	29	10797	723	2097	14	2837	16	221	1229	66	80	0,83
S180	15073	19	39075	38	17	432	32053	24	9908	669	3048	12	2650	17	202	987	73	74	0,79
S183	14846	16	26455	12	14	133	28082	23	9450	818	2536	10	2565	17	120	1115	72	119	0,29

Fuente: Elaboración propia.

Tabla F - 2: Concentraciones elementales de muestras de suelo (< 53µm) en mg/kg.

Muestra	Al	As	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sr	Ti	V	Zn	Hg
S102	24937	44	54639	20	25	397	35431	47	15597	1774	1653	22	3502	32	229	1508	78	134	1.62
S111	24602	44	43988	19	20	207	35450	46	16899	1687	7729	16	3456	21	250	1446	77	132	0.36
S124	9805	41	121884	104	25	4432	47005	8	9267	3134	1616	11	1416	106	60	488	48	94	1.77
S130	24280	43	47966	20	27	537	34967	39	13731	968	1348	22	4306	47	216	1543	77	168	2.91
S131	21601	29	49508	18	25	375	33371	35	12931	804	2893	18	4911	40	245	1511	80	181	1.17
S133	26324	20	36144	19	25	110	38621	31	13400	947	1697	17	2857	20	161	1816	100	101	0.28
S169	23525	60	56276	27	23	1338	42605	42	16388	1511	2964	19	4485	59	216	1609	85	190	1.95
S178	21696	28	43799	55	24	254	65862	33	13383	1260	1928	31	3644	25	188	1520	155	106	0.97
S180	15686	24	76562	19	18	423	46102	24	10277	650	3098	14	2879	22	373	1144	75	87	0.53
S183	22732	29	45815	20	23	321	33250	37	14203	1289	4091	17	4206	29	222	1588	87	206	0.58

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO G : GRÁFICOS DE COMPARACIÓN ENTRE FRACCIÓN FINA Y GRUESA PARA MUESTRAS DE SUELO

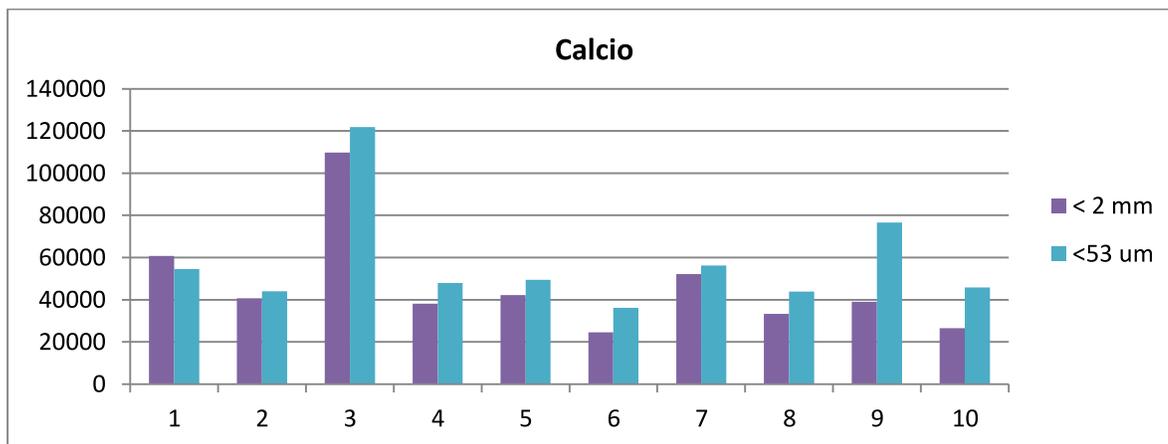


Figura G-1: Concentración de Ca en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

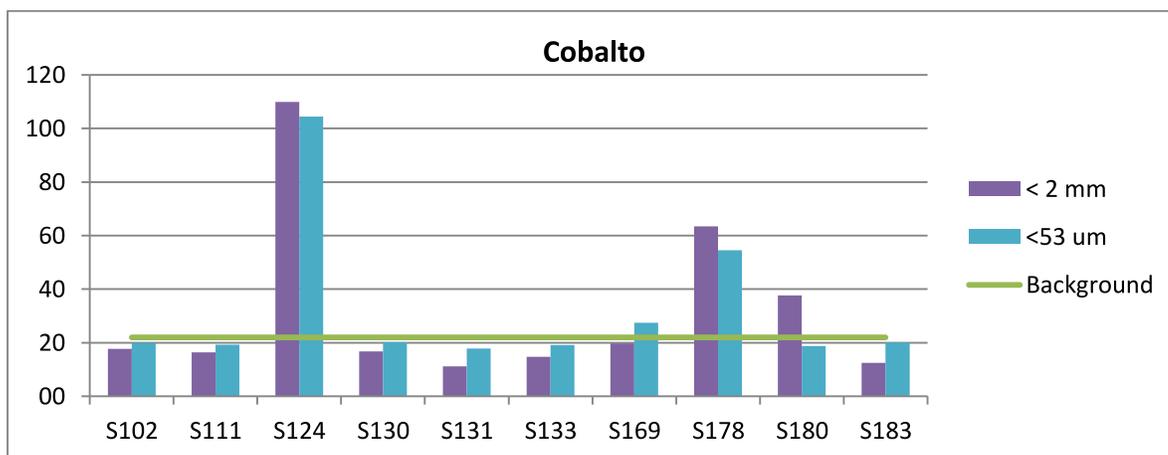


Figura G-2: Concentración de Co en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

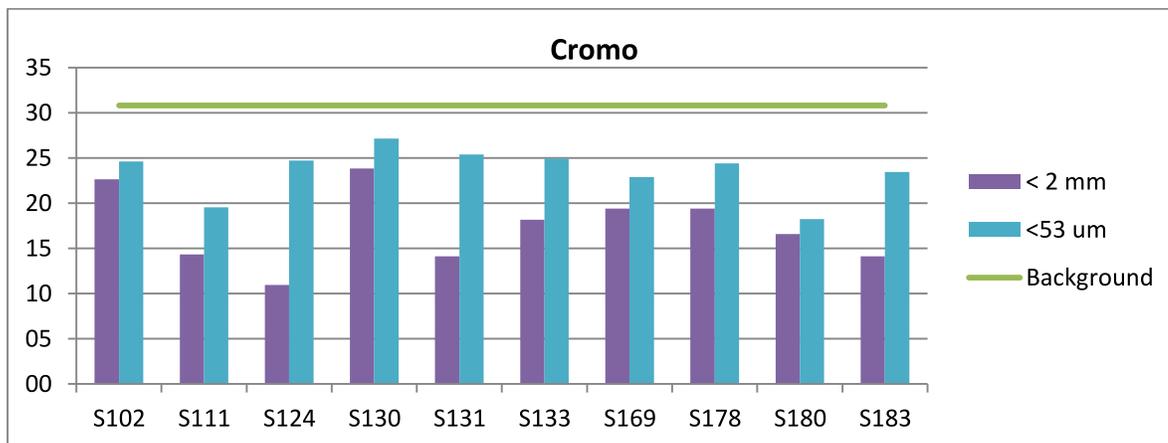


Figura G-3: Concentración de Cr en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

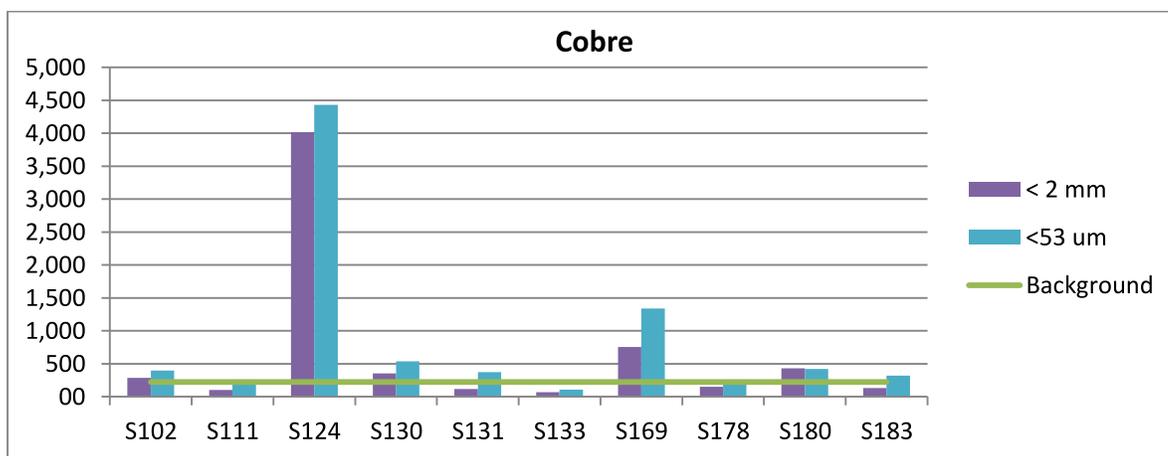


Figura G-4: Concentración de Cu en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia



Figura G-5: Concentración de Fe en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

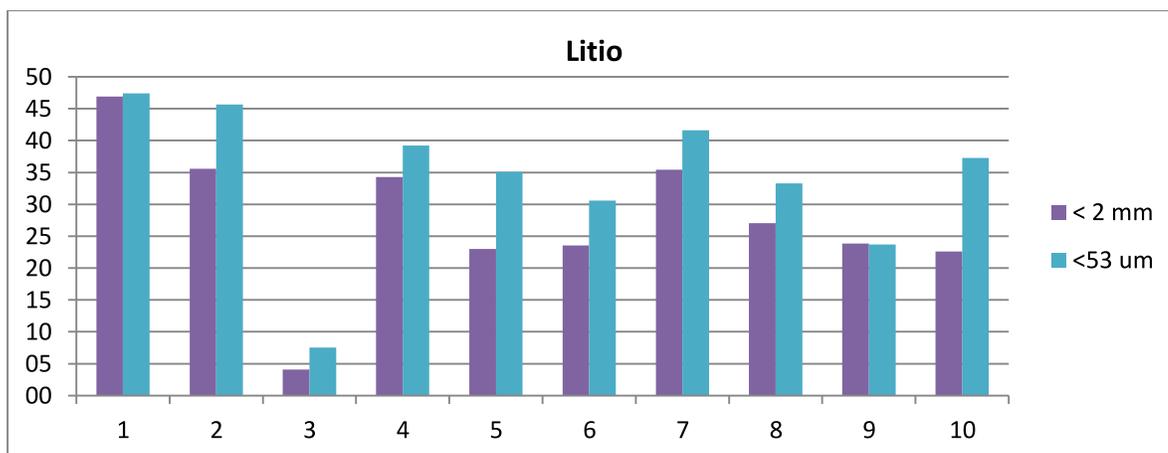


Figura G-6: Concentración de Li en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

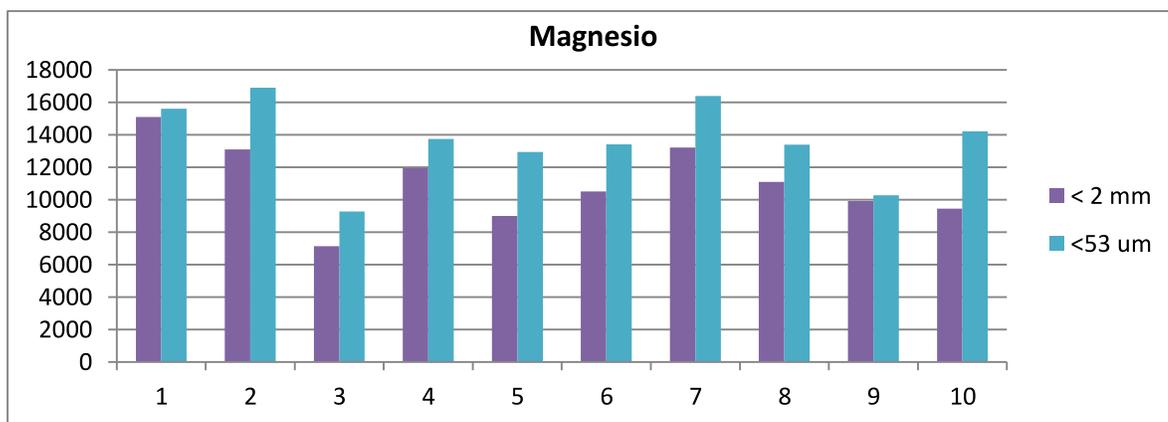


Figura G-7: Concentración de Mg en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

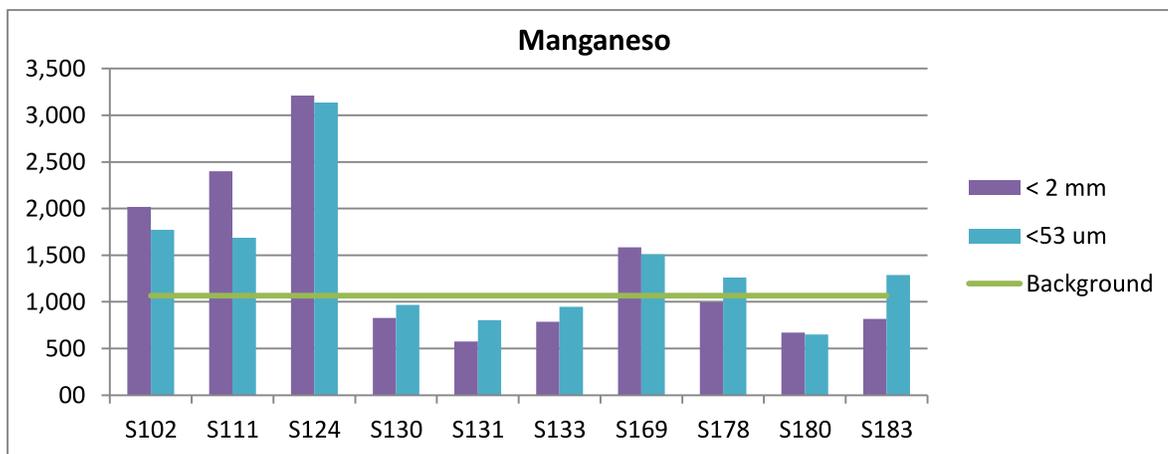


Figura G-8: Concentración de Mn en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

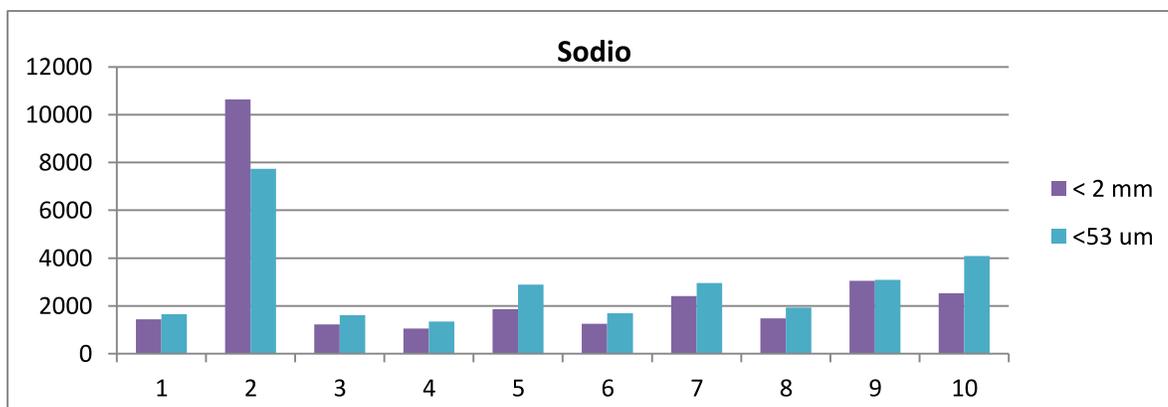


Figura G-9: Concentración de Na en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

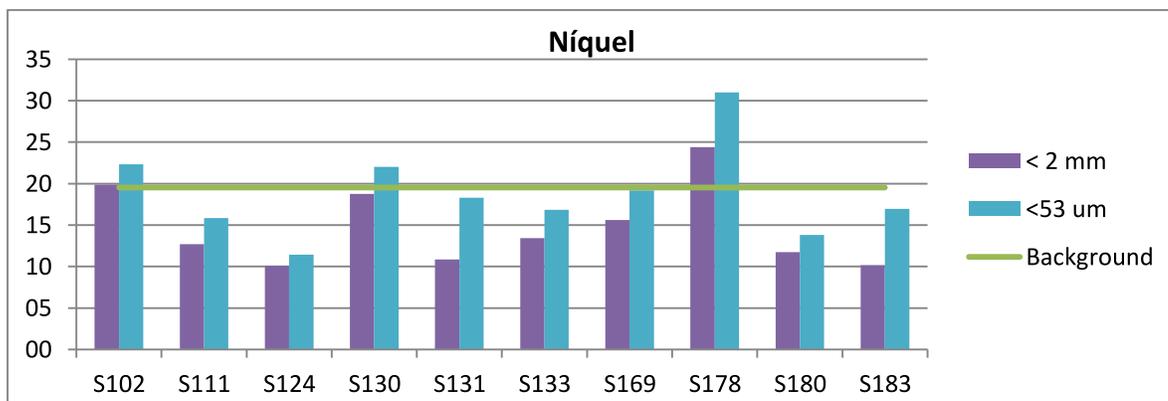


Figura G-10: Concentración de Ni en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

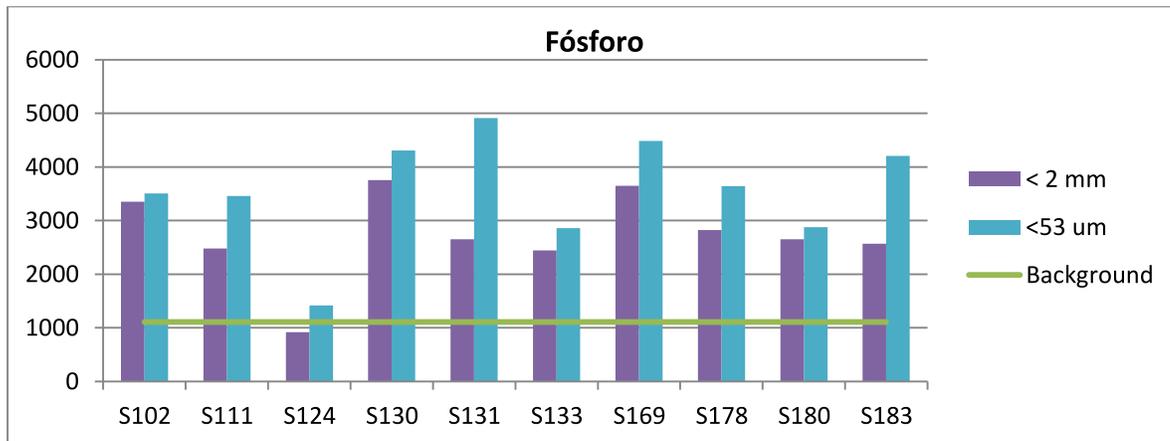


Figura G-11: Concentración de Ca en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

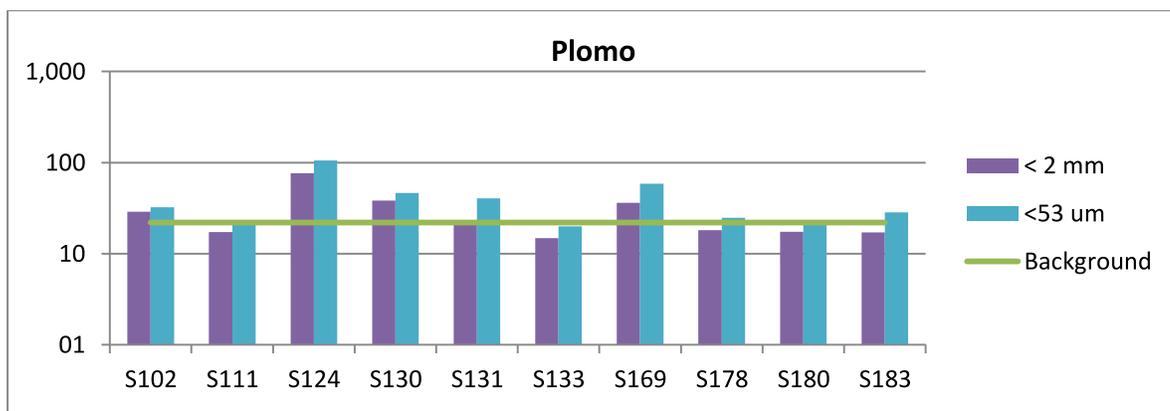


Figura G-12: Concentración de Pb en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

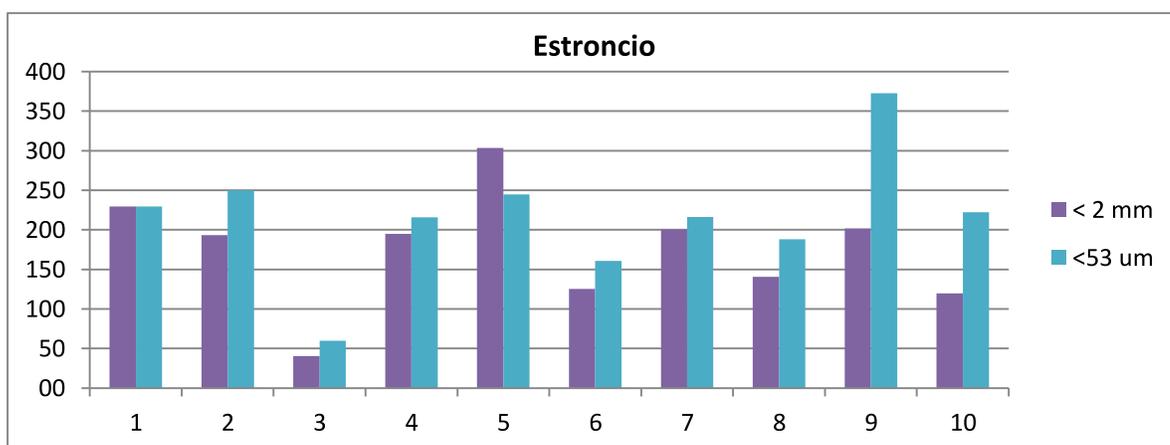


Figura G-13: Concentración de Sr en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

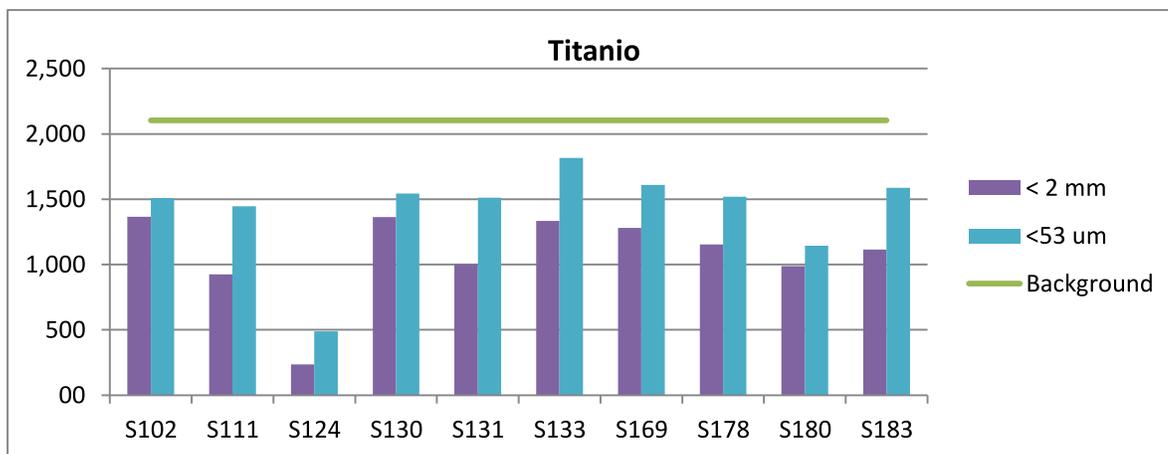


Figura G-14: Concentración de Ti en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

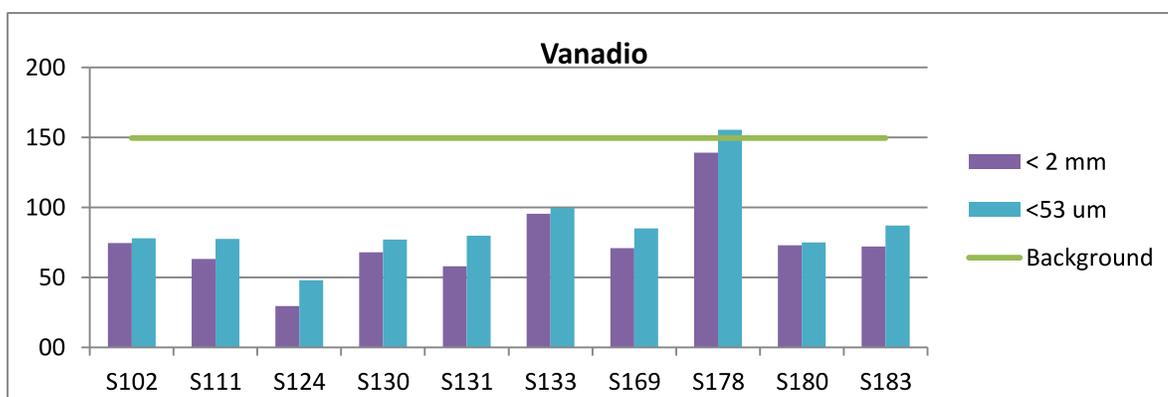


Figura G-15: Concentración de V en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

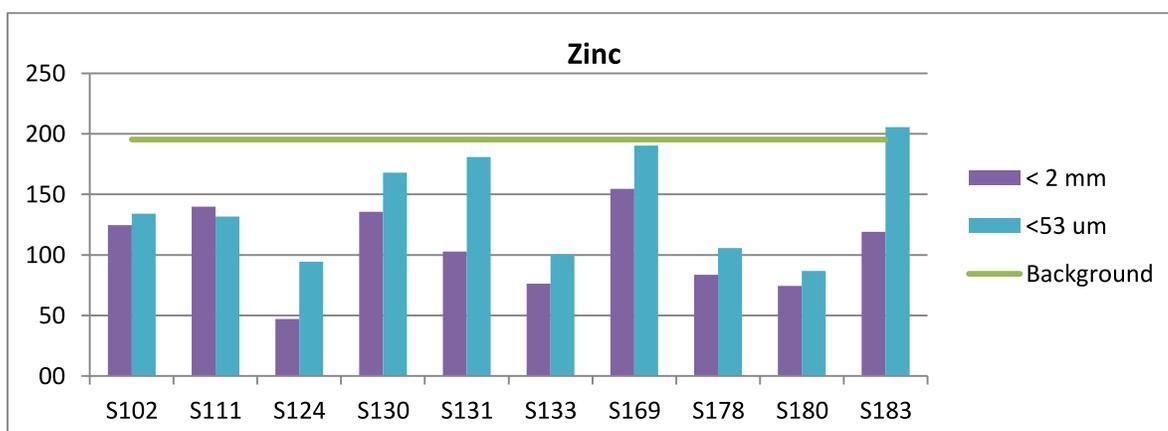


Figura G-16: Concentración de Zn en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

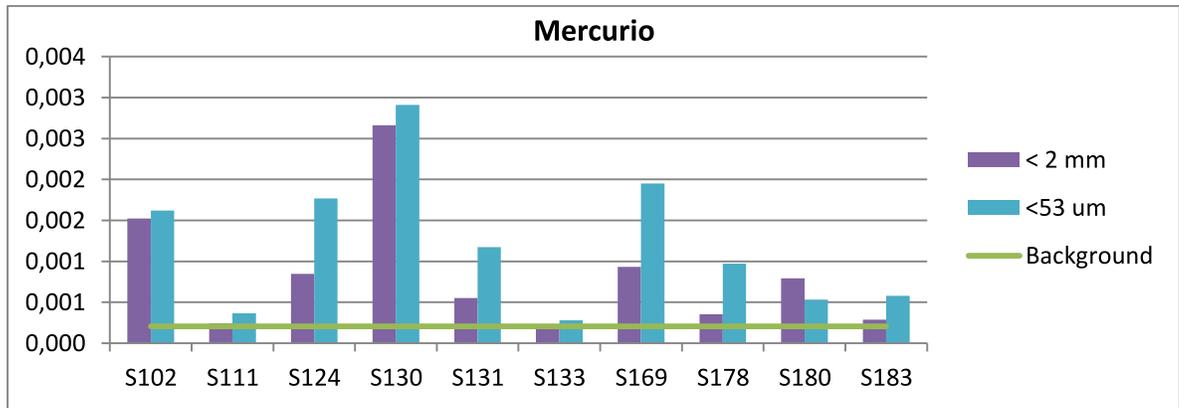


Figura G-17: Concentración de Hg en fracción fina y gruesa en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

ANEXO H : GRÁFICOS DE COMPARACIÓN ENTRE DIGESTIÓN POR AGUA REGIA Y ATAQUE TOTAL PARA MUESTRAS DE SUELO

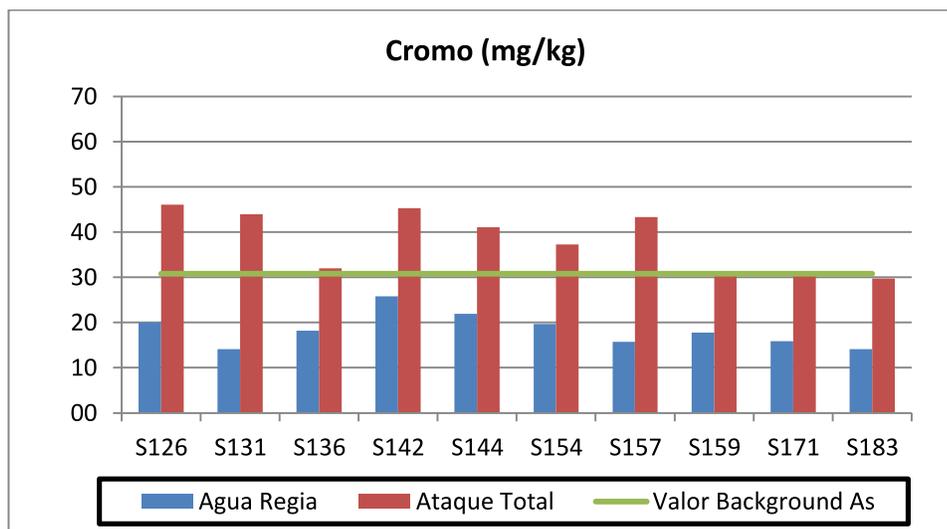


Figura H-1: Concentración de Cr con digestión por agua regia y ataque total en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

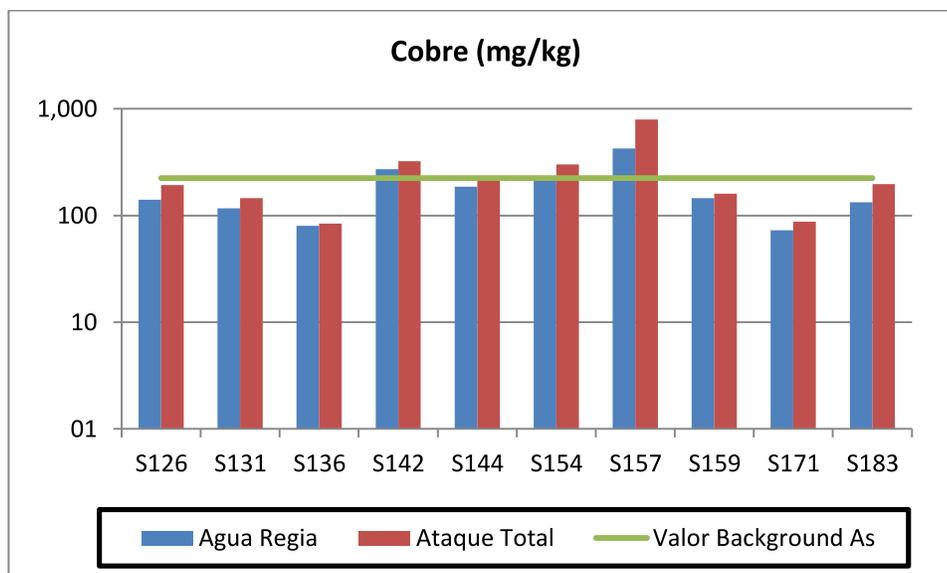


Figura H-2: Concentración de Cu con digestión por agua regia y ataque total en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

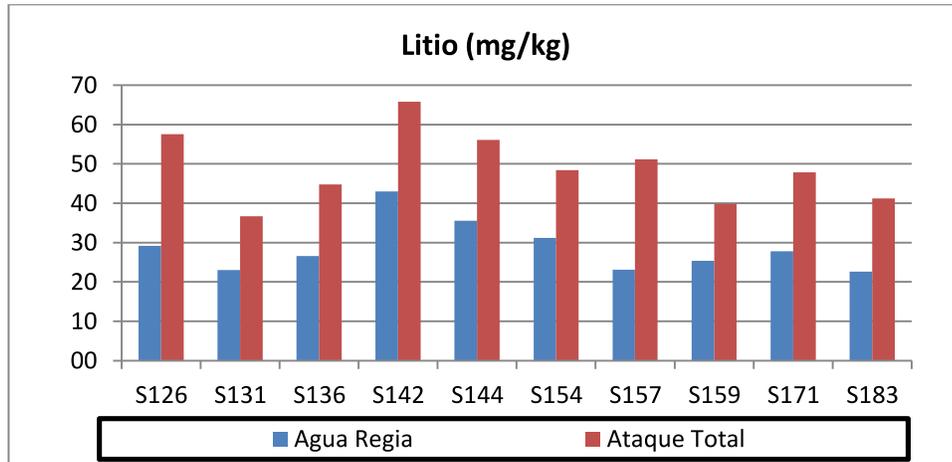


Figura H-3: Concentración de Cu con digestión por agua regia y ataque total en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

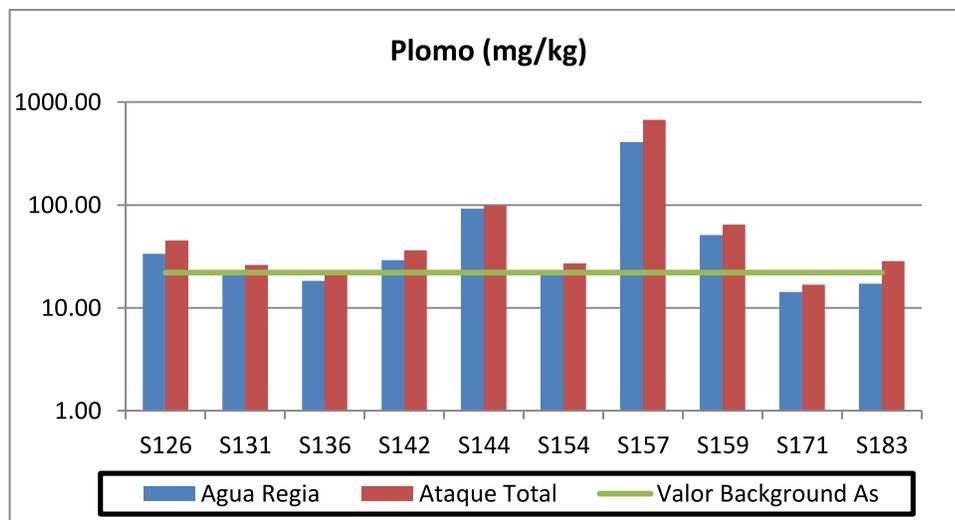


Figura H-4: Concentración de Pb con digestión por agua regia y ataque total en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

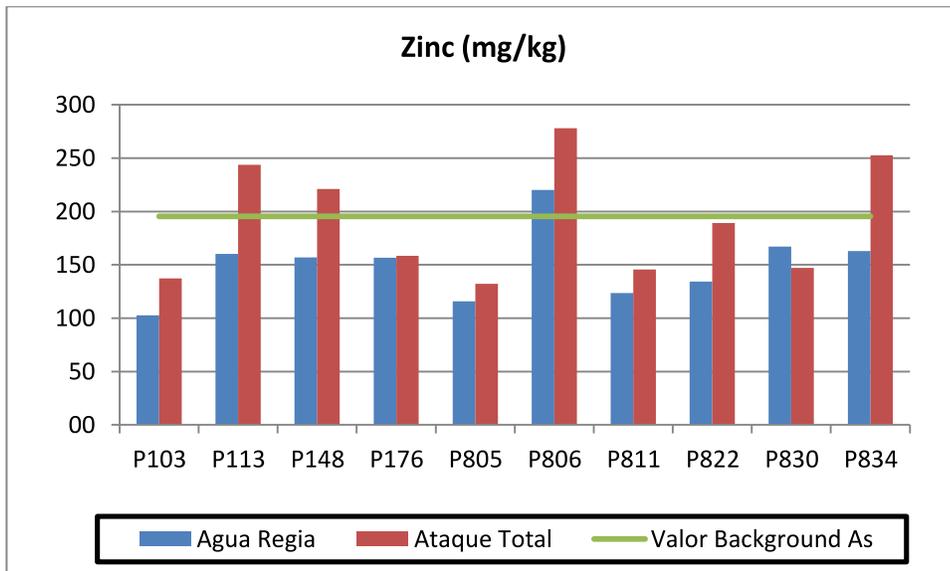


Figura H-5: Concentración de Zn con digestión por agua regia y ataque total en muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia

**ANEXO I : CONCENTRACIÓN ELEMENTAL EN MUESTRAS DE
POLVOS DE CALLE**

Tabla I - 1: Concentraciones elementales de muestras de polvo de calles (< 2mm) en mg/kg.

	Al	As	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sr	Ti	V	Zn	Hg
P103	10973	17	38348	11	14	166	24450	24	8038	877	4057	10	1518	13	142	812	61	103	0,23
P104	10395	39	18275	18	29	1880	46823	23	6816	498	1298	11	708	22	72	1079	114	188	0,17
P106	9857	16	23704	15	36	413	44250	20	6333	545	1468	13	884	26	90	1059	104	205	0,15
P108	8254	11	35076	8	12	229	20998	13	5411	349	1130	8	1972	13	133	728	55	118	0,36
P110	8539	13	29558	55	18	217	72918	19	6746	578	3883	19	999	15	130	879	174	114	0,08
P112	12723	16	28793	17	24	288	31934	25	8057	619	2978	12	1033	18	135	1081	85	139	0,14
P113	9538	34	24834	19	22	1364	44695	16	6287	478	1876	12	1102	21	80	1052	114	160	0,44
P114	8829	12	20278	10	21	190	23377	17	5962	452	1337	8	1052	12	90	768	63	76	0,11
P115	10453	18	20909	12	22	467	33649	35	6535	425	2230	19	752	19	98	1107	99	101	2,78
P116	10076	14	17681	12	19	236	32674	29	6344	421	1717	9	897	18	87	993	95	100	0,18
P117	9417	13	18589	11	23	197	35295	16	5944	456	1029	12	764	22	82	930	89	89	0,19
P121	10812	21	30898	16	51	790	41696	19	6802	497	1344	13	1275	116	126	1063	115	668	0,34
P146	7545	37	11328	25	51	3011	65282	18	5748	468	899	44	789	32	34	657	135	233	0,42
P147	9008	447	17609	26	69	18821	106421	20	6967	836	839	17	606	167	76	910	126	2433	0,77
P148	9610	16	27158	17	21	259	41770	14	6609	464	2290	11	1405	23	107	1074	119	157	0,18
P149	10354	34	33559	39	33	1243	67801	18	6540	630	2651	20	1171	51	92	1200	140	277	0,62
P150	10528	15	21727	14	36	224	24455	14	7116	332	1069	11	508	80	63	1003	74	105	0,09
P151	8161	53	15946	15	21	2019	55602	16	5564	401	1611	21	641	20	54	786	97	481	2,19
P152	9536	45	19036	17	28	2140	40136	19	6249	470	3270	12	531	45	73	1014	102	418	0,14
P153	7958	48	17500	27	29	1577	37203	15	5304	341	2534	22	556	49	69	935	81	398	0,25
P158	8961	54	31997	13	16	315	25896	22	7100	478	4860	10	1320	170	161	878	67	238	> 25
P160	13629	24	46190	16	44	522	28925	22	8420	567	5882	16	2165	141	241	1164	77	251	0,88
P162	9241	11	22904	11	33	123	29438	14	6160	423	1192	10	1013	99	75	1023	85	140	0,07
P164	11619	16	24137	14	38	250	43160	18	7698	601	1577	14	916	46	100	1384	120	154	0,15
P166	11193	16	32726	12	18	260	30379	22	8711	555	3027	10	1239	22	164	960	80	146	0,54
P168	7771	11	22667	9	17	174	22307	17	6079	342	2368	10	1146	19	101	707	59	179	0,39
P170	7969	13	27435	10	13	170	22952	33	6226	423	3167	8	1466	16	102	785	58	90	0,10
P175	8996	12	22086	10	15	143	27849	16	6135	419	1249	9	711	12	106	807	71	89	0,08
P176	9516	16	43419	13	27	299	27388	21	7909	528	5384	10	2301	43	211	740	64	157	0,14
P177	7194	10	15862	8	9	80	19662	14	4974	315	1041	6	861	8	73	706	48	56	0,10
P181	9554	42	16004	16	21	1521	44953	25	6822	407	1407	10	656	21	63	1055	104	256	0,27
P184	9290	21	20029	16	24	499	44454	16	5997	500	1334	11	1035	19	85	992	109	142	0,14
P805	10871	15	22808	11	18	192	27098	18	7818	531	2012	9	2102	17	114	1079	79	116	0,06
P806	11323	20	21078	15	27	678	42727	16	7137	606	1327	12	804	106	81	1120	121	220	0,33
P807	11239	27	20105	90	17	705	36860	49	7019	539	18582	11	700	39	90	1038	95	144	0,22
P808	11273	17	31007	12	21	470	28983	17	6946	523	1807	11	1005	23	156	1147	79	156	0,15
P809	13408	26	27570	13	20	456	31955	17	7657	556	1778	12	1218	30	117	1354	89	442	0,29
P810	8676	36	17760	45	79	4327	95058	33	6733	1126	1053	40	592	120	57	858	151	509	0,42
P811	14567	20	24812	13	19	180	35832	22	8805	598	1721	11	851	25	110	1366	98	124	0,51
P812	11176	15	24960	12	20	163	38891	17	7025	495	936	9	877	16	84	1066	117	87	0,41
P813	8252	25	14470	26	23	1126	54954	12	5876	433	1519	11	723	14	41	929	183	88	0,14
P814	9115	106	28244	33	25	1361	56655	64	8305	731	2070	16	652	20	59	1070	161	113	0,09
P816	8252	20	17109	15	21	898	37552	20	6577	499	856	13	636	128	56	837	103	171	0,36
P817	9349	30	20980	26	42	1748	56893	23	6964	597	1726	22	716	50	77	968	184	166	0,25
P818	8702	13	16386	12	22	213	37311	16	6261	386	1768	9	742	13	67	976	113	80	0,15
P819	9296	12	17812	12	20	221	28797	30	6986	453	1433	10	636	21	72	872	78	94	0,39
P820	10933	16	27490	12	23	109	34329	26	8840	464	2884	10	890	21	99	1203	100	102	0,23
P821	10859	13	27752	9	14	106	21708	17	6814	384	1231	9	681	14	115	939	60	78	0,17
P822	9658	22	27844	12	23	130	29699	16	7001	421	2251	9	1109	59	100	1010	85	134	0,10

P823	9211	13	24984	19	65	329	32952	16	6622	413	2141	12	1009	206	94	998	98	129	0,27
P824	10734	15	26517	13	20	314	31812	20	7677	499	2339	13	1285	19	107	1042	89	138	0,21
P826	9226	13	17630	13	18	208	37868	23	5908	400	1654	10	753	14	75	1072	120	77	0,08
P829	10858	14	27824	11	39	211	25704	21	7350	411	1989	10	1091	142	113	1013	69	149	0,21
P830	9035	15	25455	12	32	185	34552	15	6659	412	3068	11	1267	66	81	993	93	167	0,10
P831	10369	14	38761	12	30	125	41379	16	7886	476	2916	11	1289	34	128	1161	115	211	0,07
P832	11425	15	39128	12	21	163	26357	19	8372	504	2886	11	1875	27	163	1079	73	168	0,12
P833	8555	11	26271	11	29	112	39744	14	6263	455	1287	14	1465	46	104	998	92	236	0,08
P834	12710	25	21961	17	19	889	38663	61	8119	612	19992	11	690	33	86	1334	98	163	0,49
P835	12869	16	32047	14	29	214	40642	19	8946	496	2717	15	1353	45	125	1447	120	390	0,30
P836	11768	20	24814	22	33	472	47527	16	7694	506	1387	15	1023	46	95	1243	137	194	0,22
P837	9199	15	24050	19	30	237	35815	16	6069	494	1397	11	1108	26	95	1032	96	132	0,29
P838	10095	63	25095	29	47	2938	53682	42	7883	641	1850	18	807	87	90	1129	123	375	0,45
P840	11102	17	27386	16	39	309	48137	20	7241	626	1331	14	1098	47	97	1185	114	293	0,30
P841	10076	17	29838	15	56	541	39937	22	6738	482	1493	14	2630	77	101	1101	99	335	0,28
P842	6586	9	27833	8	15	78	29695	13	6331	304	3374	9	11632	11	98	379	95	156	0,06
P843	12189	29	37165	15	21	298	28721	20	8673	496	1619	12	5959	42	169	872	87	202	0,55
P844	9835	22	24254	19	70	389	45919	19	6983	486	1986	13	3327	228	116	1185	128	171	0,44
P845	7482	28	43258	19	36	930	58848	16	5693	699	1197	16	2198	40	266	816	158	165	0,45
P846	6739	17	13436	17	37	338	26531	14	5171	351	1347	7	2295	111	57	701	80	113	1,09
P847	8751	14	27429	9	28	198	21896	18	6248	409	2685	9	4117	96	121	735	57	242	0,80
P848	7560	28	24936	12	18	212	43466	14	5379	447	865	12	2382	119	104	604	125	119	0,23

Fuente: Elaboración propia.

Tabla I - 2: Concentraciones elementales de muestras de polvo de calles (< 53µm) en mg/kg.

	Al	As	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sr	Ti	V	Zn	Hg
P147	13762	1373	26154	51	144	53526	143662	39	11320	963	1714	31	2596	481	111	1190	113	6918	2,82
P176	16516	34	69303	26	29	777	46407	39	12829	857	7822	19	8419	42	340	1310	91	281	0,34
P181	13442	66	26293	29	31	2757	81562	46	10173	653	2242	17	3108	33	105	1577	163	322	1,01
P184	15217	41	43134	27	38	1306	54790	32	9971	728	4809	21	5700	55	168	1403	123	325	0,30
P812	21528	33	41072	19	28	392	41317	37	12897	808	1991	18	4083	37	180	1761	110	182	1,05
P835	16721	33	48703	21	39	603	53285	31	12566	708	4004	28	6360	75	191	1804	156	595	0,44
P843	17150	51	47352	30	32	687	51659	30	12307	745	1879	22	6100	74	194	1352	126	318	2,67
P844	14809	42	41180	28	62	1051	77595	29	10264	851	2716	21	4604	113	159	3027	189	310	0,76
P845	14391	84	36466	44	58	3060	94167	29	9002	760	1731	32	4181	114	149	1548	216	480	1,42
P848	17650	221	30314	44	43	4072	75627	26	11606	826	1196	30	5596	133	101	1685	133	832	0,31

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO J : GRÁFICOS DE COMPARACIÓN ENTRE FRACCIÓN FINA Y GRUESA PARA MUESTRAS DE POLVO DE CALLES

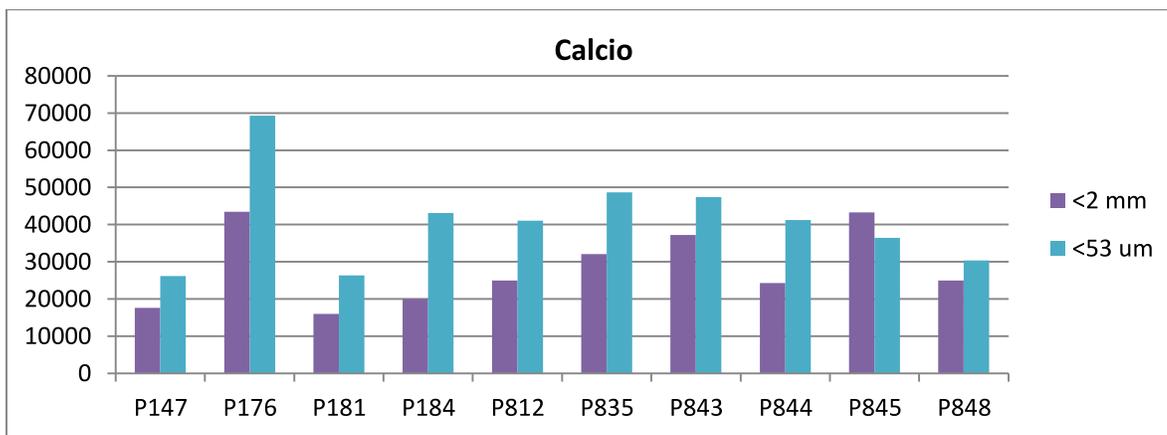


Figura J-1: Concentración de Ca en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

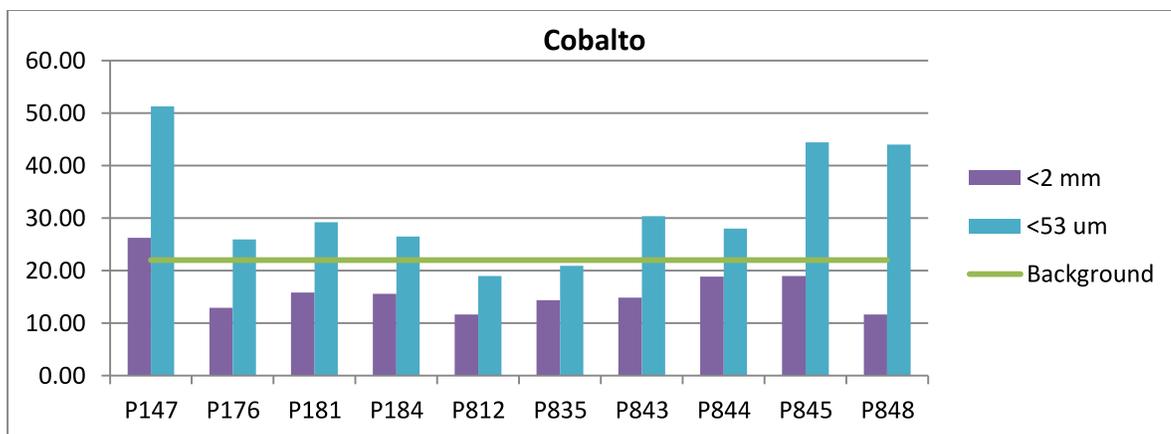


Figura J-2: Concentración de Co en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

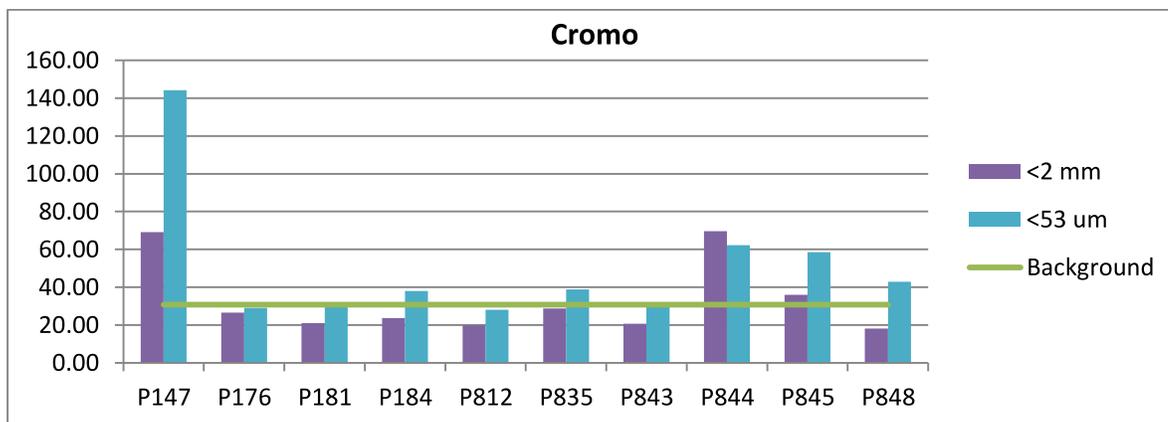


Figura J-3: Concentración de Cr en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

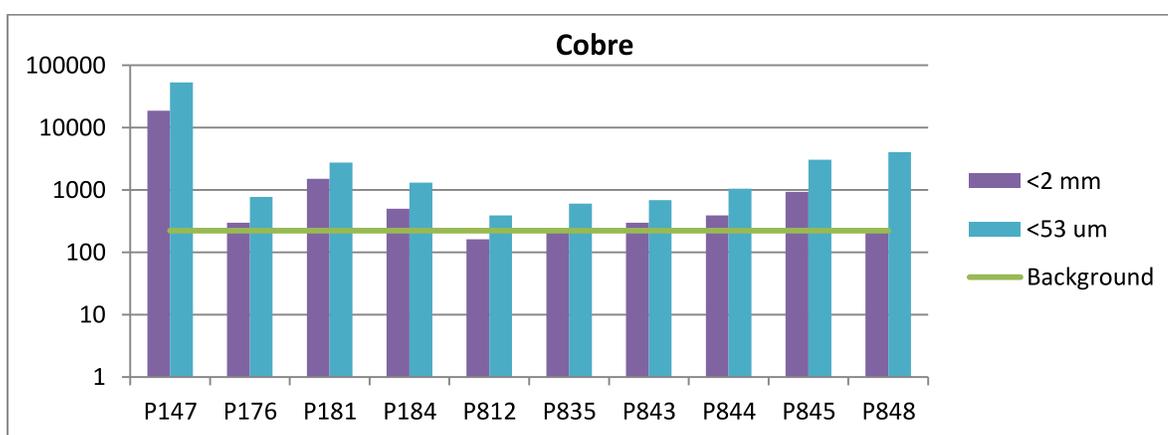


Figura J-4: Concentración de Cu en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

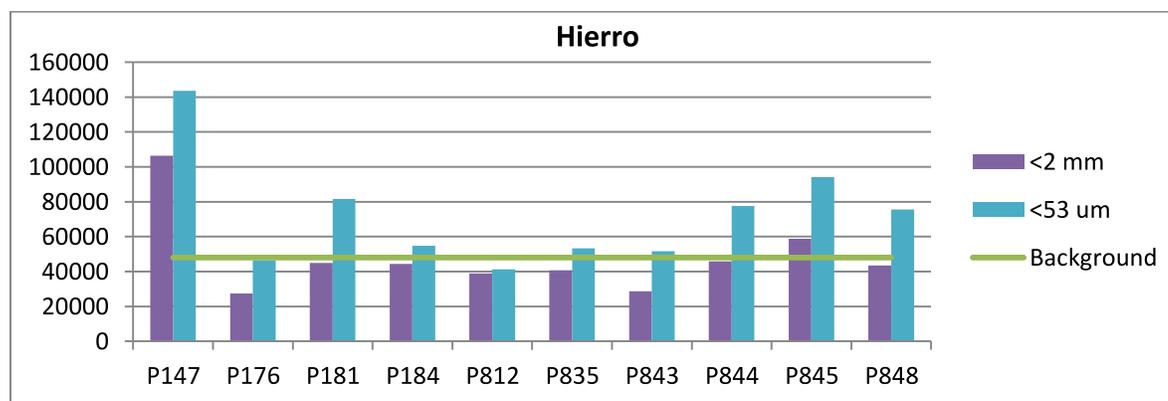


Figura J-5: Concentración de Fe en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

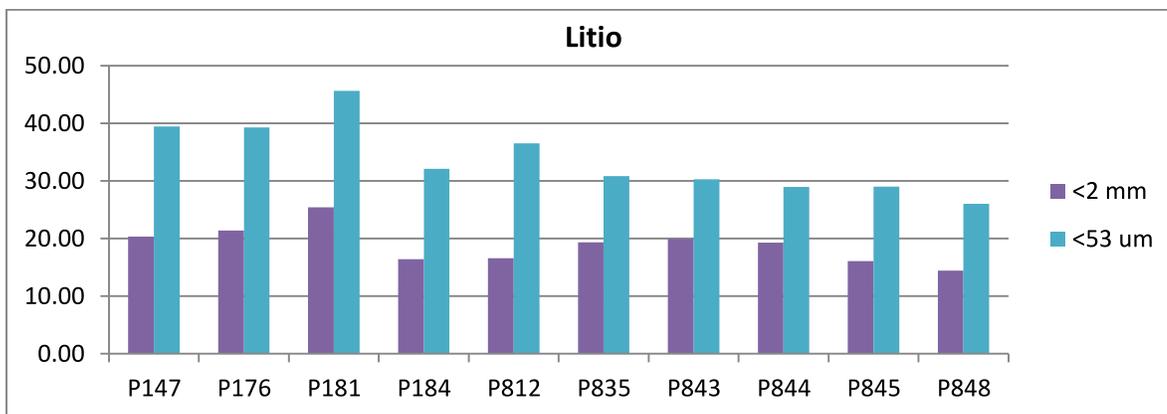


Figura J-6: Concentración de Li en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

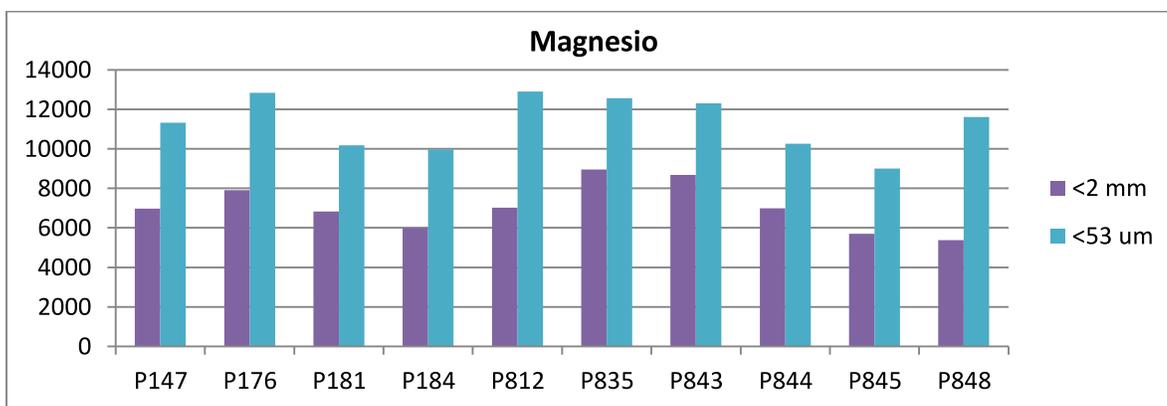


Figura J-7: Concentración de Mg en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

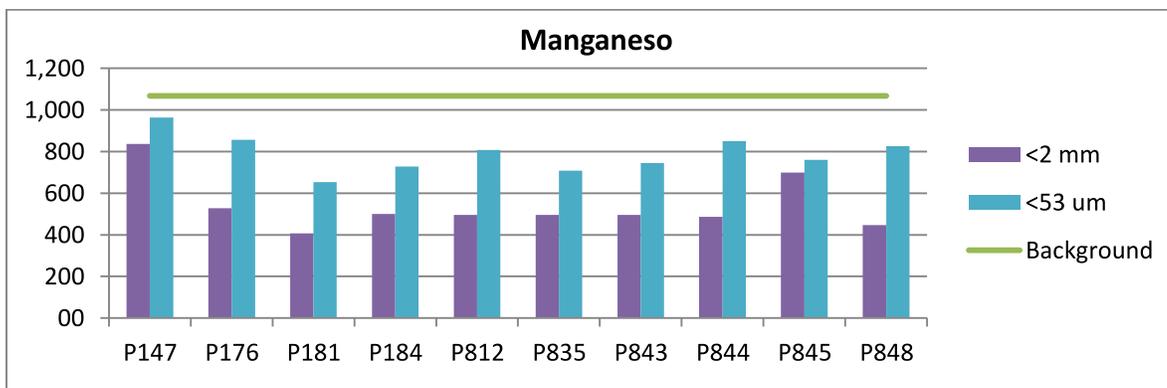


Figura J-8: Concentración de Mn en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

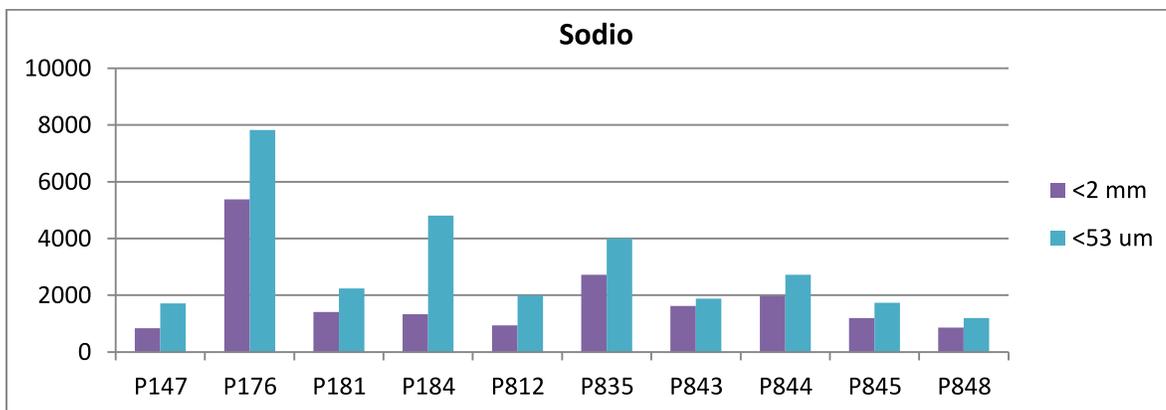


Figura J-9: Concentración de Na en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

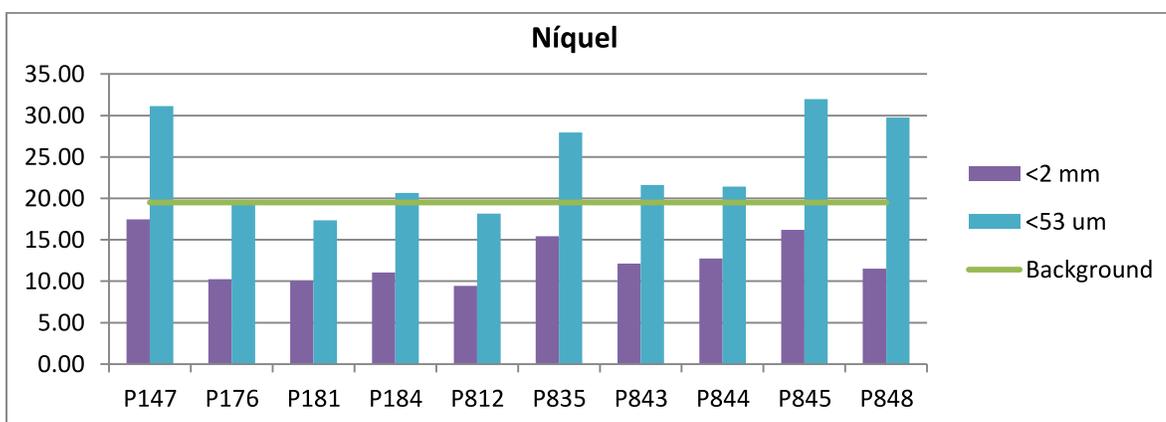


Figura J-10: Concentración de Ni en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

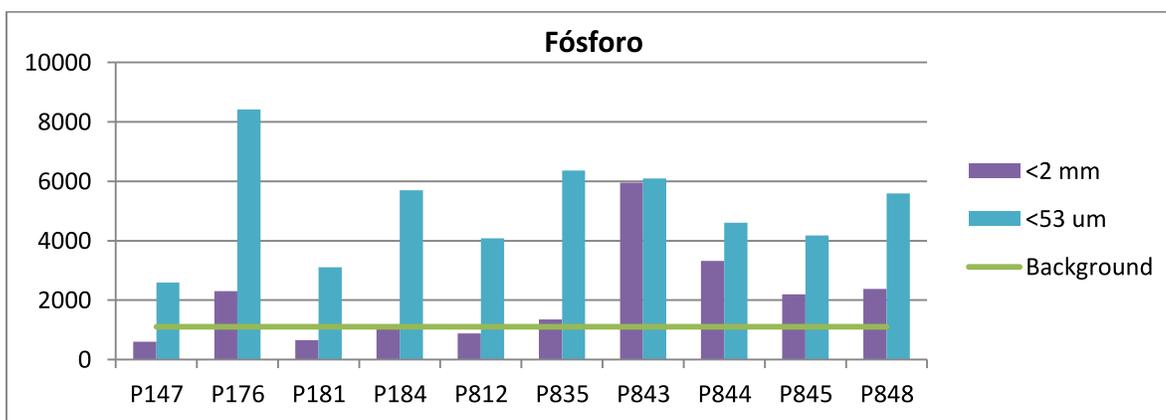


Figura J-11: Concentración de P en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

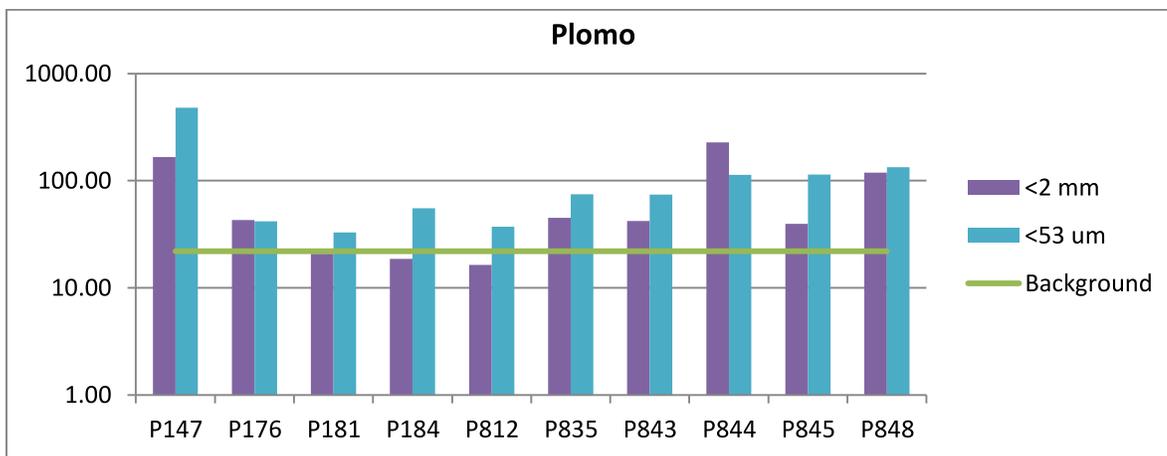


Figura J-12: Concentración de Pb en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

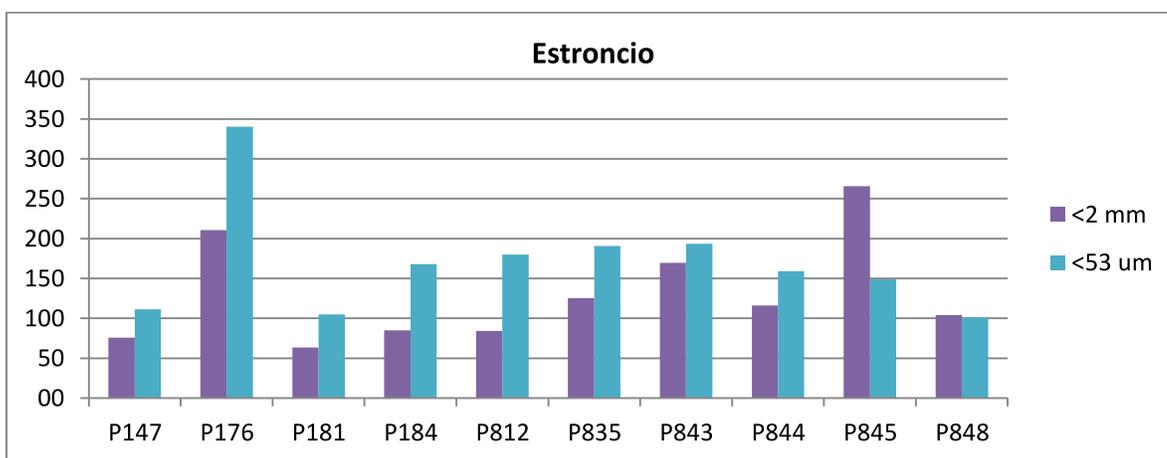


Figura J-13: Concentración de Sr en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

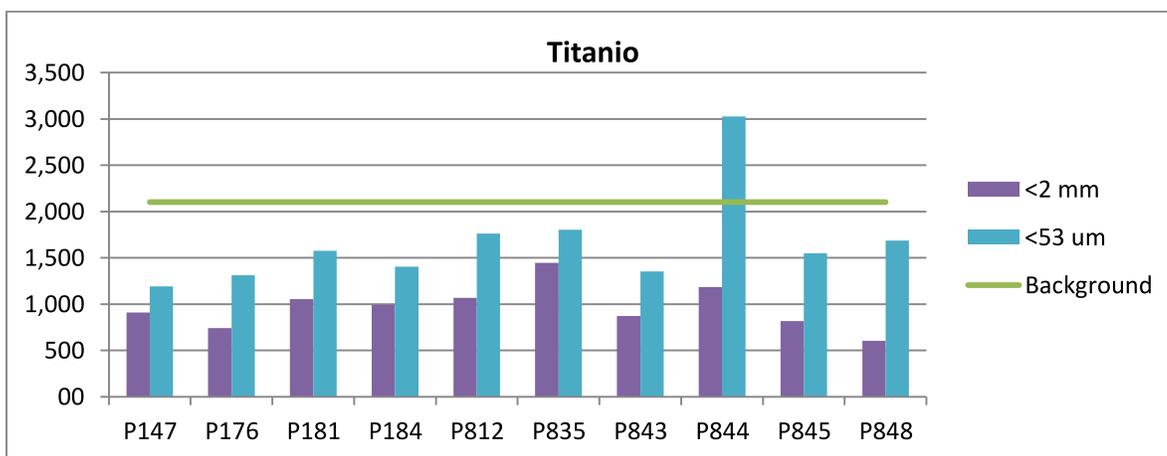


Figura J-14: Concentración de Ti en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

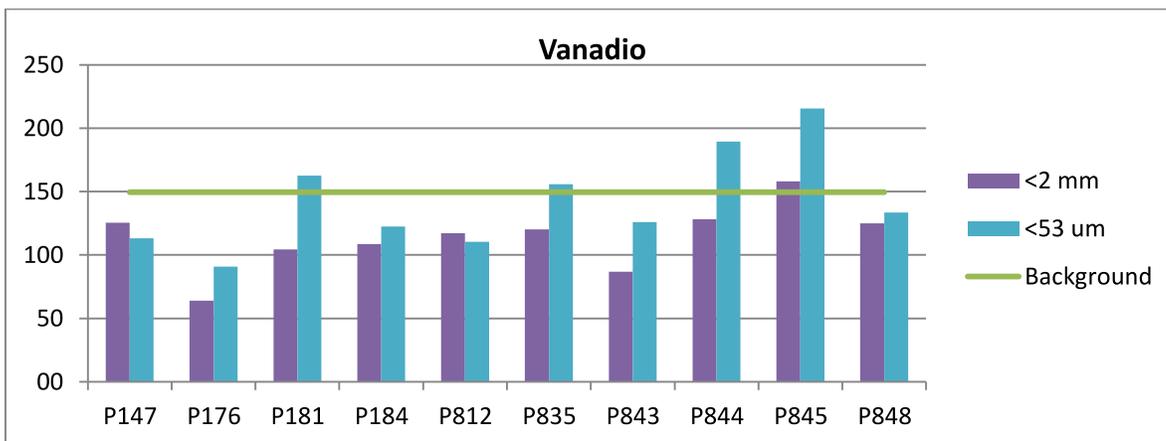


Figura J-15: Concentración de V en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

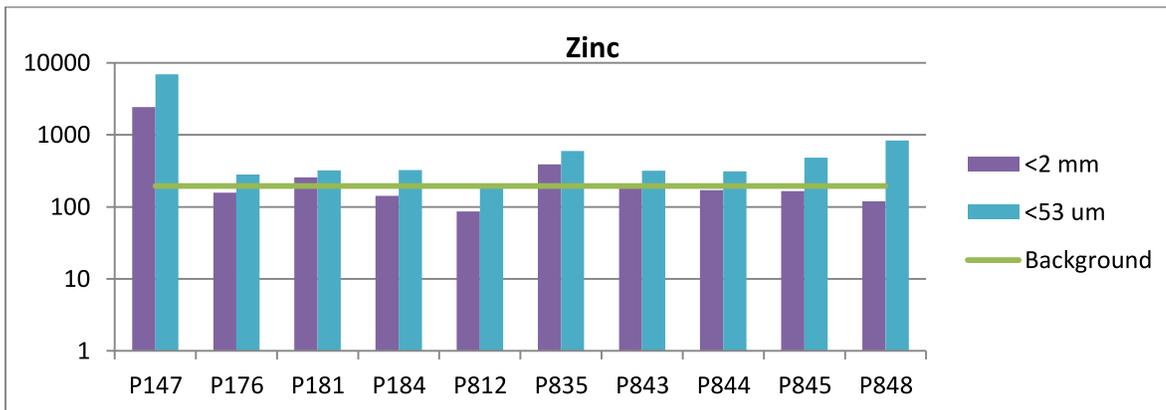


Figura J-16: Concentración de Zn en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

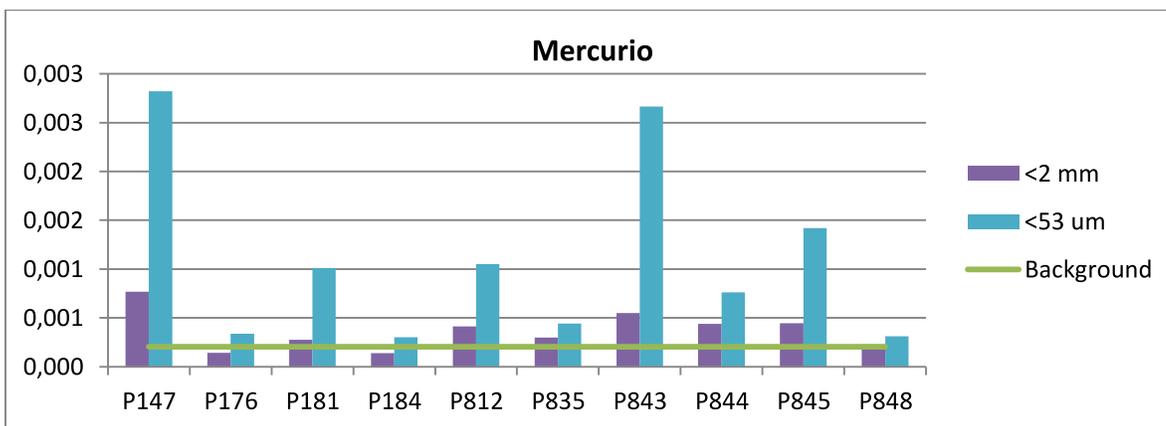


Figura J-17: Concentración de Hg en fracción fina y gruesa en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

ANEXO K : GRÁFICOS DE COMPARACIÓN ENTRE DIGESTIÓN POR AGUA REGIA Y ATAQUE TOTAL PARA MUESTRAS DE POLVO DE CALLES

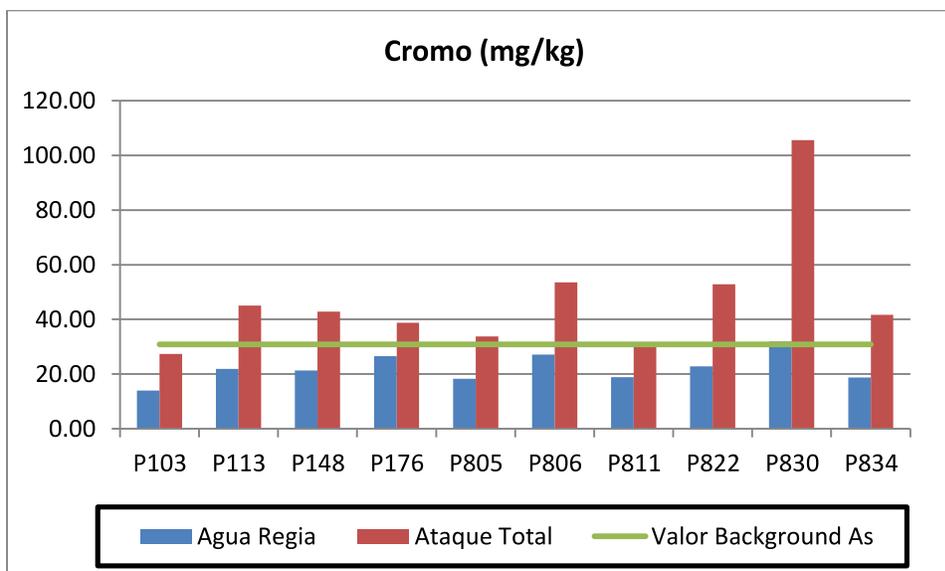


Figura K-1: Concentración de Cr con digestión por agua regia y ataque total en muestras de polvo de calles.
Fuente: Elaboración propia

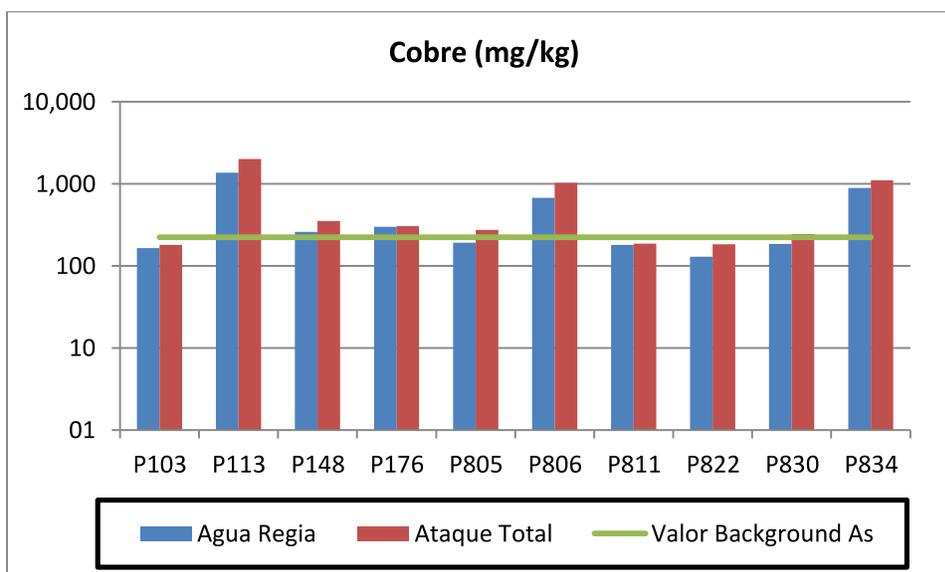


Figura K-2: Concentración de Cu con digestión por agua regia y ataque total en muestras de polvo de calles.
Fuente: Elaboración propia

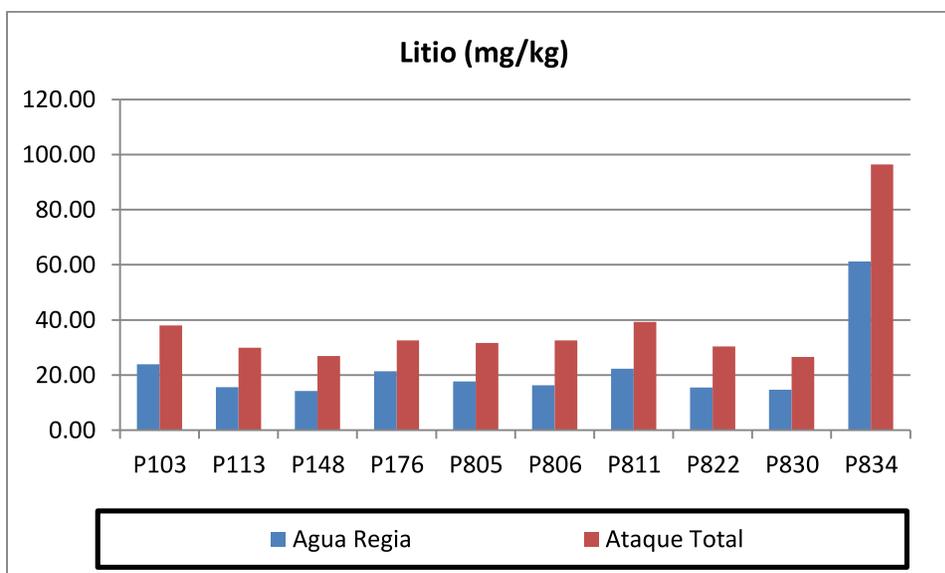


Figura K-3: Concentración de Li con digestión por agua regia y ataque total en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia

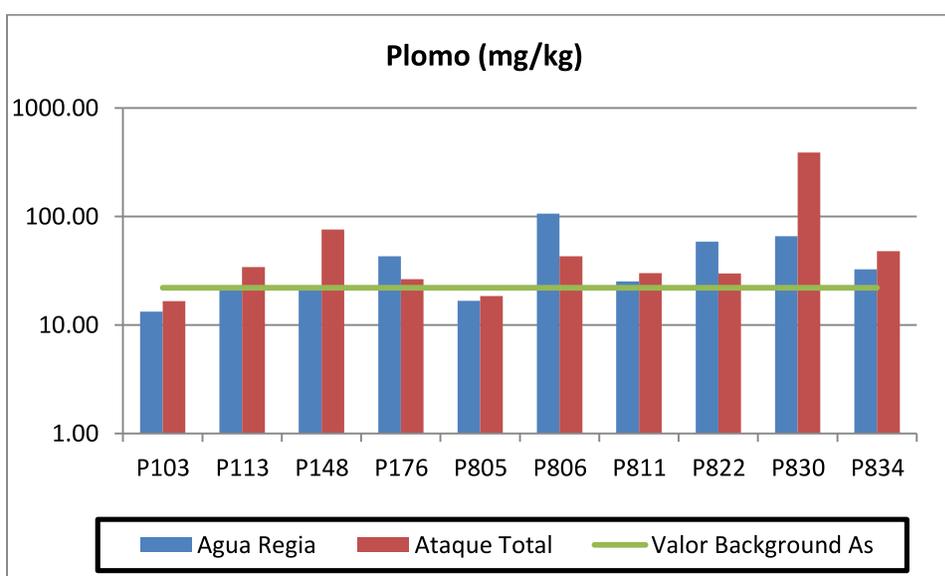
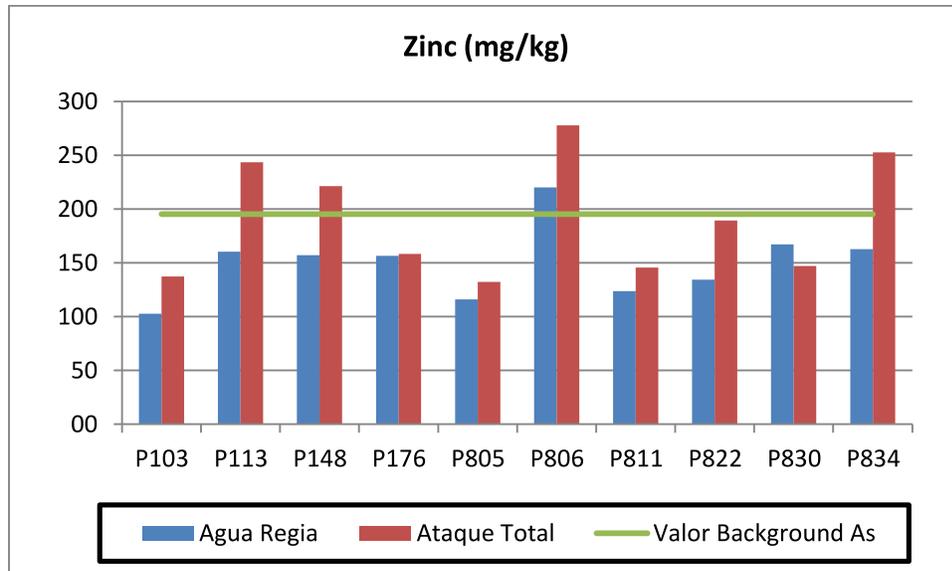


Figura K-4: Concentración de Pb con digestión por agua regia y ataque total en muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia



**Figura K-5: Concentración de Zn con digestión por agua regia y ataque total en muestras de polvo de calles.
Fuente: Elaboración propia**

ANEXO L : CONCENTRACIÓN ELEMENTAL EN MUESTRAS DE LODO

Tabla L - 1: Concentraciones elementales de muestras de lodo (< 2mm) en mg/kg.

	Granulometría	Flujo	Al	As	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sr	Ti	V	Zn	Hg
L218	< 2mm	Copiapó	24952	23	24573	18	19	117	35209	27	12100	835	859	17	718	35	127	1376	79	121	1,52
L229-1	< 2mm	Paipote	20495	25	25726	16	18	125	34964	24	11523	820	914	13	641	30	120	1236	85	122	1,51
L233-1	< 2mm	Paipote	25764	26	29145	18	20	101	34341	28	13060	865	956	18	782	33	139	1320	79	128	1,85
L233-2	< 2mm	Paipote	17998	21	25211	14	15	79	30361	21	10257	738	769	12	615	26	110	1271	81	101	1,07
L234-1	< 2mm	Paipote	36541	17	40365	17	16	71	35181	31	16844	850	1147	17	969	15	217	922	79	90	0,59
L234-2	< 2mm	Paipote	38743	18	39623	18	18	77	36107	32	16833	869	1265	18	989	16	205	1112	84	98	0,66
L235-1	< 2mm	Paipote	19402	27	24392	16	17	81	34718	22	10567	822	997	14	618	26	110	1250	85	111	1,26
L235-2	< 2mm	Paipote	20163	26	24516	15	17	94	33509	24	10861	774	934	14	696	32	115	1196	79	122	1,56
L235-3	< 2mm	Paipote	20245	27	26646	16	16	108	35754	24	11282	903	880	13	638	33	125	1277	86	129	1,40
L238-1	< 2mm	Copiapó	19420	18	25600	16	18	69	35787	23	10893	779	884	14	695	23	118	1312	87	101	0,98
L238-2	< 2mm	Copiapó	24164	23	27713	16	20	76	35323	26	12008	826	909	17	740	29	140	1414	82	114	1,31
L240-1	< 2mm	Copiapó	21319	22	29906	16	22	173	39877	22	11454	842	1145	15	742	23	133	1674	107	107	0,91
L240-2	< 2mm	Copiapó	24762	24	30334	17	21	88	36363	26	12793	864	1086	17	774	27	144	1508	87	120	1,60
L240-3	< 2mm	Copiapó	25822	21	33459	17	21	101	35701	26	13377	859	1198	17	786	24	157	1420	85	109	1,66
R213-3	< 2mm	Copiapó	23591	20	27743	17	21	73	37643	27	12330	849	950	17	739	28	122	1479	86	116	1,17
R230-1	< 2mm	Paipote	18986	25	23470	17	22	82	40094	22	10431	826	819	15	638	30	104	1301	103	116	1,42
R230-2	< 2mm	Paipote	22249	28	27923	17	16	113	35703	23	11260	819	1130	13	657	29	129	1526	87	121	1,53
T1-1	< 2mm	Paipote	26893	36	28847	18	17	158	36738	30	13572	967	1027	14	714	45	131	1487	84	157	2,86
T1-3	< 2mm	Paipote	20643	27	25458	16	16	120	34502	25	11629	830	1125	12	628	29	144	1224	85	127	1,14
T1-4	< 2mm	Paipote	17428	21	22115	14	16	67	32553	20	9880	781	842	12	596	24	94	1198	80	100	1,36
T1-5	< 2mm	Paipote	16412	18	22742	13	16	55	31681	19	9569	700	852	12	594	19	95	1220	79	89	0,96
T2-1	< 2mm	Paipote	27000	19	36676	17	20	69	35102	27	13356	847	1178	17	849	19	177	1514	83	99	0,94
T2-2	< 2mm	Paipote	23894	31	26925	17	16	142	33877	28	12755	885	1049	14	685	34	119	1136	76	127	1,65
T2-3	< 2mm	Paipote	19489	20	24758	15	17	69	34160	21	10514	724	907	13	654	27	130	1449	90	98	0,74
T2-4	< 2mm	Copiapó	21841	18	65333	16	27	55	35151	32	11092	787	725	26	1109	18	191	1822	77	85	0,11
T3-1	< 2mm	Copiapó	18265	15	42127	15	19	51	33579	26	10218	753	957	16	801	17	146	1729	82	79	0,07
T3-3	< 2mm	Paipote	36650	43	32790	22	15	260	38463	38	17437	1206	1153	15	785	44	134	1303	81	158	2,07
T3-4	< 2mm	Paipote	22876	20	29926	16	20	78	35751	23	11915	807	1115	15	731	22	138	1512	90	99	1,02
T4-2	< 2mm	Paipote	26101	25	34302	19	21	108	38735	27	13737	912	1145	17	781	30	155	1590	93	127	1,32
T4-3	< 2mm	Copiapó	26086	24	35426	20	22	99	38564	27	13841	893	1301	18	811	28	162	1583	94	119	1,09
T4-5	< 2mm	Copiapó	21100	18	53617	18	28	66	40581	31	11654	845	761	23	1058	21	164	1979	97	91	0,13
T4-5B	< 2mm	Copiapó	17977	21	42875	19	22	69	40298	24	11728	972	986	16	802	23	152	1954	103	98	0,21
T5-1	< 2mm	Copiapó	32131	24	38255	21	23	106	38308	31	15863	957	1385	20	906	26	180	1574	88	122	1,40

T5-3	< 2mm	Copiapó	39346	31	39788	22	24	137	40717	39	18703	1055	1769	22	961	34	183	1473	87	154	2,49
T5-4	< 2mm	Copiapó	25677	25	31158	18	22	88	37952	28	13094	881	1073	18	794	31	147	1525	88	125	1,29
T5-6	< 2mm	Copiapó	21556	19	57228	17	22	62	32696	29	11474	773	1112	21	939	19	195	1661	74	92	0,28
T5-7	< 2mm	Copiapó	27443	20	33944	19	22	99	38881	29	13551	862	1061	18	849	25	157	1626	95	112	0,91
T6-1	< 2mm	Copiapó	28182	25	33348	19	22	95	38015	30	14072	945	1139	20	866	35	154	1495	87	132	1,62
T6-2	< 2mm	Copiapó	27918	22	34964	20	18	85	40461	28	13392	1043	1288	15	729	24	161	1490	101	111	0,17
T6-3	< 2mm	Copiapó	30114	22	37222	19	24	77	38780	29	14458	896	1279	19	872	22	181	1715	96	110	0,68
T6-4	< 2mm	Copiapó	29394	20	39168	17	20	73	34292	27	13783	820	1405	17	847	21	206	1644	81	102	0,72

Fuente: Elaboración propia.

Tabla L - 2: Concentraciones elementales de muestras de lodo (< 2mm) en mg/kg.

	Granulometría	Flujo	Al	As	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Li	mg/kg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sr	Ti	V	Zn	Hg
L233-1	< 53mm	Paipote	32178	37	38655	22	27	140	41840	32	15749	1027	987	23	963	46	145	1718	97	167	2,53
L234-1	< 53mm	Paipote	41634	20	46078	20	19	85	38581	32	18150	908	1231	18	1044	17	232	1321	91	101	0,52
L235-2	< 53mm	Paipote	31282	44	35540	20	25	163	41040	33	15289	1013	1126	21	892	53	138	1607	93	176	2,65
L240-1	< 53mm	Copiapó	29739	30	43173	22	28	145	45093	30	15487	1026	1425	20	974	38	174	2029	114	138	1,58
T1-1	< 53mm	Paipote	33055	47	37162	22	21	254	42545	34	16110	1123	1083	17	855	61	141	1654	97	197	3,34
T2-4	< 53mm	Copiapó	21533	20	78632	18	29	77	38475	32	11172	824	664	27	1257	20	212	1925	84	93	0,13
T4-2	< 53mm	Paipote	30400	34	39538	20	24	145	41592	32	15770	1018	1218	20	914	37	160	1667	97	150	2,22
T5-6	< 53mm	Copiapó	22770	22	70466	17	26	72	35915	32	11667	813	1013	25	1110	21	202	1959	83	95	0,20
T5-7	< 53mm	Copiapó	32817	28	39245	19	25	135	39935	33	14727	960	1106	22	957	34	157	1647	91	135	1,38
T6-4	< 53mm	Copiapó	28191	23	45359	19	24	89	41519	27	13858	962	1330	20	1000	26	161	1950	97	118	1,06

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO M : GRÁFICOS DE COMPARACIÓN ENTRE FRACCIÓN FINA Y GRUESA PARA MUESTRAS DE LODO

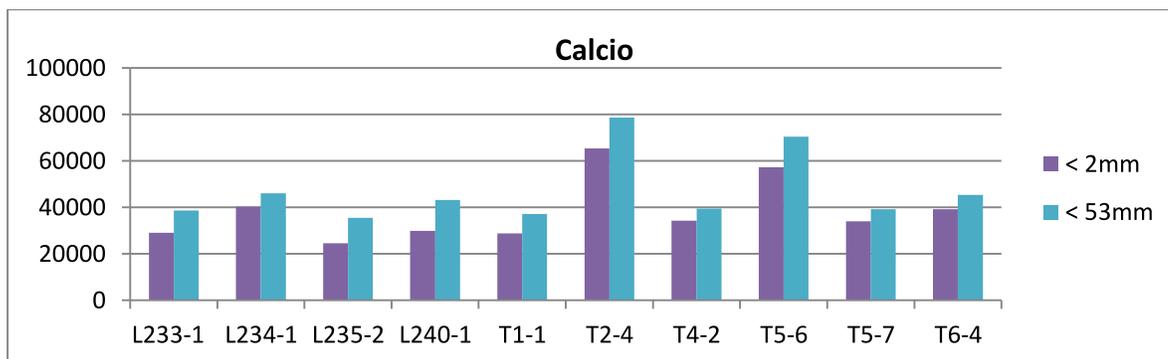


Figura M-1: Concentración de Ca en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

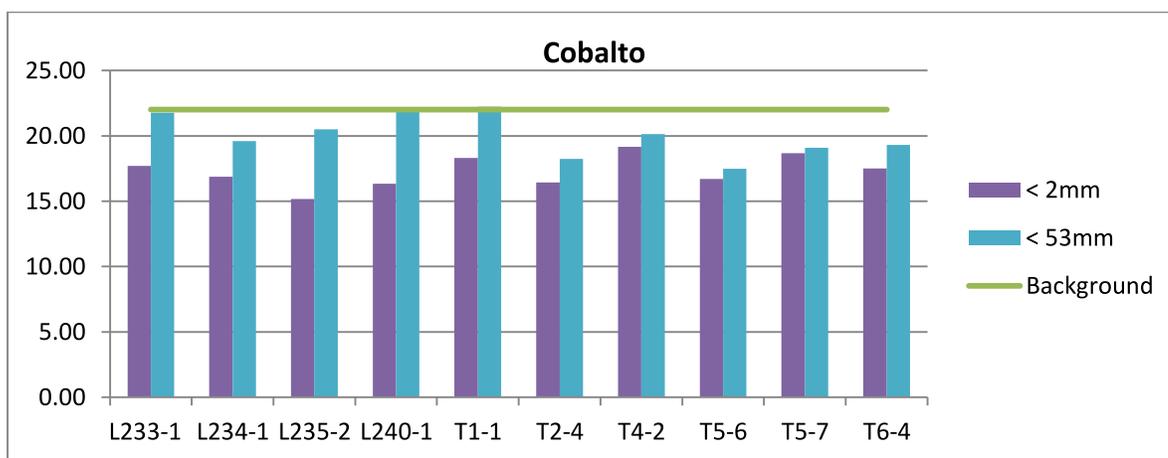


Figura M-2: Concentración de Co en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

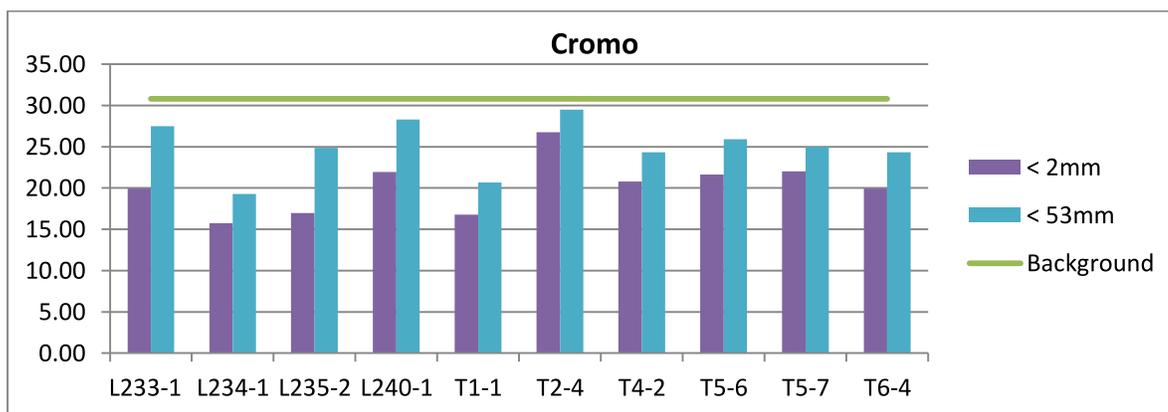


Figura M-3: Concentración de Cr en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

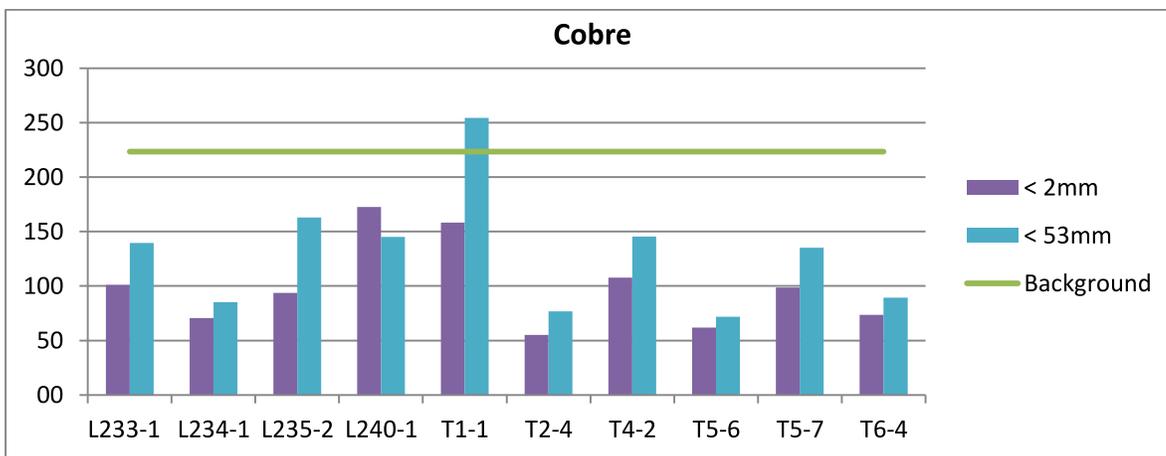


Figura M-4: Concentración de Cu en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

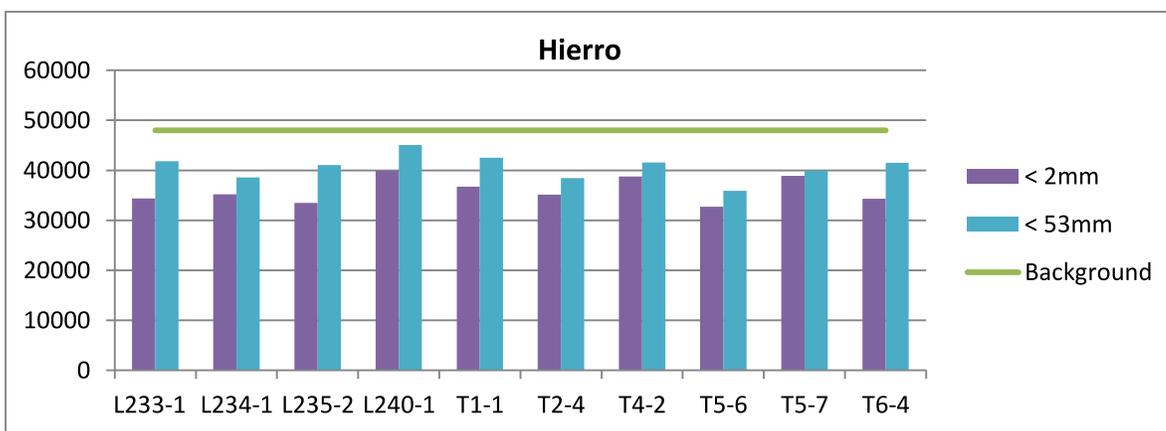


Figura M-5: Concentración de Fe en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

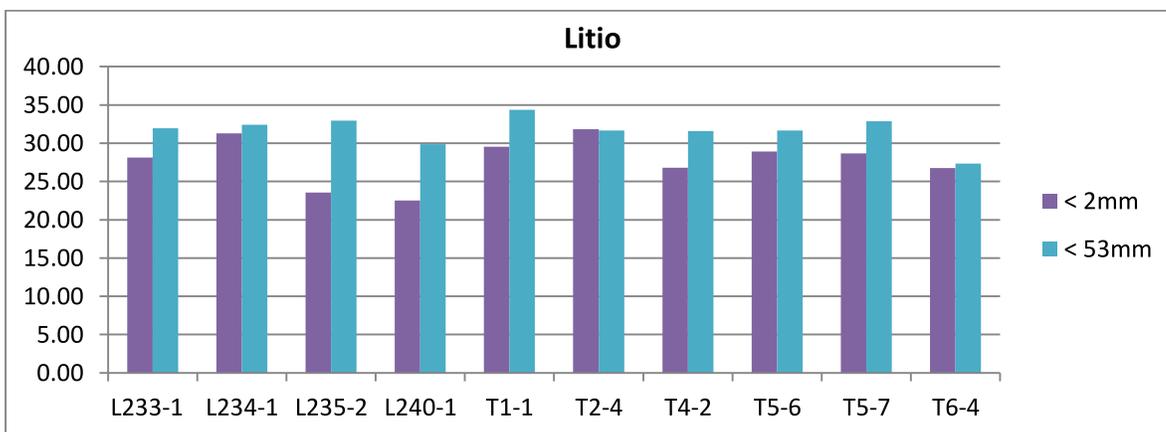


Figura M-6: Concentración de Li en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

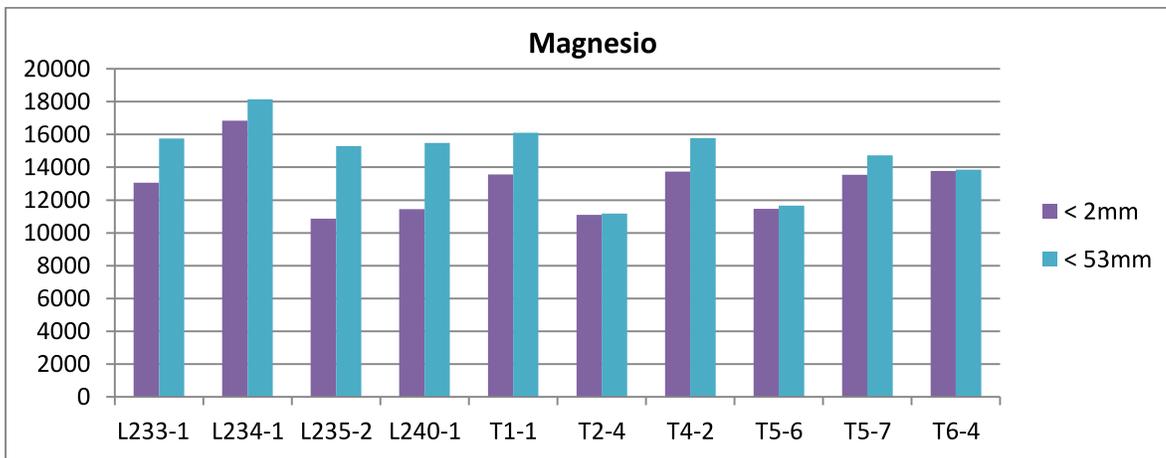


Figura M-7: Concentración de Mg en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

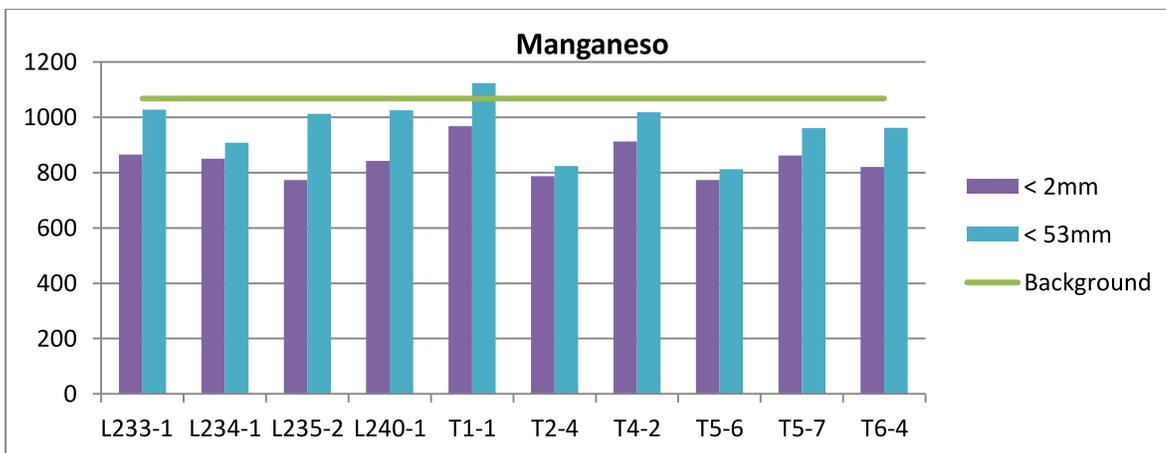


Figura M-8: Concentración de Mn en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

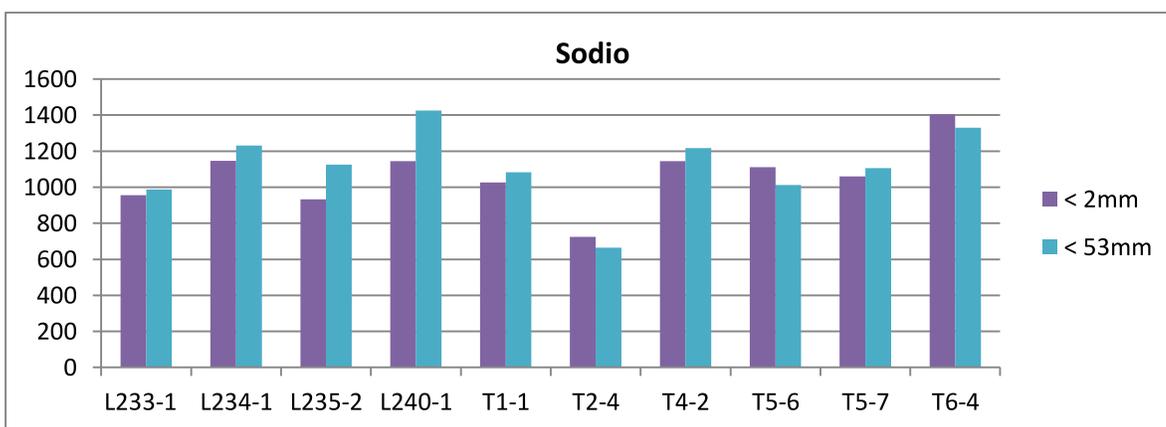


Figura M-9: Concentración de Na en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

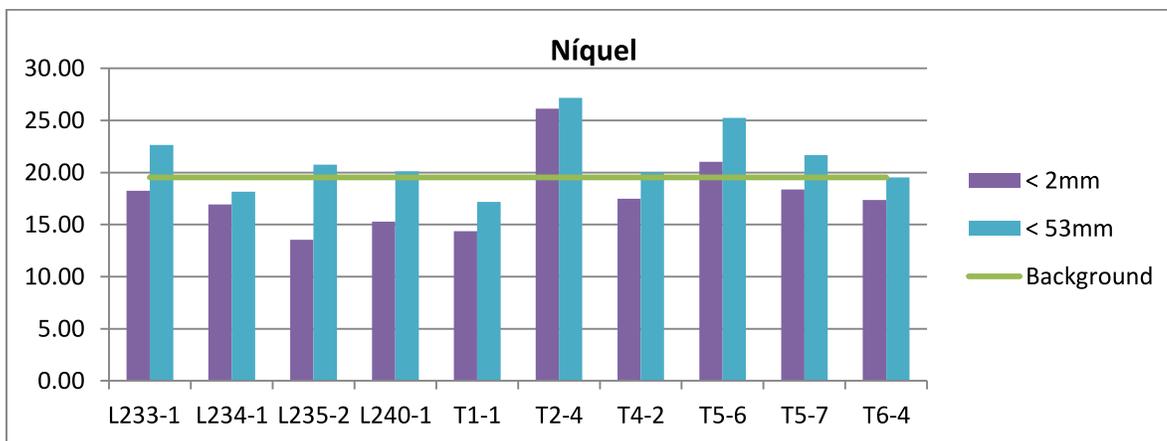


Figura M-10: Concentración de Ni en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

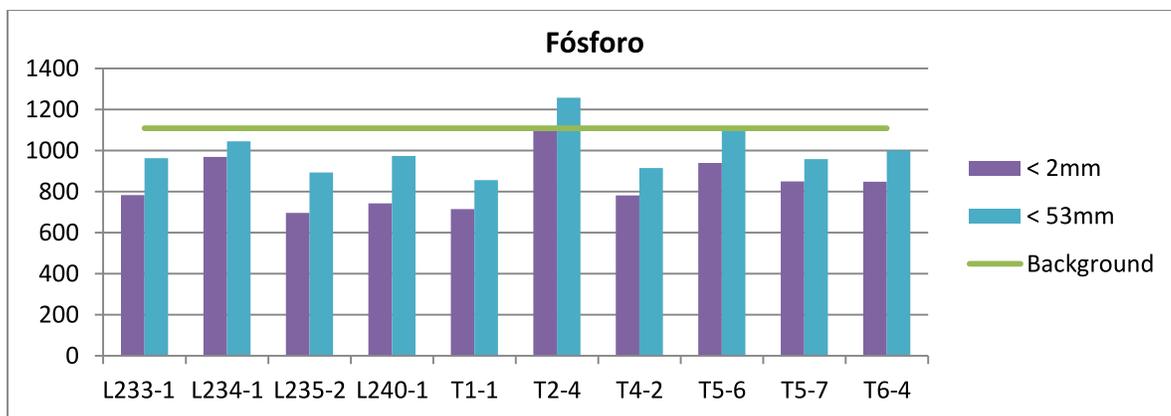


Figura M-11: Concentración de P en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

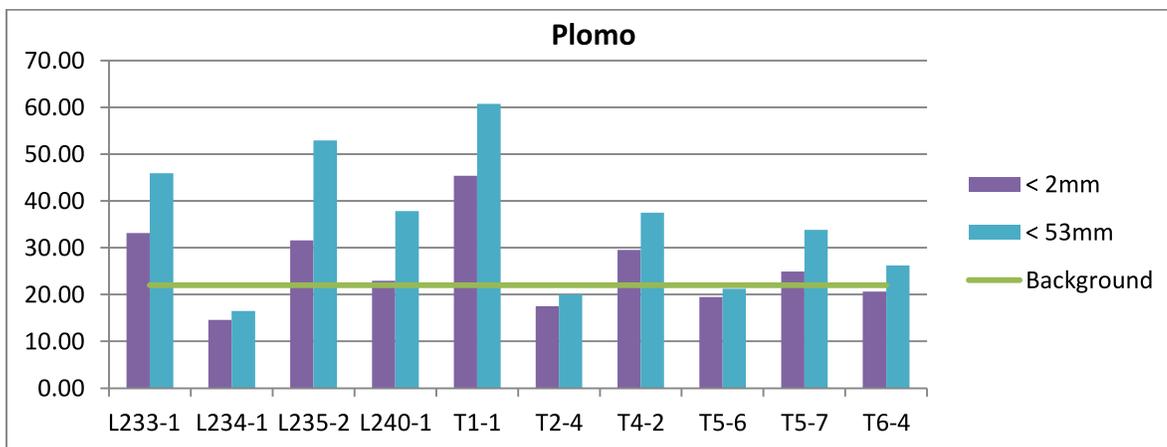


Figura M-12: Concentración de Pb en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

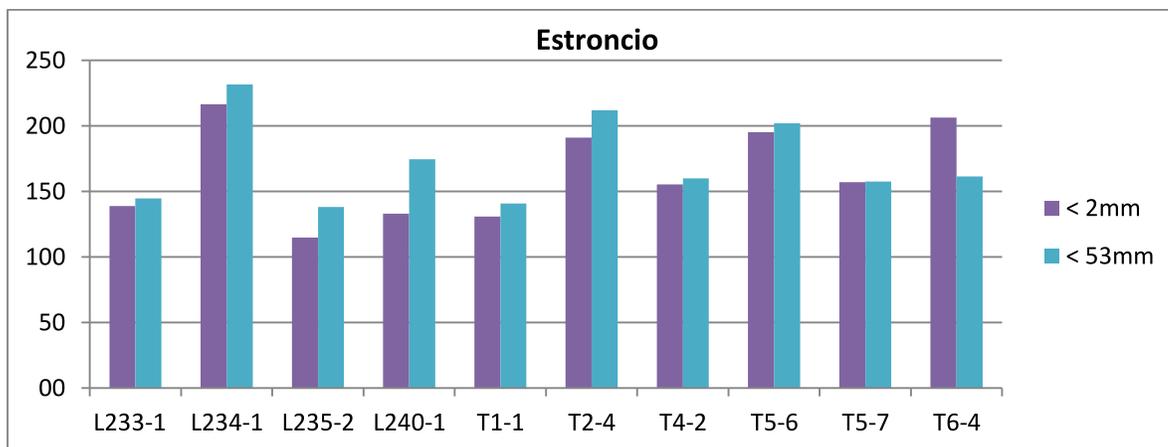


Figura M-13: Concentración de Sr en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

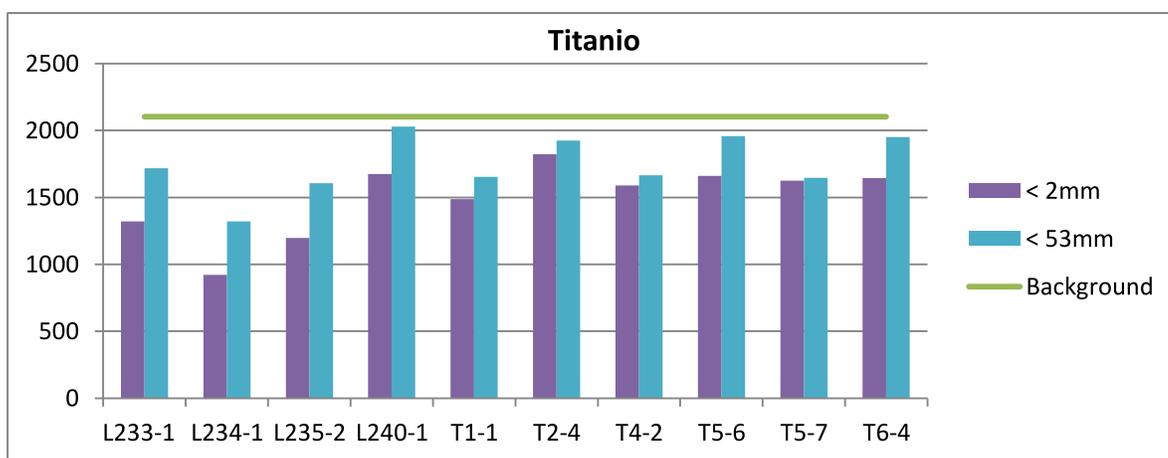


Figura M-14: Concentración de Ti en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

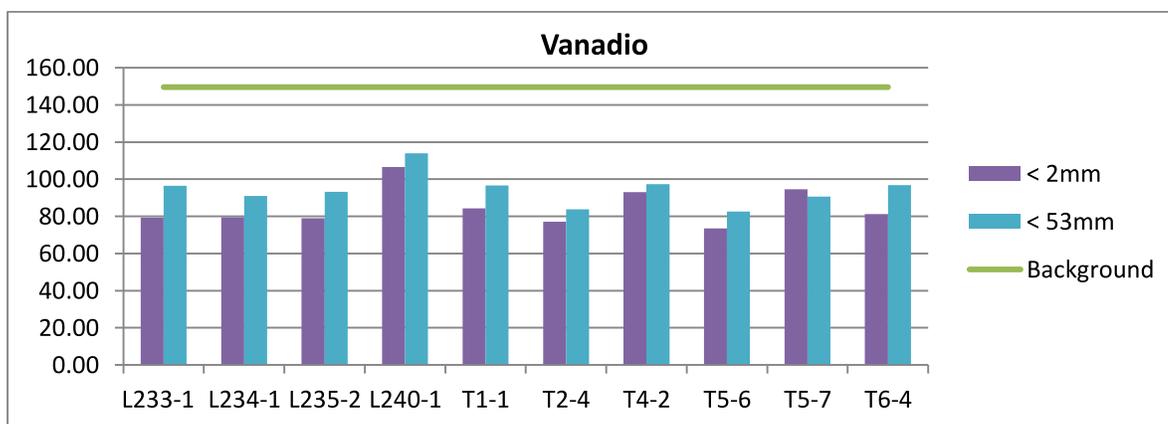


Figura M-15: Concentración de V en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

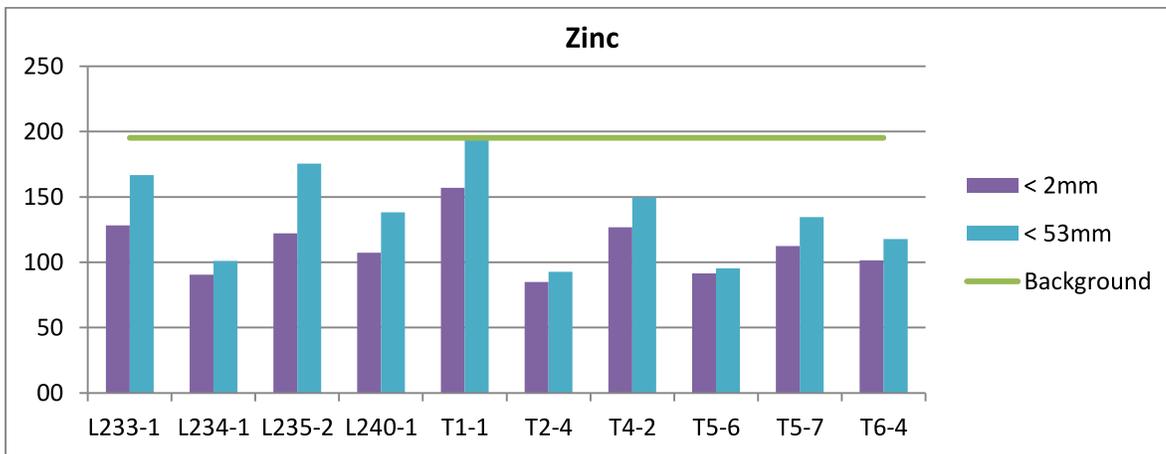


Figura M-16: Concentración de Zn en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

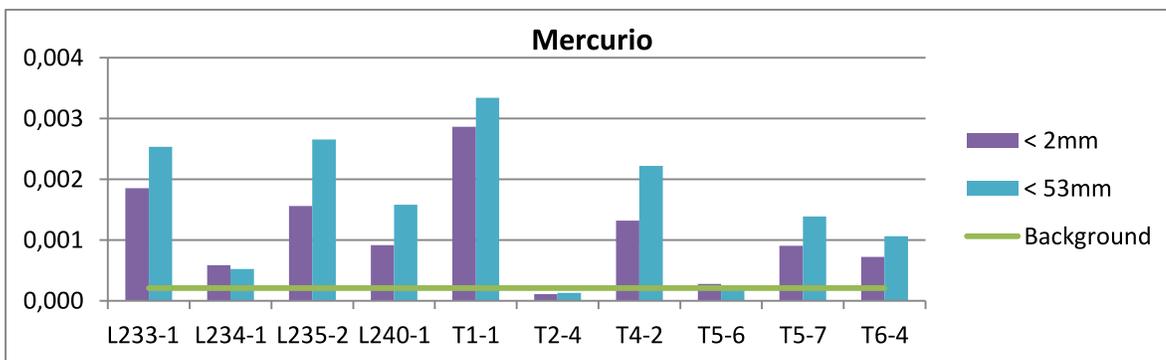


Figura M-17: Concentración de Hg en fracción fina y gruesa en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO N : GRÁFICOS DE COMPARACIÓN ENTRE DIGESTIÓN POR AGUA REGIA Y ATAQUE TOTAL PARA MUESTRAS DE LODO

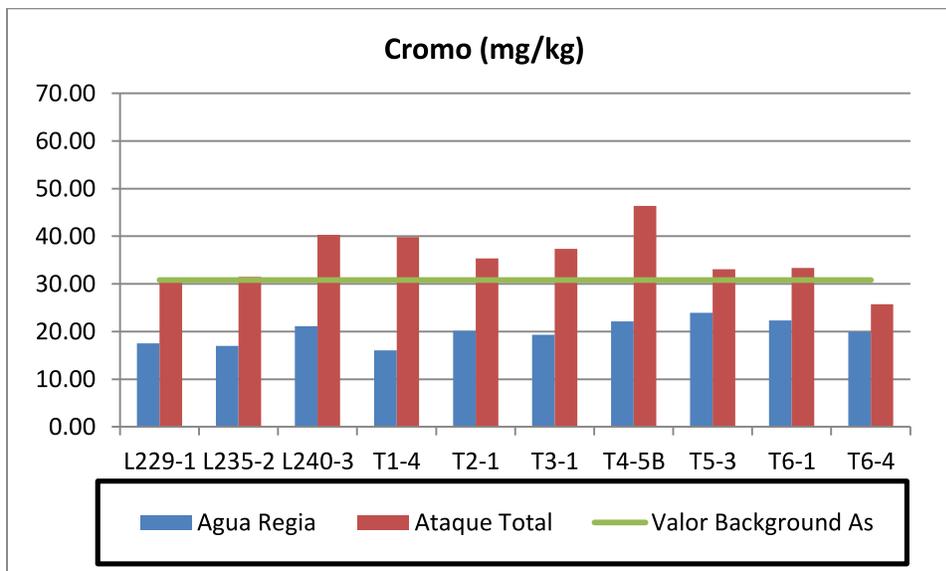


Figura N-1: Concentración de Cr con digestión por agua regia y ataque total en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia

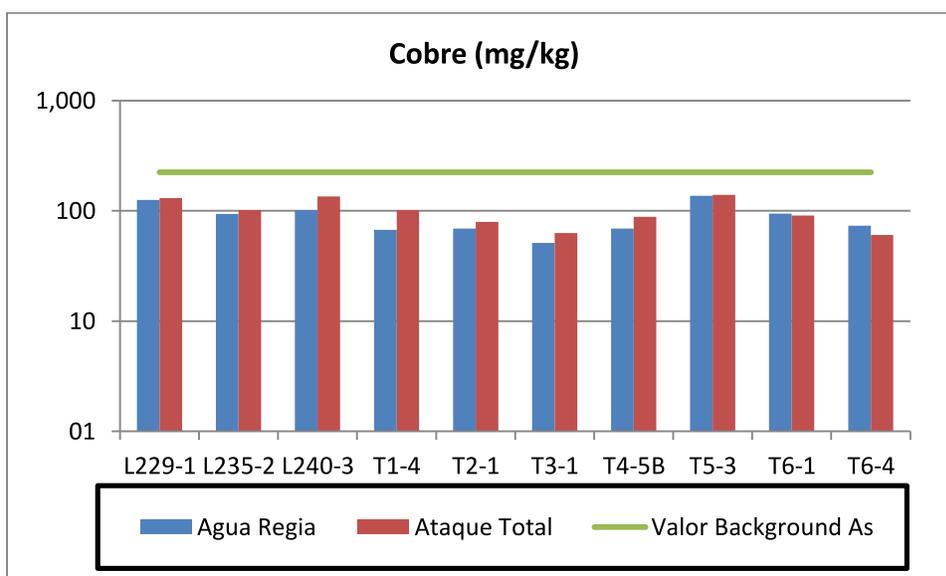


Figura N-2: Concentración de Cu con digestión por agua regia y ataque total en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia

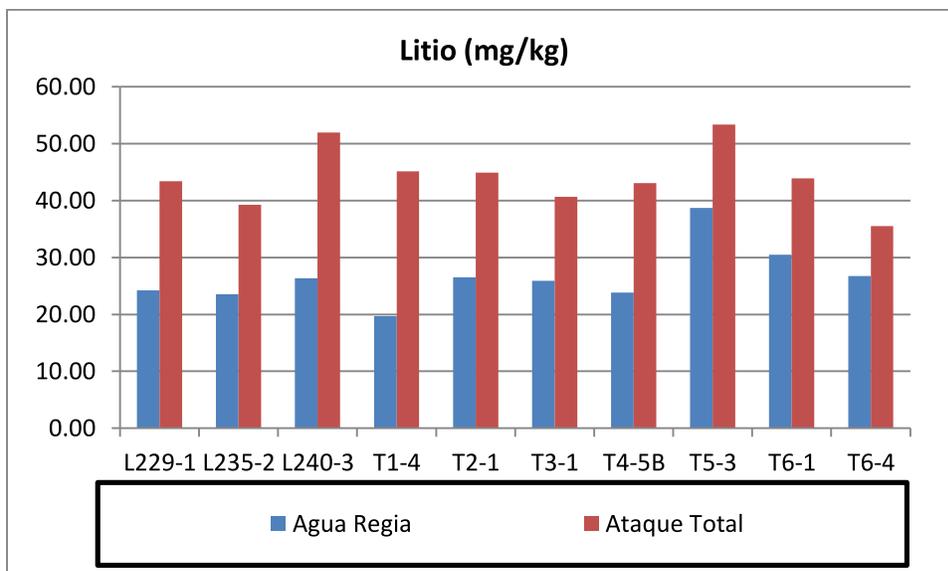


Figura N-3: Concentración de Li con digestión por agua regia y ataque total en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia

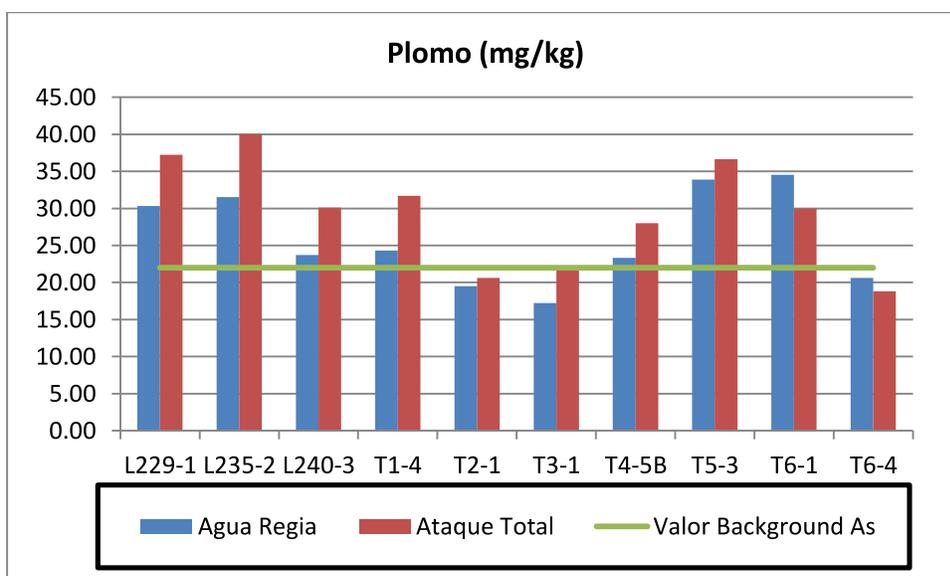


Figura N-4: Concentración de Pb con digestión por agua regia y ataque total en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia

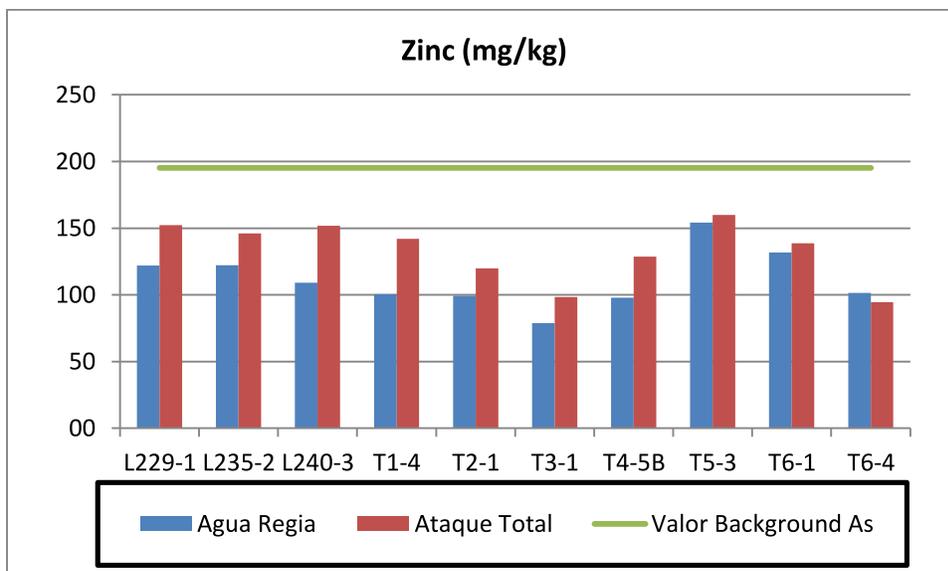


Figura N-5: Concentración de Zn con digestión por agua regia y ataque total en muestras de lodo. Fuente: Elaboración propia

**ANEXO O : CONCENTRACIONES ELEMENTALES DE MUESTRAS
BACKGROUND EN MG/KG.**

Tabla O - 1: Concentraciones elementales de muestras background en mg/kg.

Muestras	Al	As	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sr	Ti	V	Zn	Hg
Qf-1.1	20062	15	57154	16	32	50	38319	32	12117	971	963	28	1126	15	159	1408	82	85	0,02
Qf-1.2	16333	14	49847	13	26	68	28688	41	11201	700	5070	22	1144	13	282	1435	69	96	0,12
Qf-1.3	14816	10	41819	12	25	39	26546	30	9914	570	2759	19	915	8	284	1349	70	71	0,03
Qf-1.4	15990	15	54896	19	18	86	43587	51	21156	1566	10637	16	920	9	246	956	102	100	0,04
Qf-1.5	9343	13	48991	10	6	14	46792	12	15117	3153	394	6	738	5	92	642	96	23	0,03
Qf-2.1	18548	29	48287	13	22	66	26463	37	10966	1319	2518	19	1008	14	257	1267	60	119	0,24
Qf-2.2	17899	25	33314	13	22	61	26962	30	9595	794	1041	19	951	15	164	1225	66	149	0,24
Qf-2.3	14817	20	20898	12	22	59	25152	22	7884	619	823	18	819	12	122	1284	61	84	0,22
Qf-2.4	18450	24	37578	13	24	64	28488	30	9827	919	1018	20	1012	13	191	1255	66	108	0,21
Qf-2.5	27492	17	35704	19	21	69	43773	28	13877	999	1949	16	863	19	180	1631	117	163	0,06
Ki2c-2.1	20505	25	21920	20	28	228	48248	37	16843	1566	883	15	972	33	66	1635	140	135	0,08
Ki2c-2.2	19144	24	17524	19	30	167	45706	31	15317	1235	1087	15	977	29	68	1830	135	122	0,09
Ki2c-2.3	18597	30	26758	23	49	168	44392	59	28218	1190	506	17	735	37	54	1946	136	179	0,18
Ki2c-2.4	19422	26	16553	19	28	206	48973	35	16318	1406	794	15	987	35	64	1661	142	131	0,12
Ki2c-2.5	18285	31	47115	20	35	168	43858	35	18235	998	747	16	825	27	70	1470	131	142	0,09
Qa-2.1	21715	24	24724	18	21	88	37865	23	12943	844	596	15	748	19	86	1492	95	87	0,10
Qa-2.2	21082	41	24038	20	15	144	43620	28	15247	1288	897	11	900	41	88	1907	119	123	0,17
Qa-2.3	21589	42	20469	19	14	152	45206	29	16272	1186	928	11	894	66	82	1925	119	124	0,18
Qa-2.4	21028	42	20091	21	12	169	45900	30	17526	1267	1172	10	874	40	113	1839	113	132	0,25
Qa-2.5	22167	24	22927	18	19	117	42980	24	14003	906	642	13	836	22	94	1823	109	108	0,13
Qa-1.1	26763	33	23786	23	8	127	48873	24	17714	1716	1061	8	703	18	75	2485	133	204	0,14
Qa-1.2	29038	41	26143	25	10	184	51496	25	18263	1509	1314	9	701	25	96	2736	138	171	0,17
Qa-1.3	26257	30	24952	23	6	105	47948	22	17063	1599	1609	6	670	17	74	2308	126	162	0,19
Qa-1.4	25951	26	21805	22	6	78	49469	23	17474	1375	1876	5	605	12	62	2322	138	158	0,04
Qa-1.5	26262	21	31174	24	6	66	57425	22	19567	1350	914	5	572	12	72	2588	174	158	0,10
Ki1m-1.1	21213	107	21520	22	23	958	49239	26	16813	1376	557	16	993	67	63	1260	121	154	0,27
Ki1m-1.2	22369	182	11762	28	21	1146	55368	33	19788	762	505	15	937	114	51	1393	157	199	0,91
Ki1m-1.3	13254	86	30901	14	16	738	36767	12	9799	1801	382	10	808	48	60	941	88	117	0,54
Ki1m-1.4	18578	114	34770	22	20	1291	43420	21	13941	1558	555	14	1022	61	73	1267	102	152	0,39
Ki1m-1.5	22585	132	26399	25	21	1230	48862	29	20189	1207	897	16	872	78	79	1233	123	171	0,51
JK3-1.1	20302	62	10595	19	16	727	39322	25	18880	1277	381	12	769	54	43	1347	101	170	0,36
JK3-1.2	20632	84	10361	22	20	888	44954	25	16529	1251	546	14	901	78	59	1852	108	180	0,34
JK3-1.3	21141	81	20254	21	21	869	47013	26	18473	1719	521	14	827	170	63	1439	117	532	0,24

JK3-1.4	18097	83	7963	20	21	965	42321	24	14703	1260	446	16	779	84	56	1165	97	165	0,36
JK3-1.5	17292	59	10374	18	22	744	40717	22	14085	1209	517	14	857	61	63	1372	100	149	0,29
JK3-2.1	24002	118	11851	24	23	1234	50207	30	19847	1491	597	16	1005	91	67	1598	120	232	0,32
JK3-2.2	22808	95	15561	23	23	912	47065	29	19117	1442	601	17	1026	78	60	1852	109	208	0,30
JK3-2.3	22563	87	20776	23	23	797	47562	32	18678	1732	831	15	947	71	68	1812	128	212	0,28
JK3-2.4	23306	79	12255	22	21	997	48455	32	20391	2061	672	15	834	64	59	1472	123	211	0,38
JK3-2.5	22228	87	34022	22	27	1410	48052	32	19237	1635	744	17	925	62	61	1790	134	232	0,19
Kiag-1.1	18493	9	17205	15	27	108	33671	18	14138	585	661	12	1554	9	55	1435	90	50	0,03
Kiag-1.2	17656	9	8261	16	24	96	33520	17	11673	532	1457	13	1214	9	56	1545	86	50	0,02
Kiag-1.3	17995	13	18615	24	29	306	39272	16	16256	610	741	13	2313	9	58	1279	91	53	0,03
Kiag-1.4	24096	9	11517	26	31	232	35230	19	15439	547	1559	14	1975	8	55	1559	79	55	0,02
Kiag-1.5	20200	9	8622	16	26	106	34105	18	11911	595	628	13	1074	11	52	1666	89	54	0,04
Kiag-2.1	15504	19	33604	13	22	140	32472	17	9891	506	758	11	1080	12	58	1494	97	52	0,03
Kiag-2.2	14249	16	23566	13	21	144	32059	16	9394	503	713	11	959	12	57	1509	99	52	0,03
Kiag-2.3	15883	14	17828	14	26	112	37276	17	10866	560	607	13	1165	11	56	1630	112	55	0,06
Kiag-2.4	15581	18	32841	12	19	146	27461	17	11361	458	737	10	921	14	67	1456	81	52	0,04
Kiag-2.5	17085	23	25672	15	25	178	35509	20	12376	572	744	12	1249	17	67	1623	104	66	0,04
Ki1m-2.1	16509	41	119886	12	23	292	32050	19	8959	683	780	14	1410	33	200	1445	86	101	0,18
Ki1m-2.2	15293	43	139251	11	20	321	27241	21	8674	553	674	13	1518	30	278	1150	67	85	0,13
Ki1m-2.3	16811	71	128122	14	17	311	32439	20	7551	1221	559	17	2227	90	147	835	73	656	0,15
Ki1m-2.4	19238	45	109386	12	23	318	30777	24	11174	566	910	17	1921	30	202	1011	84	94	0,06
Ki1m-2.5	18534	34	137832	11	25	194	28777	22	10943	491	991	17	2102	19	342	1022	77	82	0,06
Ki2c-1.1	19722	18	27508	20	22	95	41571	21	16287	637	1600	13	949	15	96	2327	123	69	0,02
Ki2c-1.3	20419	22	44373	15	19	59	40413	21	16576	888	668	11	909	12	79	1366	125	54	0,03
Ki2c-1.4	19389	15	12959	19	25	64	43855	22	15568	764	869	14	849	12	71	2120	121	67	0,05
Ki2c-1.5	19941	17	25274	18	24	85	39524	24	15796	712	2078	14	1035	15	90	2038	110	70	0,02

Fuente: Elaboración propia.

Tabla O - 2: Concentraciones elementales de muestras background tamizadas a 53 µm en mg/kg.

Muestras	Al	As	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sr	Ti	V	Zn	Hg
Qf-1.1	23580	21	68178	19	35	99	41425	35	12226	894	1711	31	1145	17	231	1899	98	89	0,03
Qf-2.2	25546	40	52947	18	34	120	36355	45	13000	1199	1392	26	1263	20	239	1643	80	197	0,31
Ki2c-2.2	25440	44	16597	25	34	326	54099	40	18501	1500	1058	20	1201	43	84	2048	143	153	0,17
Qa-2.2	26630	49	20305	23	27	251	51357	32	16870	1170	947	16	1088	54	91	2230	139	149	0,32
Qa-1.2	30167	47	26954	26	16	279	51771	27	17227	1470	1099	12	769	36	96	2748	143	177	0,26
Ki1m-1.3	17750	148	23026	22	26	1208	48380	19	11450	1504	751	16	1045	96	82	1413	112	194	0,76
JK3-1.3	26393	165	23240	30	35	1973	59737	32	16090	1324	940	23	1296	182	90	1935	134	439	0,62
JK3-2.3	30195	181	15397	30	38	1587	63194	37	18036	1287	1064	24	1433	151	91	2313	148	295	0,56
Kiag-1.3	27026	21	21777	28	41	386	49373	25	21659	809	1079	20	2485	15	81	2286	116	91	0,05
Kiag-2.3	21335	22	12975	18	33	179	43869	23	14311	709	754	17	1249	19	70	1860	116	85	0,05
Ki1m-2.2	16516	60	143518	12	24	487	31823	22	9815	593	622	16	1789	44	272	1279	77	112	0,14
Ki2c-1.3	20631	25	47372	16	24	92	42439	21	18028	935	660	13	1140	16	85	1424	123	72	0,05

Fuente: Elaboración propia.

Tabla O - 3: Concentraciones elementales de muestras background superficiales y profundas en mg/kg.

Muestras	Al	As	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sr	Ti	V	Zn	Hg
Ki2c -1.2 sup	20239	16	35180	17	18	90	33678	22	15585	605	770	13	756	13	88	1721	91	65	0,03
Qa-2.1 sup	24429	25	24123	18	20	105	39068	27	14990	837	679	15	808	20	95	1424	89	94	0,17
Ki1m-2.1 prof	6785	24	270017	3	7	39	9053	8	6298	187	569	11	1915	21	413	219	32	34	0,06
Jk3-1.4 sup	21773	110	11984	22	26	1175	47670	27	17155	1532	660	16	890	108	65	1403	113	213	0,52
Qf-2.4 prof	17139	21	41417	12	23	49	28108	28	10039	658	1208	18	916	12	232	1381	63	89	0,12
Qf-2.4 sup	49510	22	43396	22	27	101	39500	46	17776	1201	1223	28	1028	26	217	955	95	145	0,17
JK3-2.2 prof	21989	19	77608	17	15	125	36758	30	22139	1672	387	10	519	10	49	1702	91	161	0,04
Qf-2.5 prof	29366	18	36047	19	20	62	43103	28	13283	967	1846	13	813	23	160	1754	120	161	0,05
Kiag-1.1 prof	13207	26	125129	10	17	66	17802	10	18037	278	457	8	747	5	96	776	46	34	0,02
Ki2c-1.2 prof	17819	28	103204	13	14	21	24170	14	14390	351	959	8	515	5	99	1537	83	35	0,01
Qa-2.1	22276	15	41653	16	14	54	39883	25	12965	1022	853	10	729	11	132	1357	98	80	0,02
Qf-2.5 sup	28650	16	40722	18	19	58	43643	28	13764	1067	2327	13	838	26	219	1736	117	150	0,05
Qf-2.5 prof	16670	31	36453	12	22	36	26953	27	8924	1120	937	20	934	10	170	1173	58	71	0,14
Qa-2.5 sup	19870	18	23742	15	14	63	35342	22	11076	775	721	12	633	13	92	1309	90	70	0,11
Qa-2.5 prof	19712	19	25020	15	20	38	35454	24	11504	718	779	14	630	11	89	1662	96	70	0,02
Kiag-1.1 sup	19366	10	21845	14	26	112	32223	18	14043	575	683	12	1748	11	62	1528	92	52	0,04
Ki2c-2.3 prof	17572	13	28490	23	52	18	39334	75	32950	932	246	15	418	28	35	2355	130	177	0,03
Qa-1.1 prof	29033	229	40553	32	6	176	48750	24	17542	1426	1272	6	558	12	92	2659	138	161	0,03
Ki2c-2.5 prof	16355	10	21248	15	26	29	32244	29	11791	765	2495	12	662	13	65	983	116	86	0,01
Ki1m-2.1 sup	15692	55	117643	11	20	407	29918	17	8377	610	781	13	1355	48	203	1289	78	103	0,29
Qf-2.4 prof	20876	20	37346	13	21	68	27770	31	10269	742	1150	18	863	14	215	1207	63	104	0,11
Ki2c -2.5 sup	20993	20	22562	18	27	122	38465	35	16252	974	7837	15	803	18	111	1382	110	105	0,05
Qa-1.2 sup	30703	37	24511	23	10	207	47596	25	17308	1411	1311	8	607	24	91	2484	128	152	0,25
Jk3-2.2 sup	22106	139	10340	24	20	1036	46641	28	17159	1578	820	15	855	120	67	2135	116	211	0,53
Ki2c-2.3 sup	11125	15	15188	12	26	85	21031	40	16537	611	271	9	356	22	22	1126	62	100	0,17
Qa-1.1 sup	30016	34	23423	23	10	181	47629	25	17122	1333	1343	8	603	25	86	2632	134	155	0,16

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO P : ALTURA DE MUESTREO EN ZONAS BACKGROUND

Tabla V - 1: Altura de muestreo en zonas background y altura de ubicación de Fundición Paipote.

Nombre	Altura [m]
Ki2c-1	963
Ki2c-2	816
Kiag-1	1.155
Kiag-2	613
Kilm-1	908
Kilm-2	915
JK3-1	646
JK3-2	644
Qa-1	921
Qa-2	937
Qf-1	977
Qf-2	1.011
Fundición Paipote	470

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO Q : GRÁFICOS DE COMPARACIÓN ENTRE FRACCIÓN FINA Y GRUESA PARA MUESTRAS BACKGROUND

En los gráficos siguientes se indica la concentración de cada elemento en la fracción fina y gruesa, además del valor background obtenido por el método de Lepeltier como referencia.

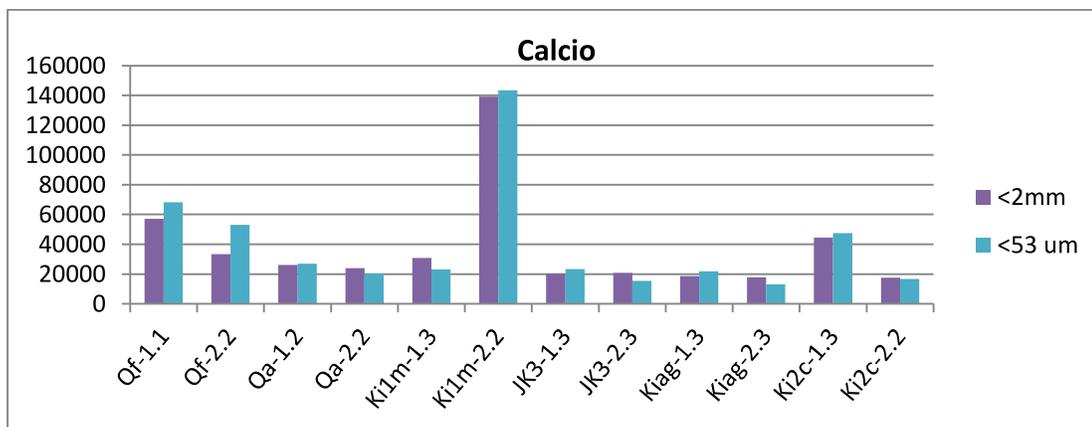


Figura Q-1: Concentración de Ca en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

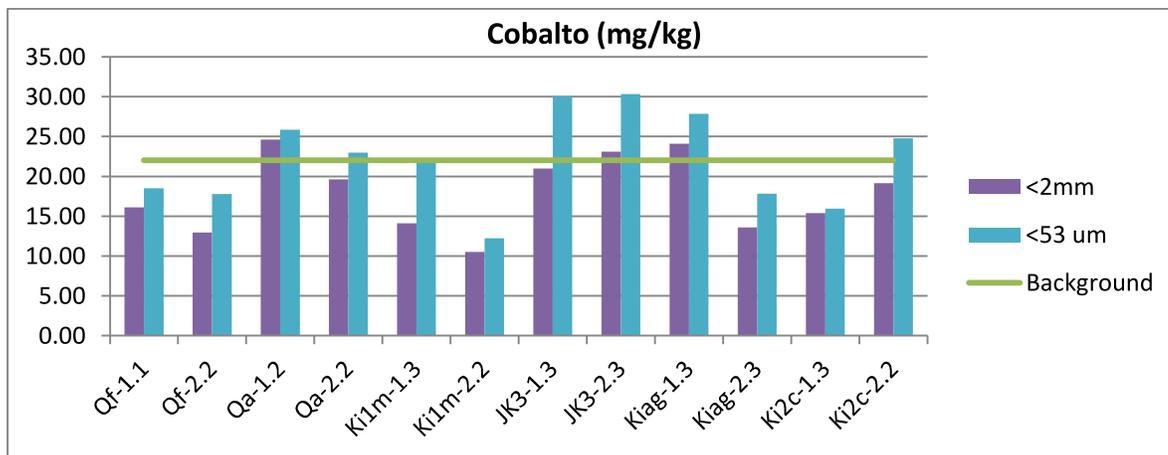


Figura Q-2: Concentración de Co en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

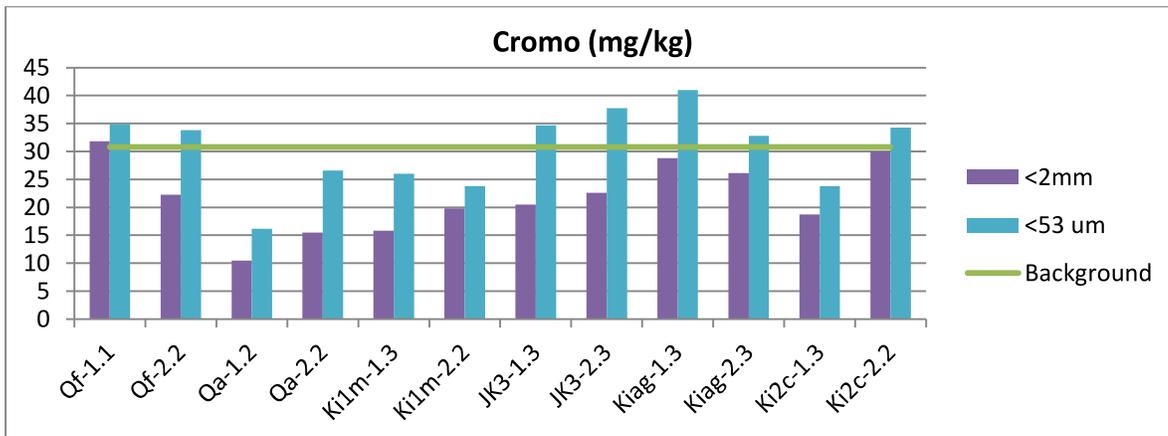


Figura Q-3: Concentración de Cr en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

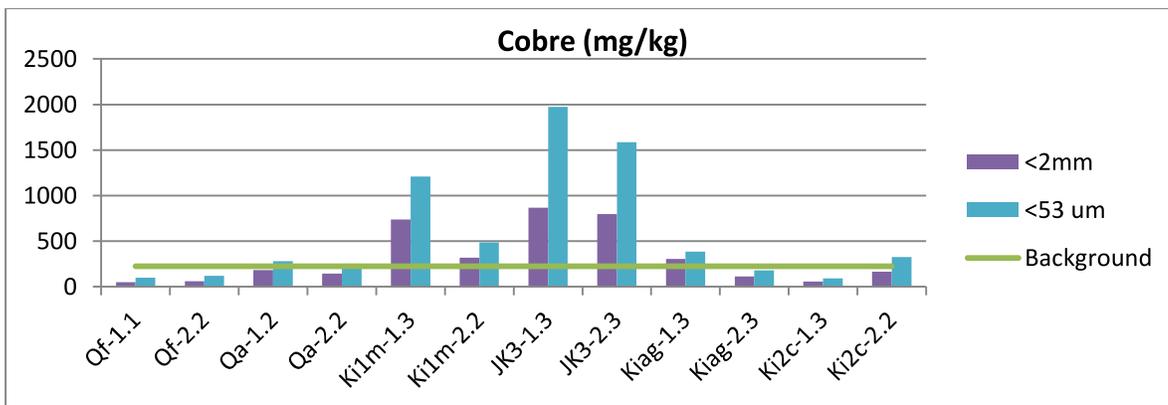


Figura Q-4: Concentración de Cu en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

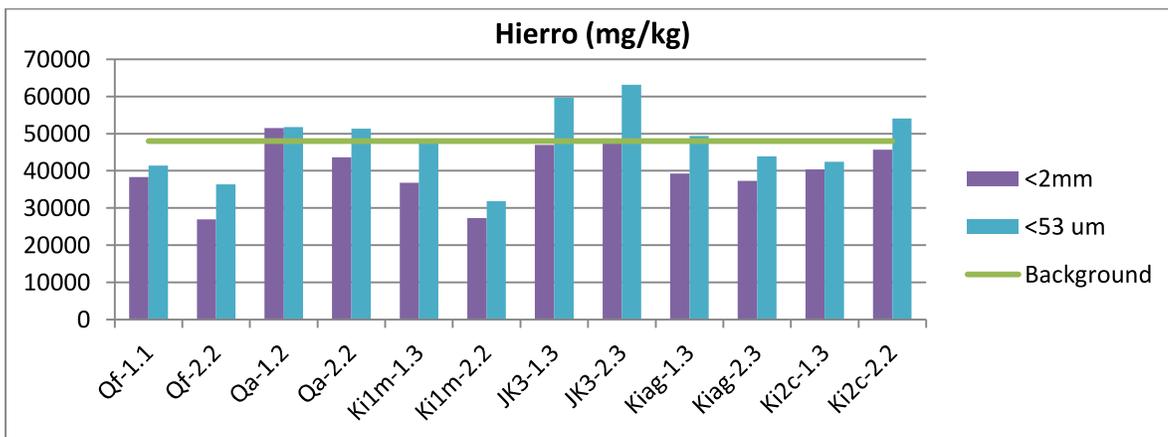


Figura Q-5: Concentración de Fe en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

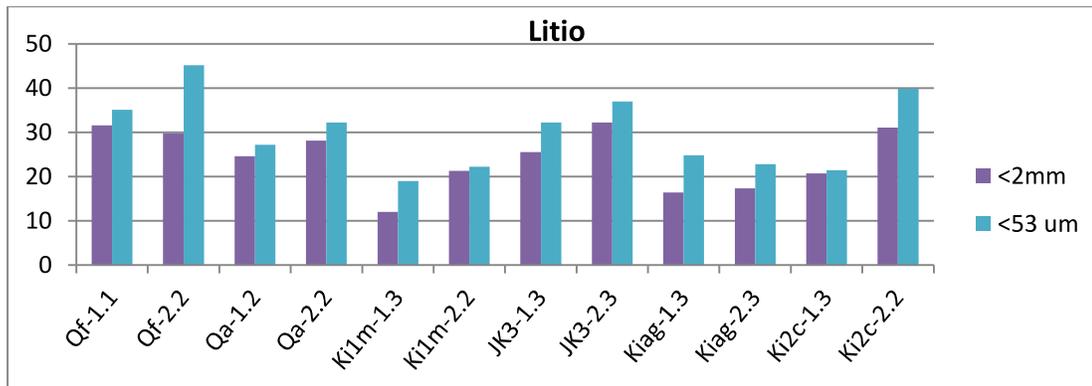


Figura Q-6: Concentración de Li en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

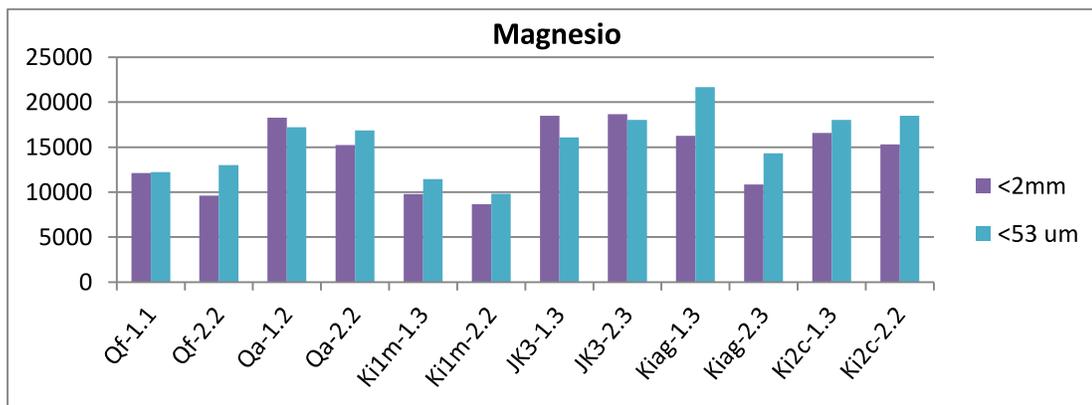


Figura Q-7: Concentración de Mg en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

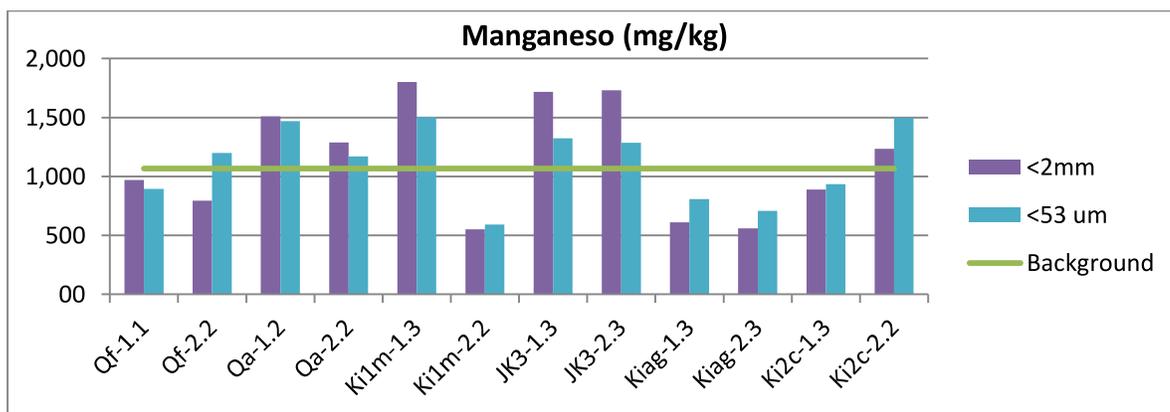


Figura Q-8: Concentración de Mn en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

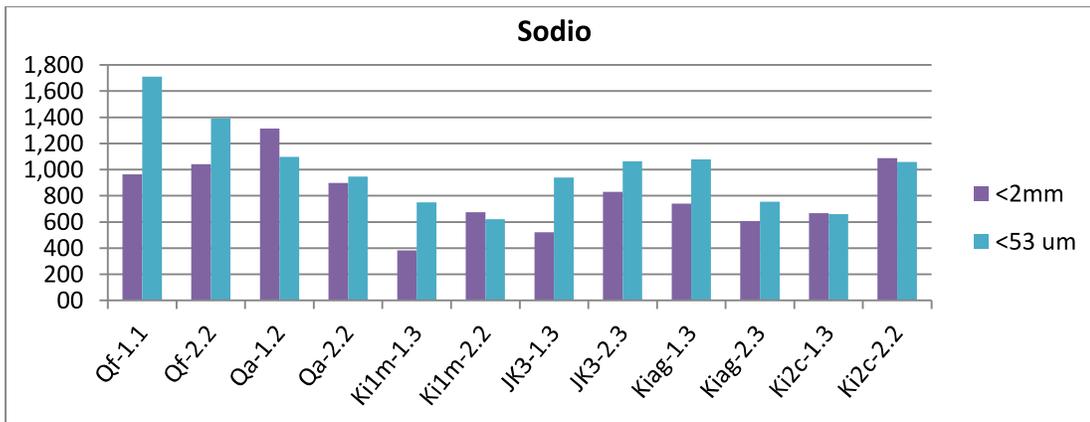


Figura Q-9: Concentración de Na en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

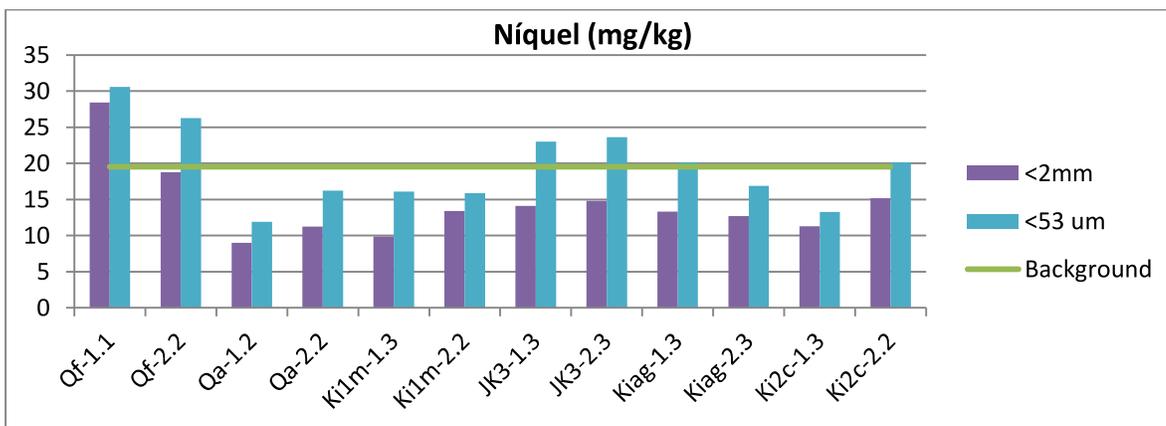


Figura Q-10: Concentración de Ni en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

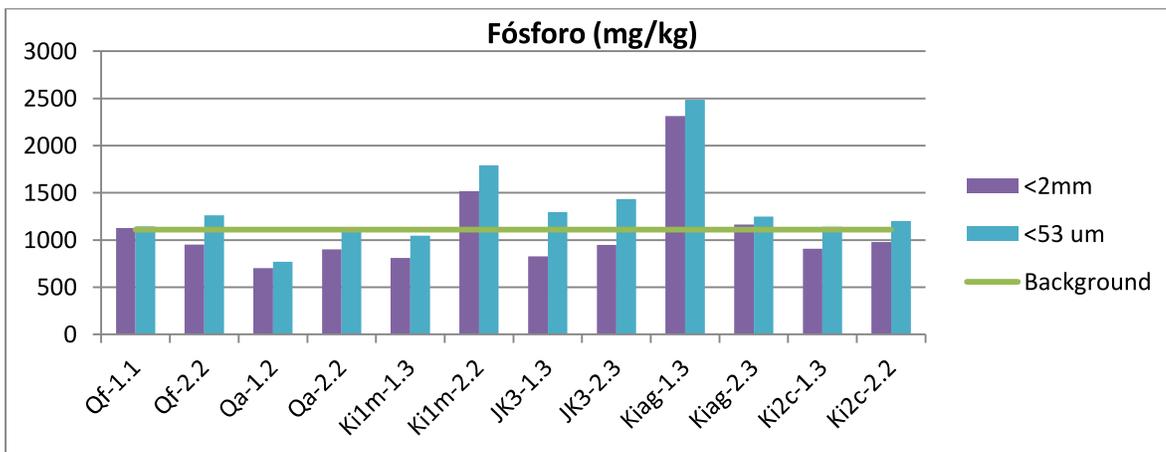


Figura Q-11: Concentración de P en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

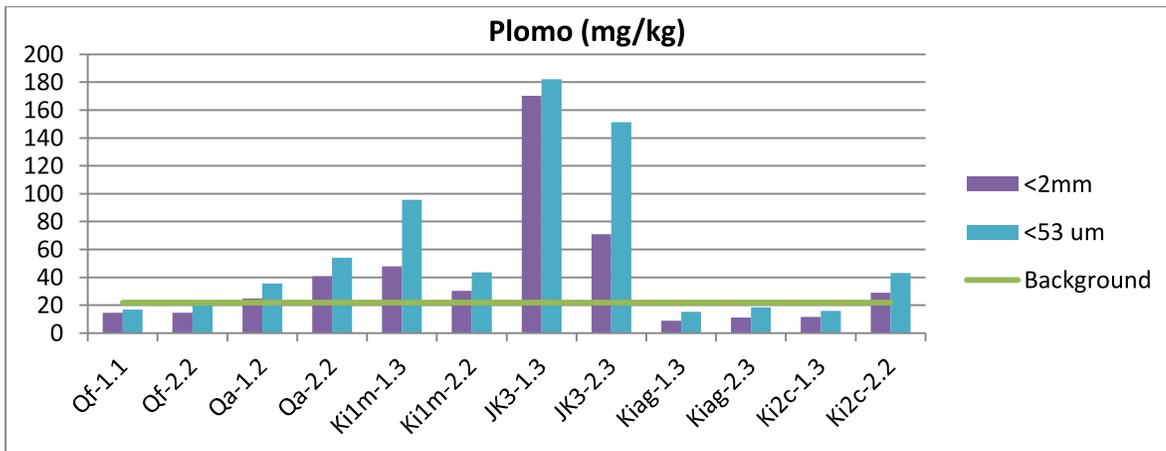


Figura Q-12: Concentración de Pb en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

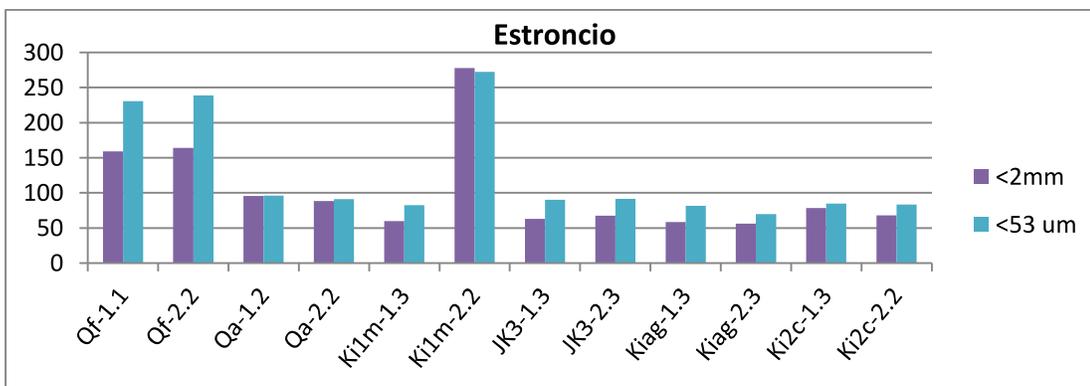


Figura Q-13: Concentración de Sr en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

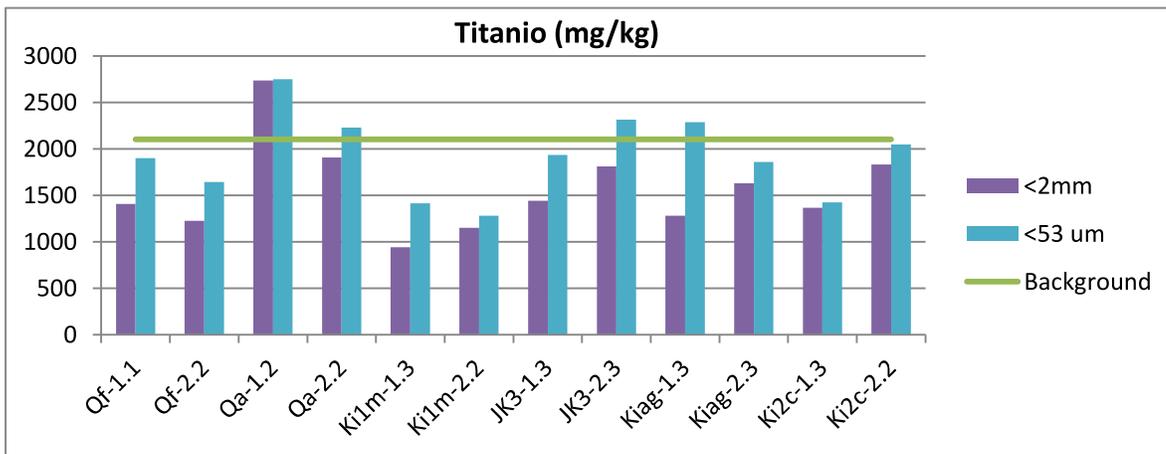


Figura Q-14: Concentración de Ti en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

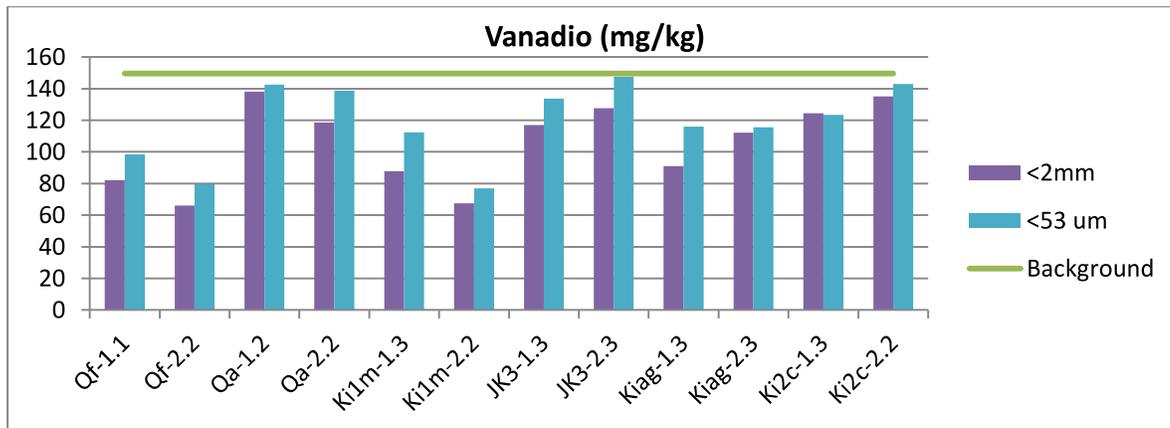


Figura Q-15: Concentración de V en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

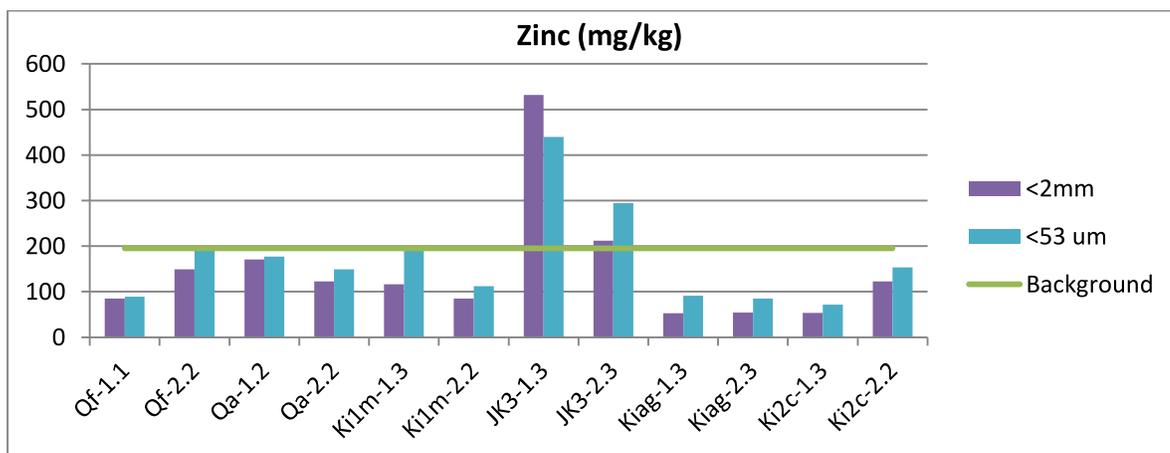


Figura Q-16: Concentración de Zn en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

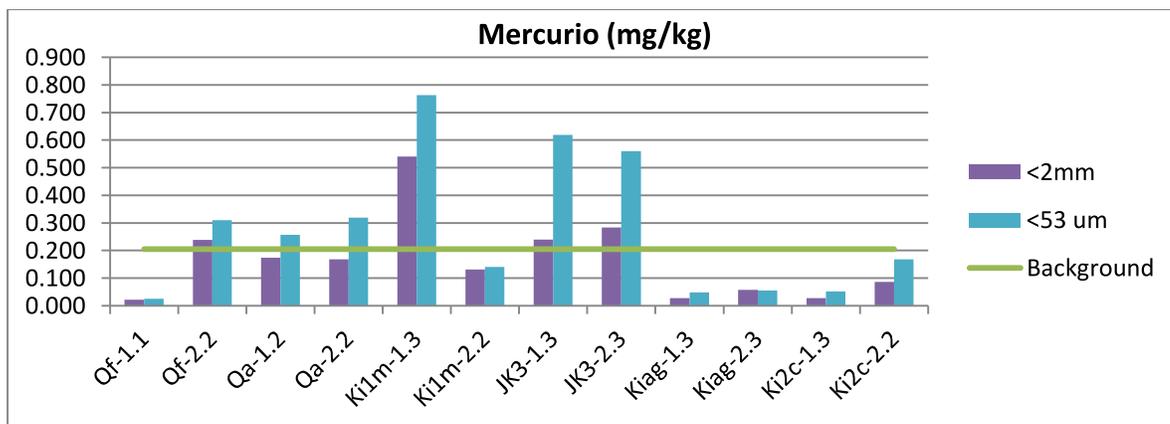


Figura Q-17: Concentración de Hg en fracción fina y gruesa en muestras background. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO R : GRÁFICOS DE COMPARACIÓN ENTRE MUESTRAS BACKGROUND SUPERFICIALES Y PROFUNDAS

En los gráficos siguientes se indica la concentración de cada elemento en las muestras superficiales y profundas, además del valor background obtenido por el método de Lepeltier como referencia. La barra amarilla es la muestra background de ese punto debido a que no existe la muestra en profundidad para este punto.

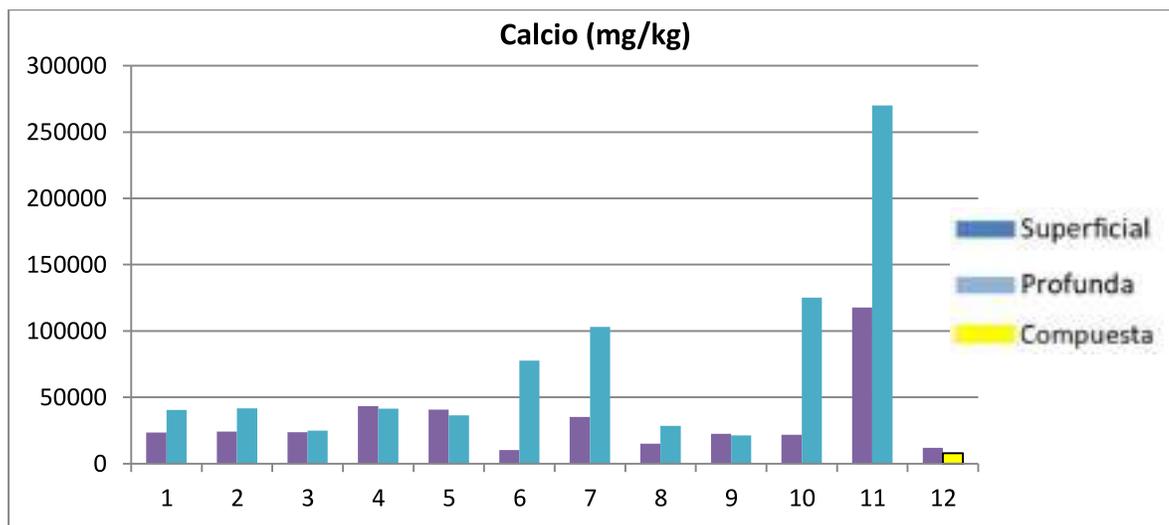


Figura R-1: Concentración de Ca en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

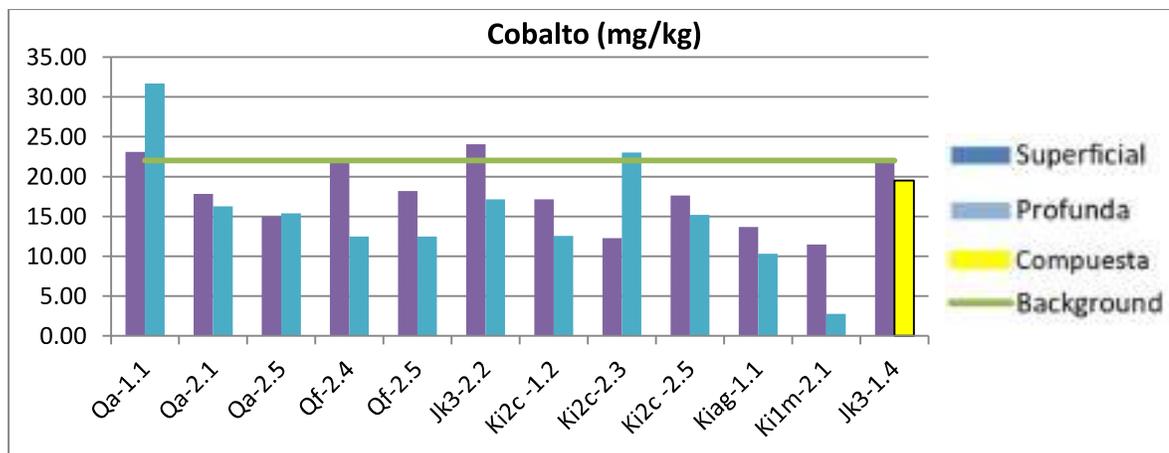


Figura R-2: Concentración de Co en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

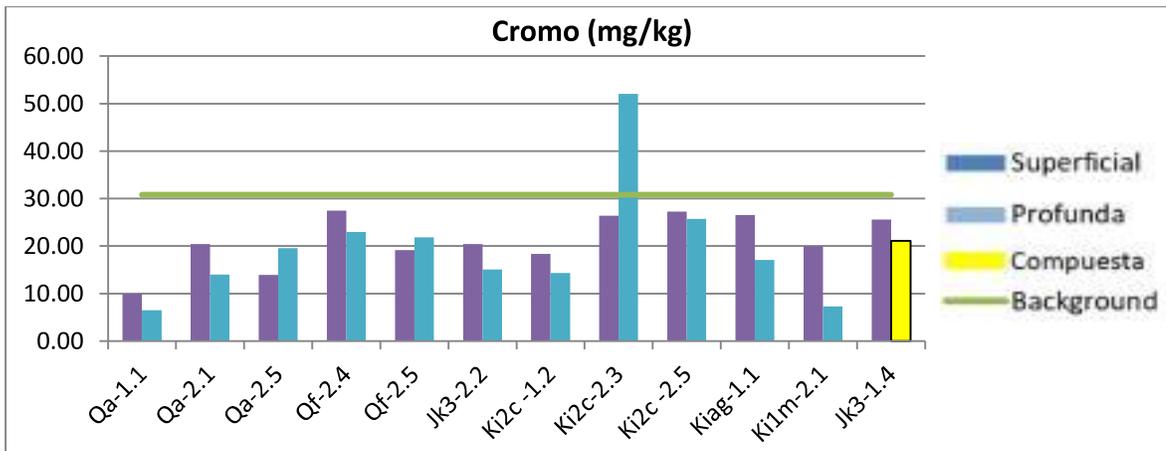


Figura R-3: Concentración de Cr en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

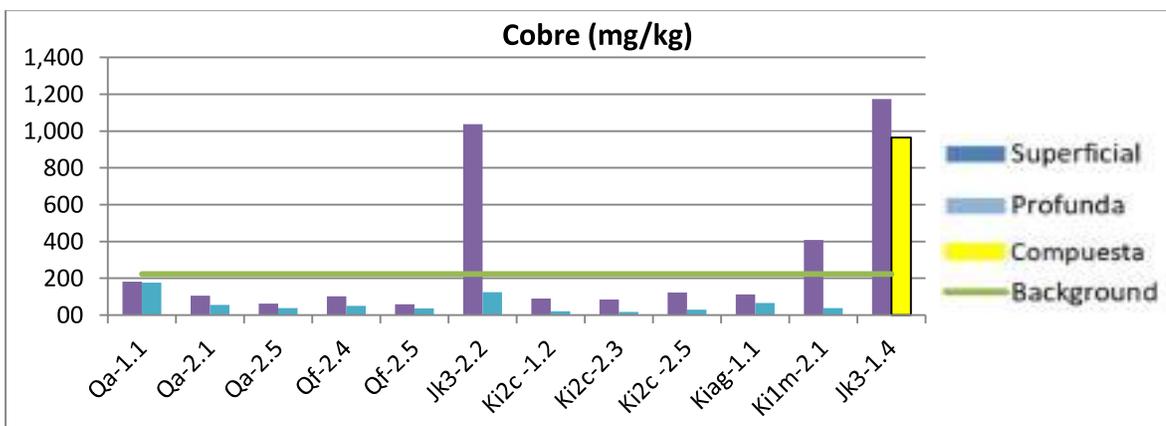


Figura R-4: Concentración de Cu en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

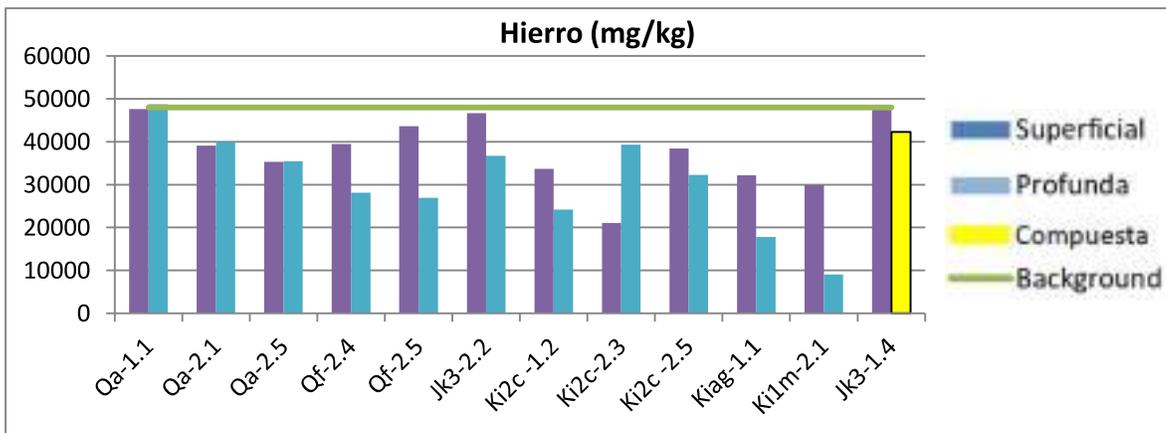


Figura R-5: Concentración de Fe en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

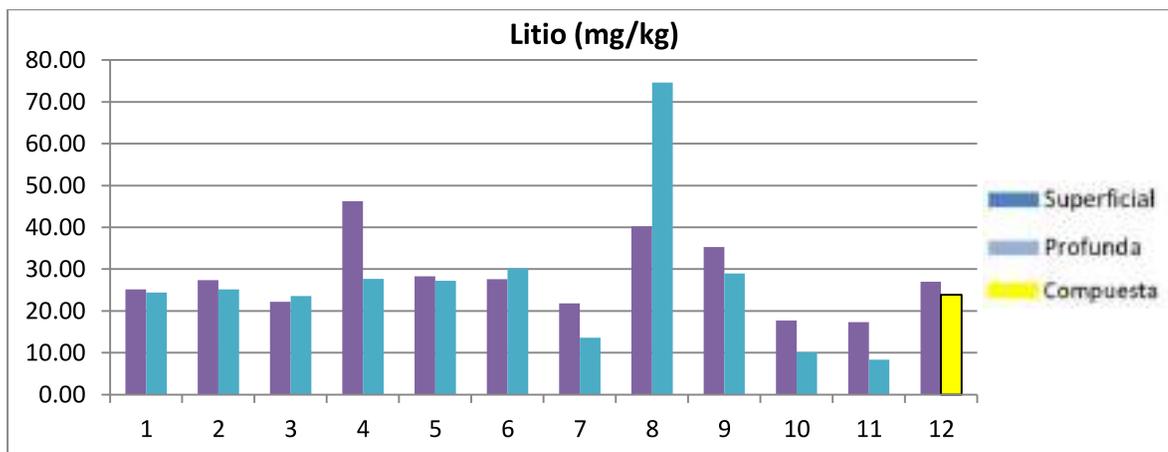


Figura R-6: Concentración de Li en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

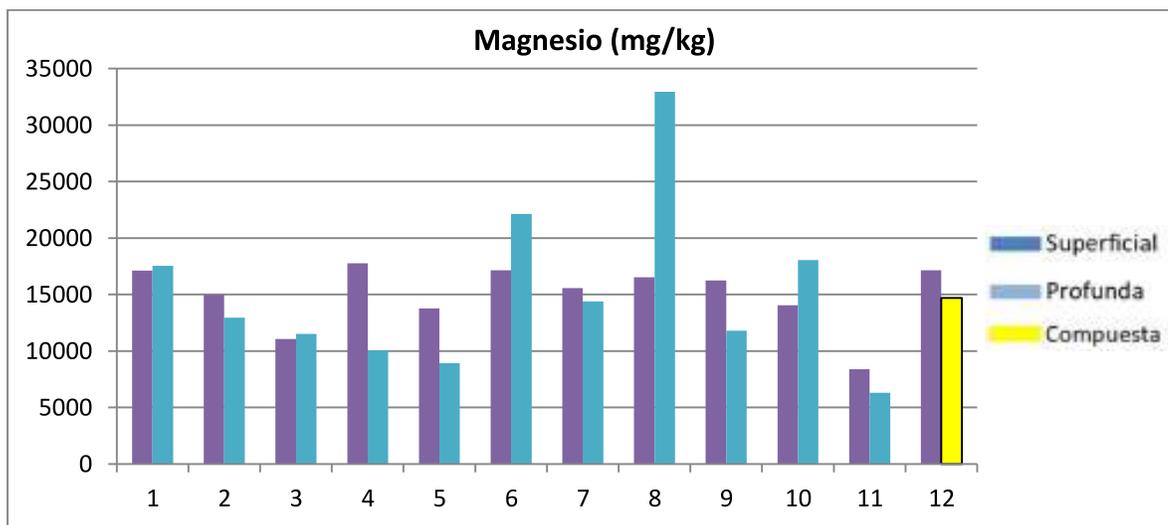


Figura R-7: Concentración de Mg en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

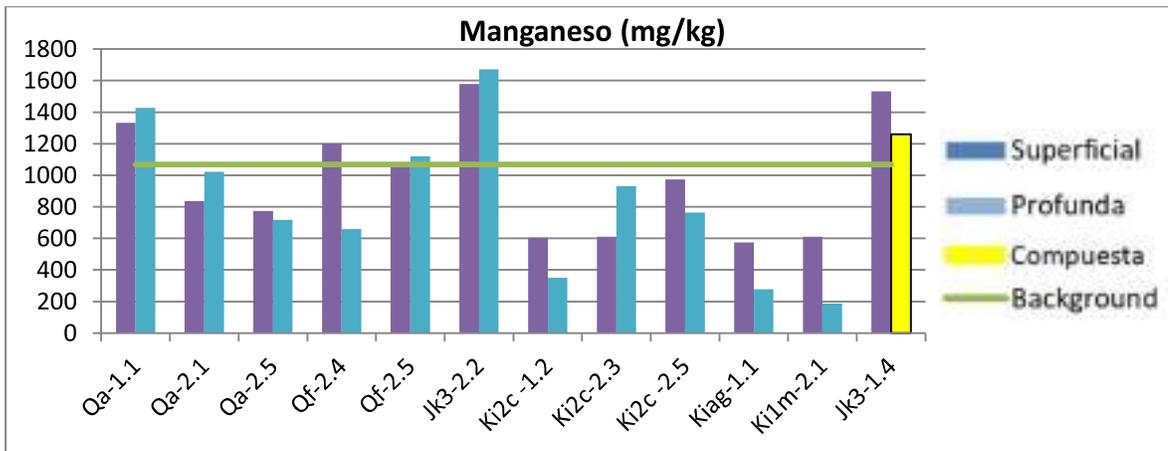


Figura R-8: Concentración de Mn en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

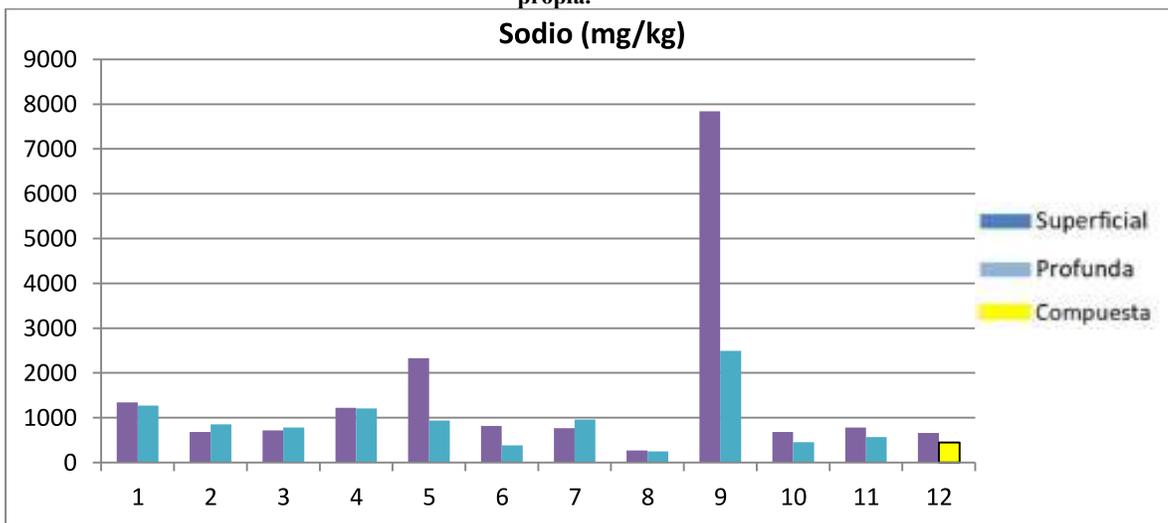


Figura R-9: Concentración de Na en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

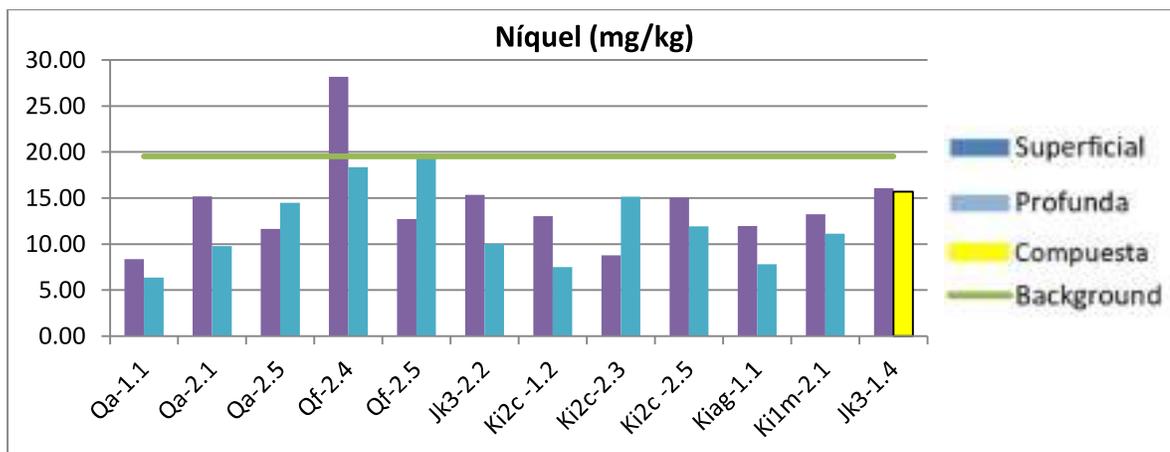


Figura R-10: Concentración de Ni en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

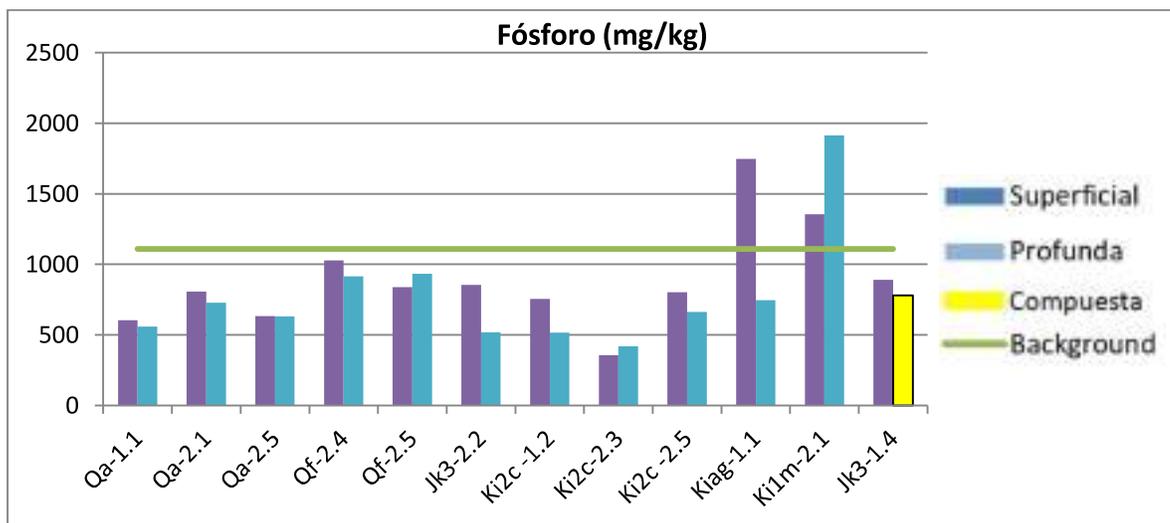


Figura R-11: Concentración de P en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

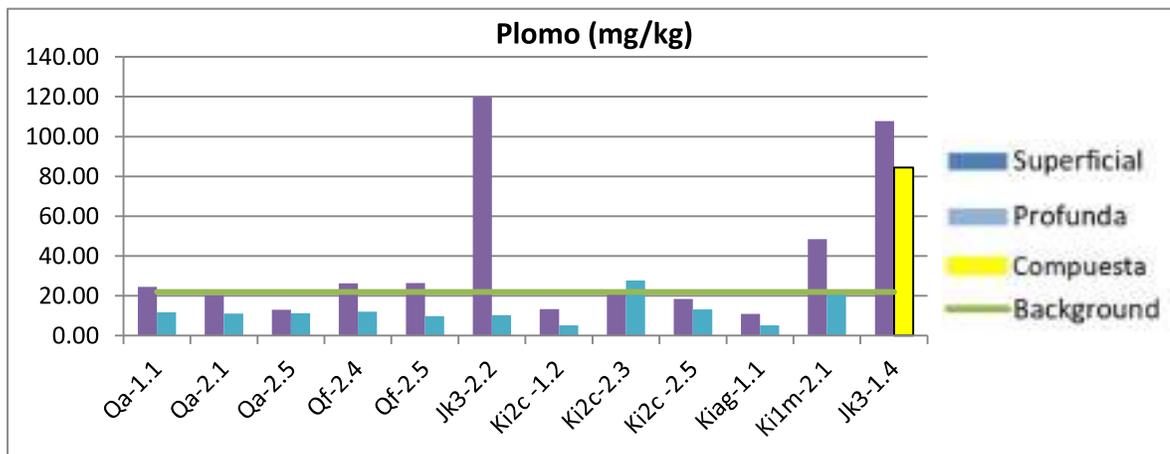


Figura R-12: Concentración de Pb en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

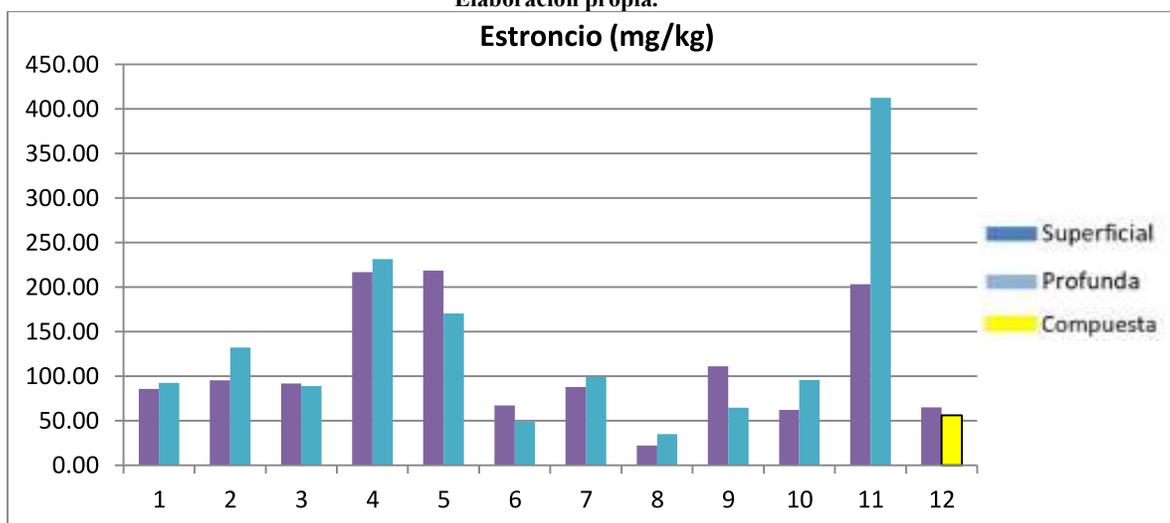


Figura R-13: Concentración de Sr en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

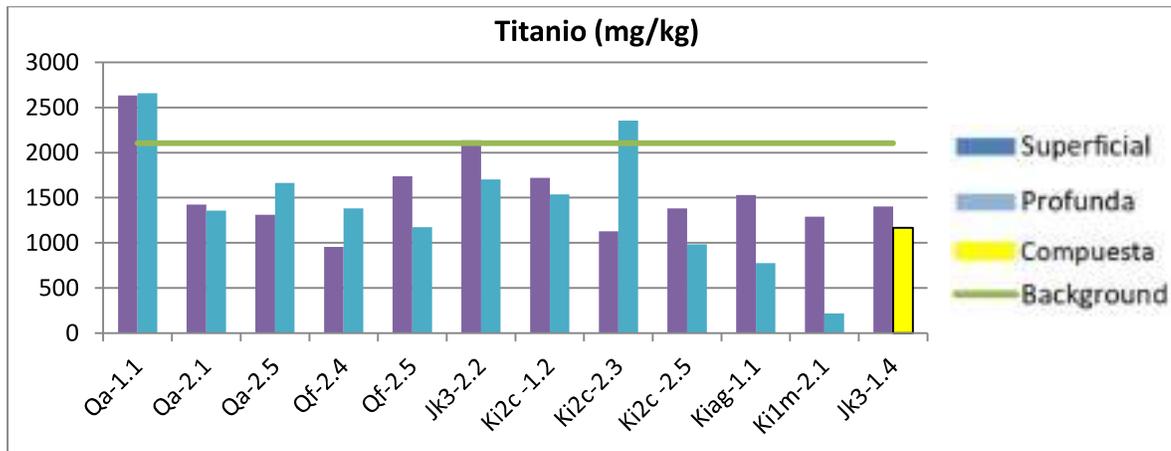


Figura R-14: Concentración de Ti en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

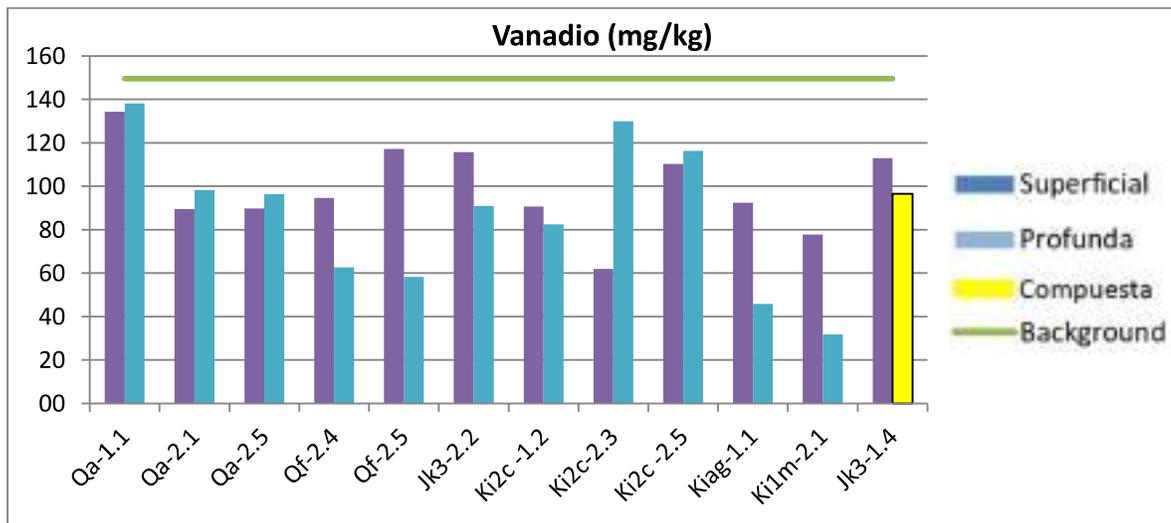


Figura R-15: Concentración de V en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

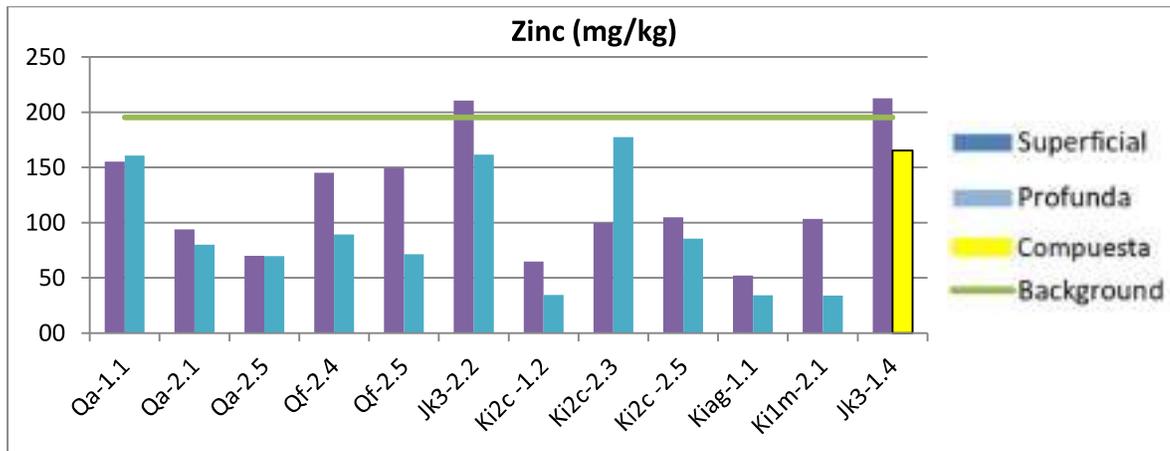


Figura R-16: Concentración de Zn en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

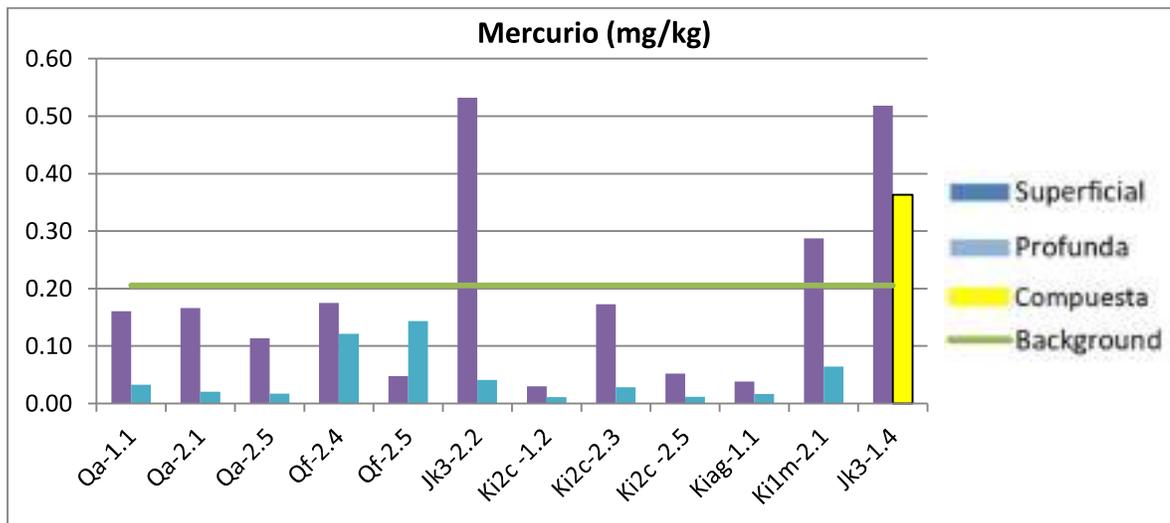


Figura R-17: Concentración de Hg en muestras background superficiales y profundas. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO S : GRÁFICOS DE COMPARACIÓN ENTRE DIGESTIÓN POR AGUA REGIA Y ATAQUE TOTAL PARA MUESTRAS BACKGROUND

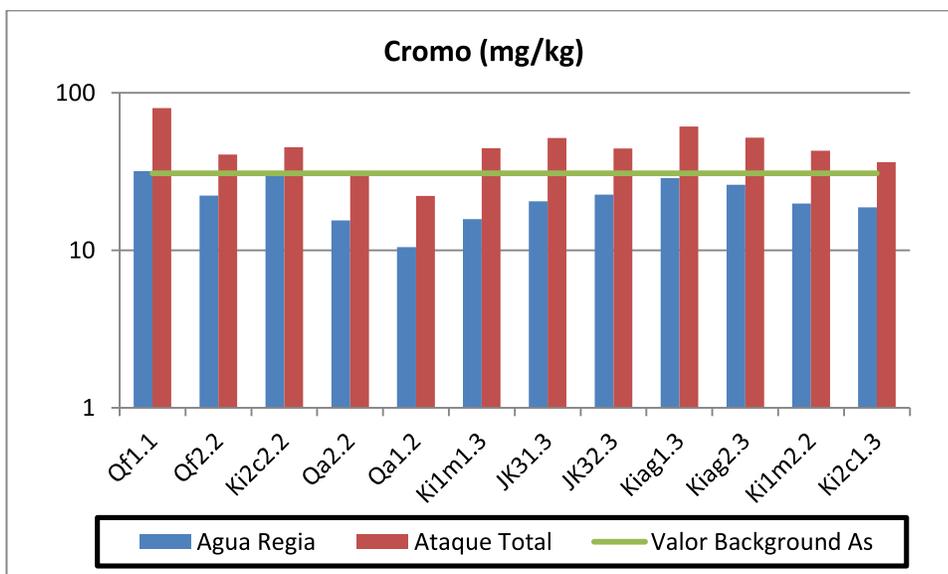


Figura S-1: Concentración de Cr con digestión por agua regia y ataque total en muestras background.
Fuente: Elaboración propia.

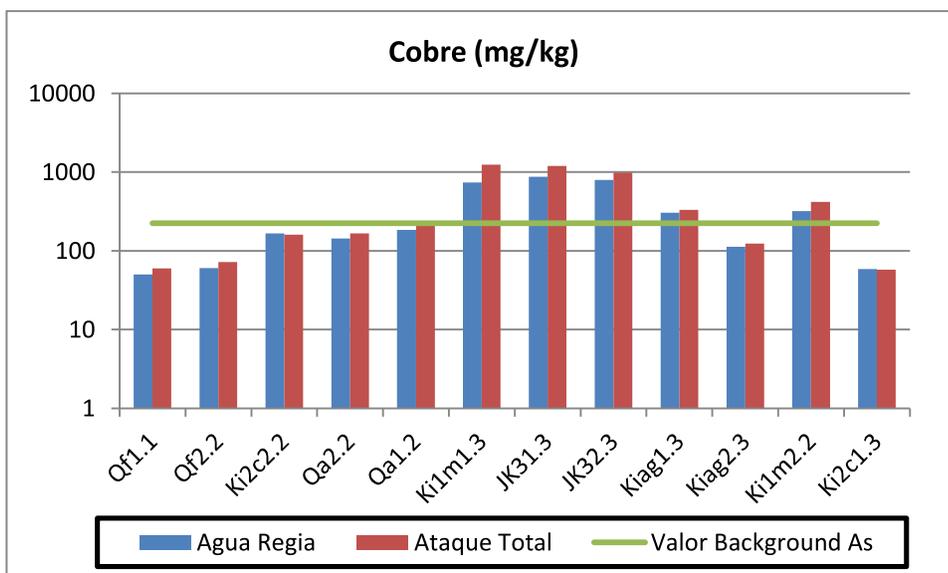


Figura S-2: Concentración de Cu con digestión por agua regia y ataque total en muestras background.
Fuente: Elaboración propia.

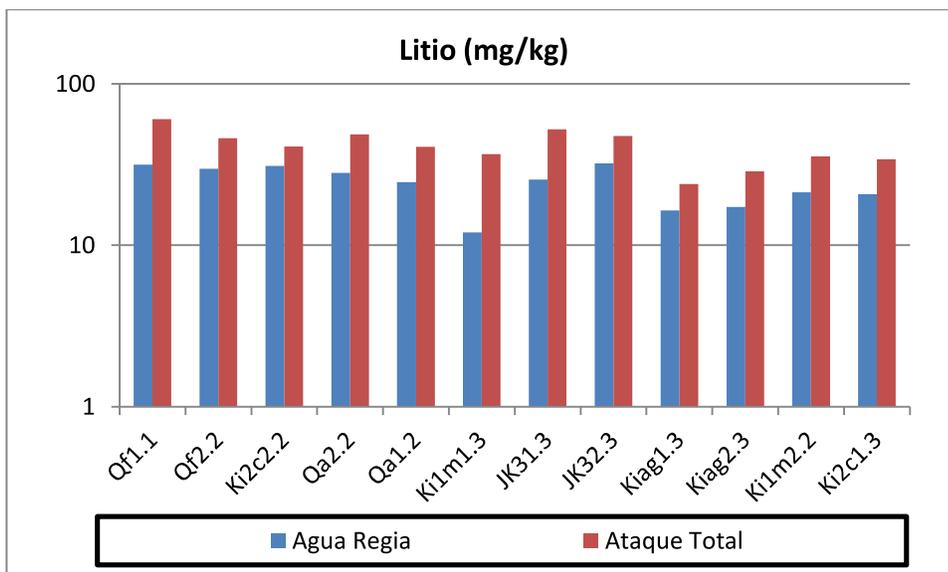


Figura S-3: Concentración de Li con digestión por agua regia y ataque total en muestras background.
Fuente: Elaboración propia.

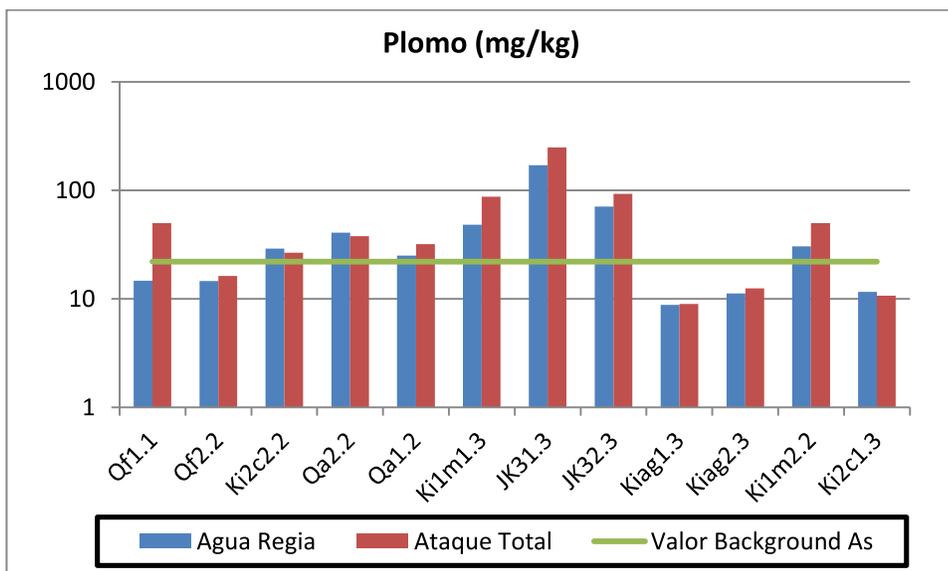


Figura S-4: Concentración de Pb con digestión por agua regia y ataque total en muestras background.
Fuente: Elaboración propia.

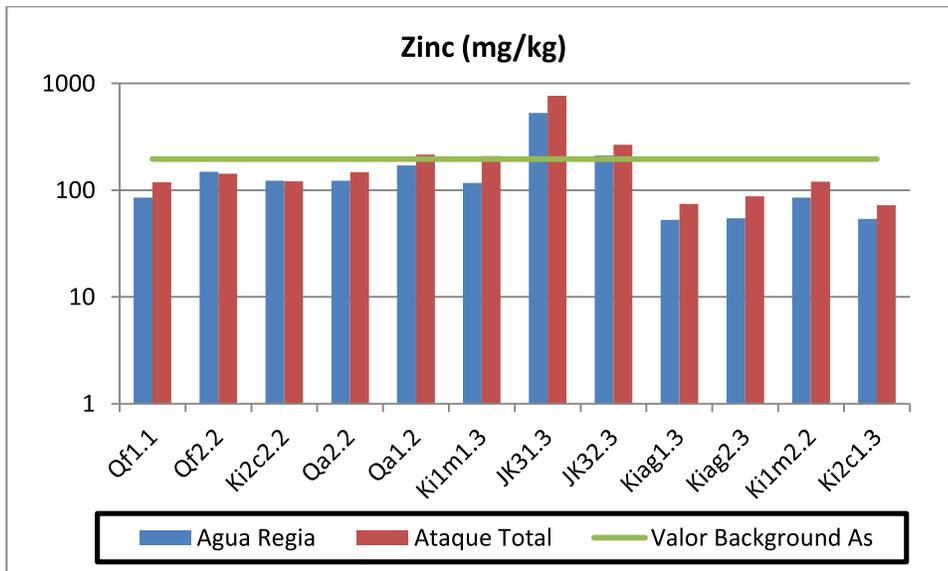


Figura S-5: Concentración de Zn con digestión por agua regia y ataque total en muestras background.
 Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO T : FOTOGRAFÍAS DE ARRASTRE DE MATERIAL DE
RELAVES**



Figura T-1: Relave Victoria tras paso de aluviones de Marzo 2015.



Figura T-2: Relave Tania tras paso de aluviones de Marzo 2015.



Figura T-3: Relave Llaucavén tras paso de aluviones de Marzo 2015.



Figura T-4: Relave Papapietro tras paso de aluviones de Marzo 2015.

ANEXO U : FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO EN LODOS

Tabla U - 1: Comparación de EF entre fracción gruesas (< 2mm) y finas (<53µm) de muestras de suelo.

Muestra	EF As 2 mm	EF As 53 µm	EF Cr 2 mm	EF Cr 53 µm	EF Cu 2 mm	EF Cu 53 µm	EF Pb 2 mm	EF Pb 53 µm	EF Zn 2 mm	EF Zn 53 µm
S102	1,41	1,38	0,72	0,74	1,26	1,66	1,29	1,38	0,63	0,64
S111	1,41	1,39	0,58	0,60	0,58	0,87	0,99	0,92	0,90	0,64
S124	3,87	3,24	1,63	1,90	82,36	47,05	15,90	11,40	1,11	1,15
S130	1,26	1,38	0,85	0,84	1,74	2,30	1,90	2,03	0,76	0,82
S131	0,84	1,06	0,75	0,89	0,86	1,81	1,63	1,98	0,86	1,00
S133	0,64	0,60	0,72	0,71	0,38	0,43	0,83	0,80	0,48	0,45
S169	1,86	1,98	0,78	0,73	4,18	5,92	2,04	2,64	0,98	0,96
S178	0,92	1,01	0,79	0,85	0,84	1,22	1,04	1,20	0,54	0,58
S180	0,99	1,19	0,83	0,88	2,98	2,80	1,22	1,49	0,59	0,66
S183	0,86	1,01	0,72	0,78	0,93	1,47	1,22	1,33	0,95	1,08

*Se destacan EF que son mayores en la fracción fina respecto a la gruesa.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla U - 2: Comparación de EF entre fracción gruesas (< 2mm) y finas (<53µm) de muestras de polvo de calles.

Muestra	EF As 2 mm	EF As 53 µm	EF Cr 2 mm	EF Cr 53 µm	EF Cu 2 mm	EF Cu 53 µm	EF Pb 2 mm	EF Pb 53 µm	EF Zn 2 mm	EF Zn 53 µm
P147	38,73	77,86	5,80	7,91	217,48	404,83	19,57	37,00	32,16	59,86
P176	1,31	1,62	2,10	1,33	3,27	4,89	4,76	2,67	1,96	2,02
P181	3,45	3,81	1,66	1,74	16,57	21,35	2,30	2,58	3,19	2,85
P184	1,75	2,09	1,92	1,89	5,59	8,93	2,12	3,83	1,82	2,54
P812	1,08	1,18	1,33	0,98	1,52	1,90	1,55	1,83	0,92	1,00
P835	0,95	1,54	1,68	1,75	1,73	3,75	3,70	4,71	3,61	4,24
P843	1,84	2,33	1,28	1,41	2,54	4,17	3,64	4,57	1,97	2,21
P844	1,78	2,24	5,34	3,17	4,11	7,39	24,50	8,08	2,07	2,49
P845	2,92	4,57	3,62	3,07	12,94	22,13	5,60	8,41	2,62	3,97
P848	2,90	9,78	1,81	1,83	2,93	24,01	16,64	7,99	1,87	5,61

*Se destacan EF que son mayores en la fracción fina respecto a la gruesa.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla U - 3: Comparación de EF entre fracción gruesas (< 2mm) y finas (<53µm) de muestras de lodo.

Muestra	EF As 2 mm	EF As 53 um	EF Cr 2 mm	EF Cr 53 um	EF Cu 2 mm	EF Cu 53 um	EF Pb 2 mm	EF Pb 53 um	EF Zn 2 mm	EF Zn 53 um
L233-1	0,80	0,90	0,58	0,64	0,41	0,45	1,36	1,51	0,59	0,62
L234-1	0,35	0,38	0,32	0,35	0,20	0,21	0,42	0,42	0,29	0,29
L235-2	1,00	1,09	0,64	0,60	0,48	0,54	1,65	1,79	0,72	0,67
L240-1	0,80	0,80	0,78	0,72	0,84	0,51	1,14	1,35	0,60	0,55
T1-1	1,04	1,11	0,47	0,47	0,61	0,80	1,78	1,94	0,69	0,71
T2-4	0,64	0,74	0,92	1,03	0,26	0,37	0,85	0,98	0,46	0,51
T4-2	0,76	0,86	0,60	0,60	0,43	0,50	1,20	1,30	0,58	0,59
T5-6	0,68	0,74	0,76	0,86	0,30	0,33	0,96	0,99	0,51	0,50
T5-7	0,58	0,66	0,61	0,57	0,37	0,43	0,96	1,09	0,49	0,49
T6-4	0,52	0,65	0,51	0,65	0,26	0,33	0,74	0,98	0,41	0,50

*Se destacan EF que son mayores en la fracción fina respecto a la gruesa.

Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO V : MAPAS DE FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO SEGÚN
ELEMENTO Y MATRIZ SÓLIDA**

Suelos

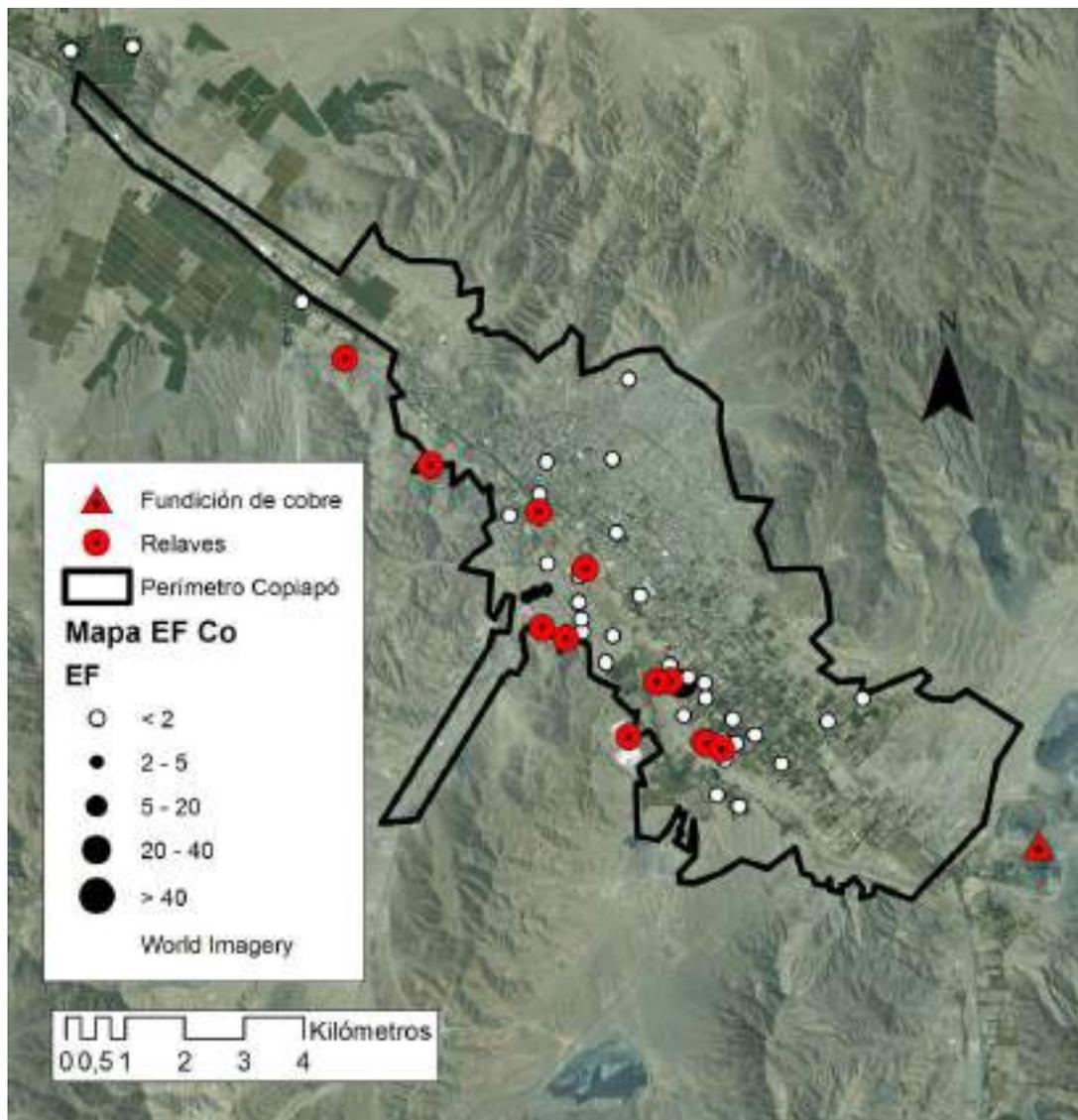


Figura V - 1: Mapa de Factores de enriquecimiento de Co para muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia.

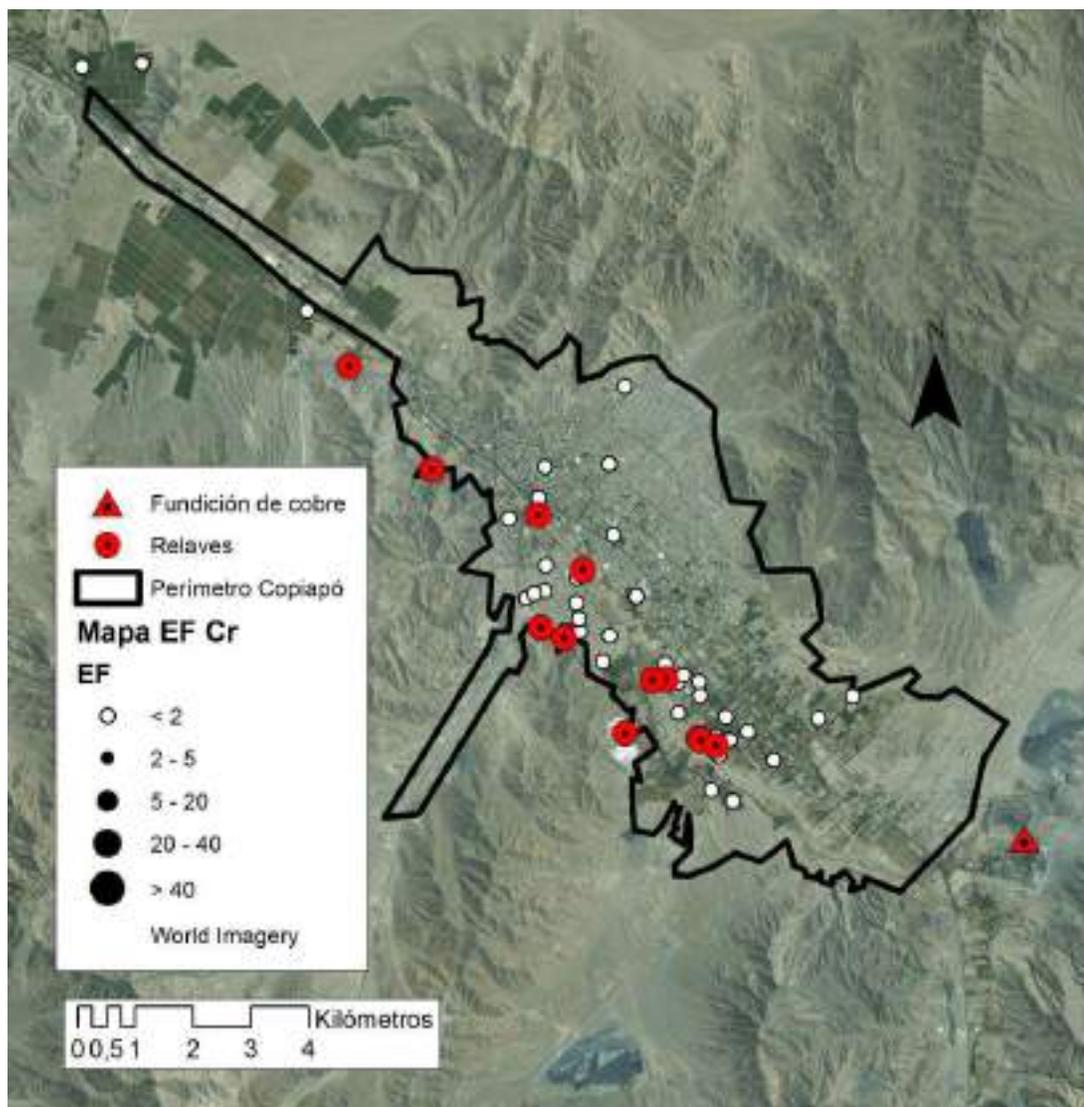


Figura V - 2: Mapa de Factores de enriquecimiento de Cr para muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia.

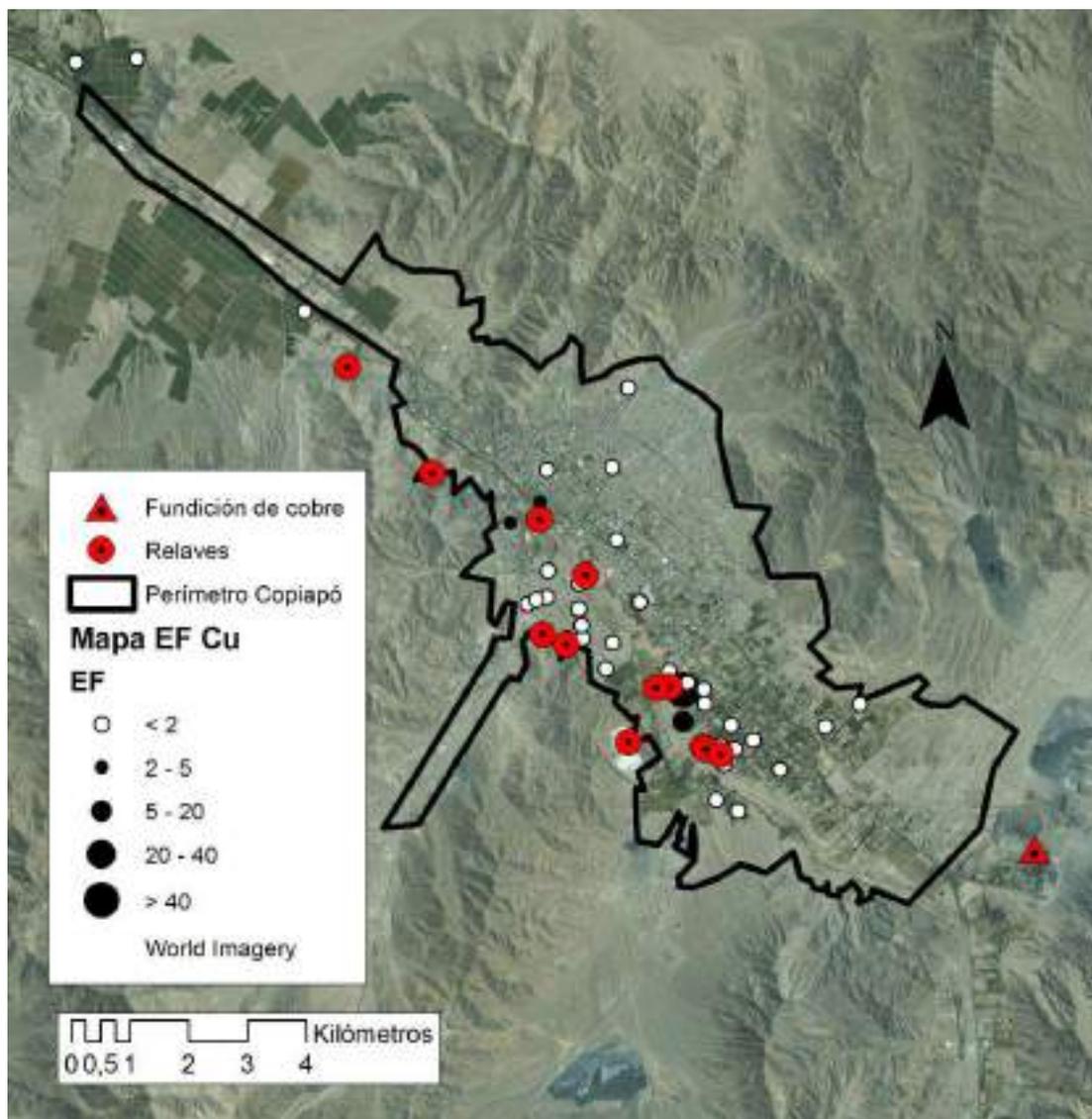


Figura V - 3: Mapa de Factores de enriquecimiento de Cu para muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia.

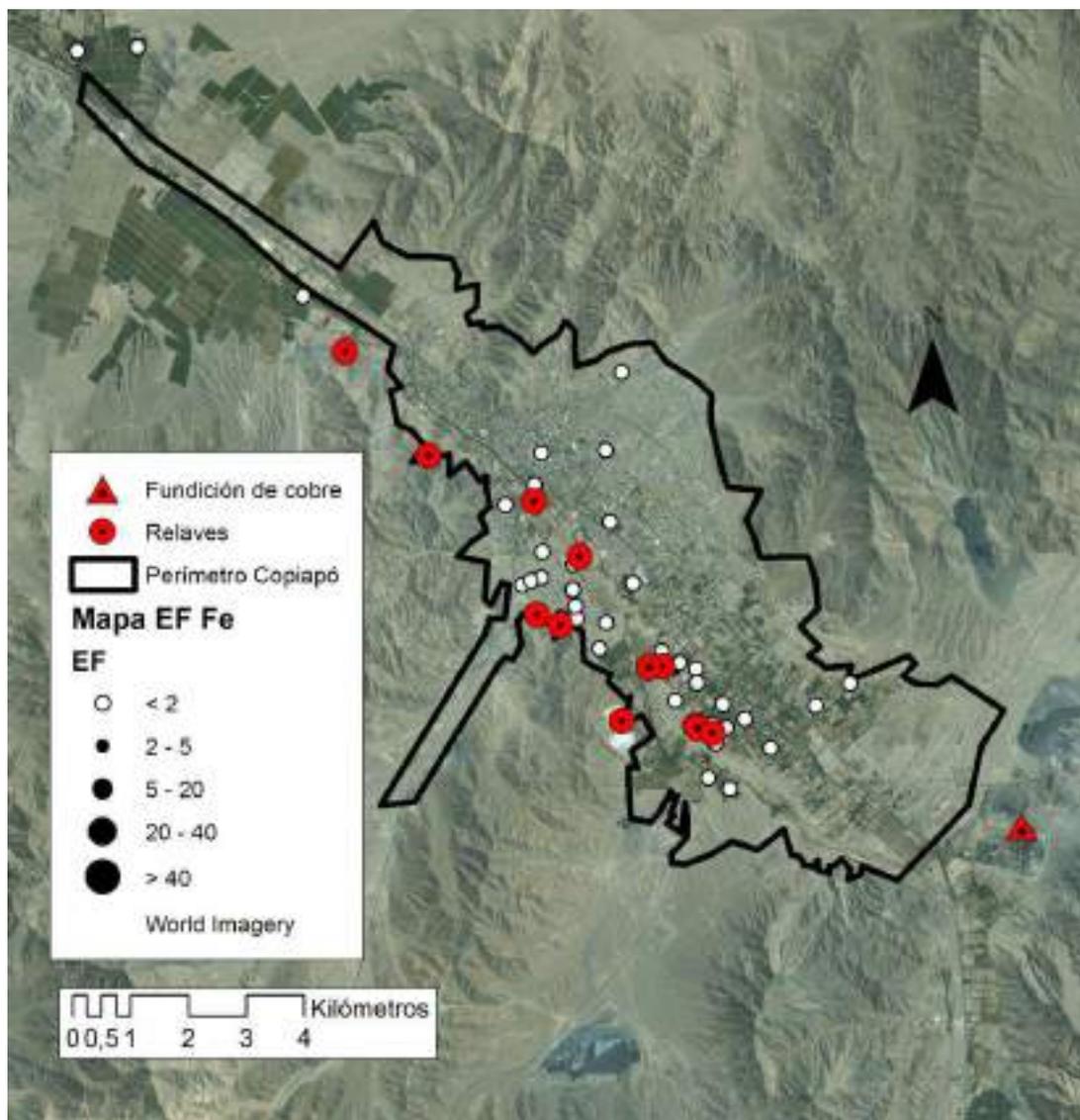


Figura V - 4: Mapa de Factores de enriquecimiento de Fe para muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia.

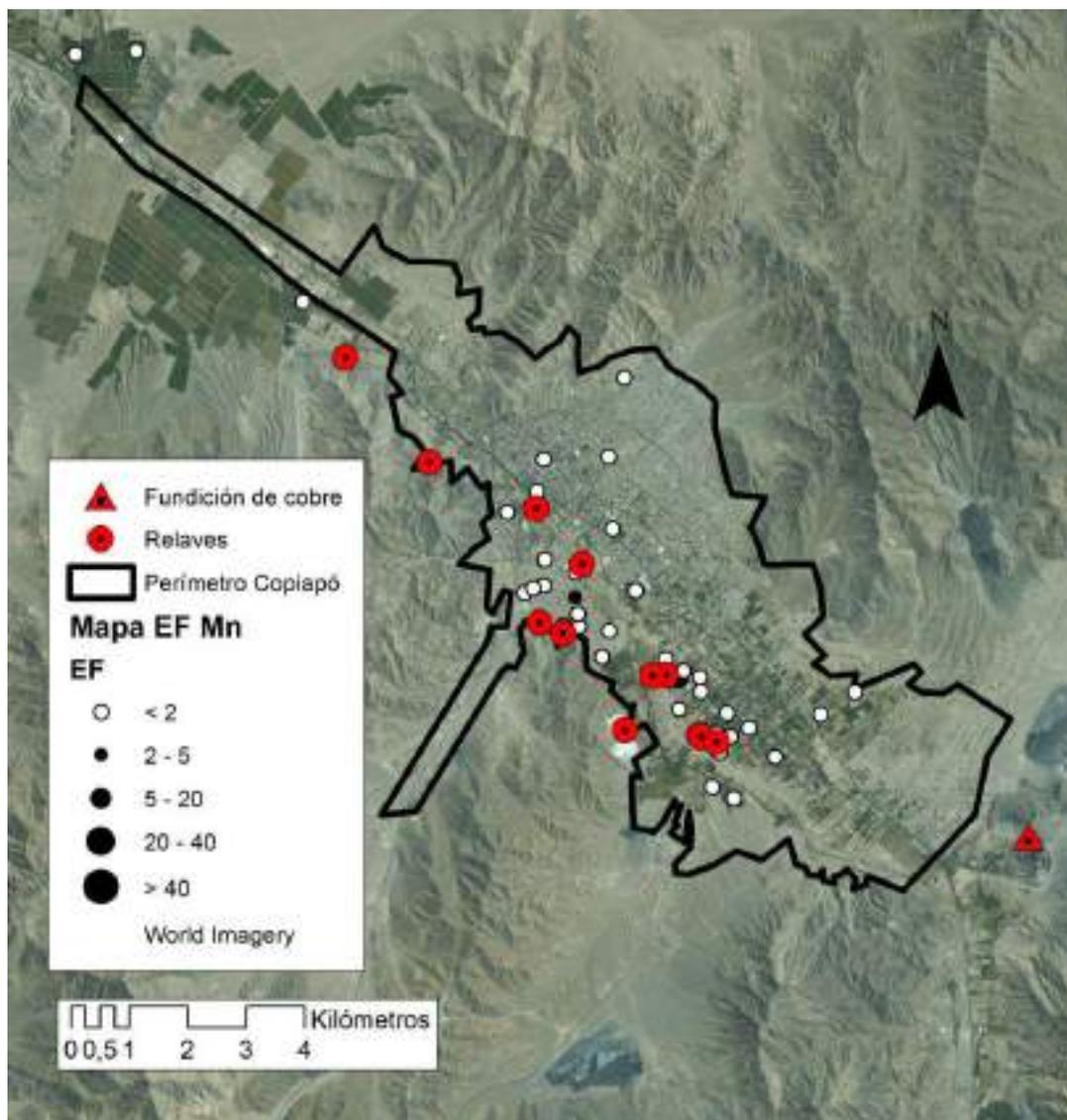


Figura V - 5: Mapa de Factores de enriquecimiento de Mn para muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia.

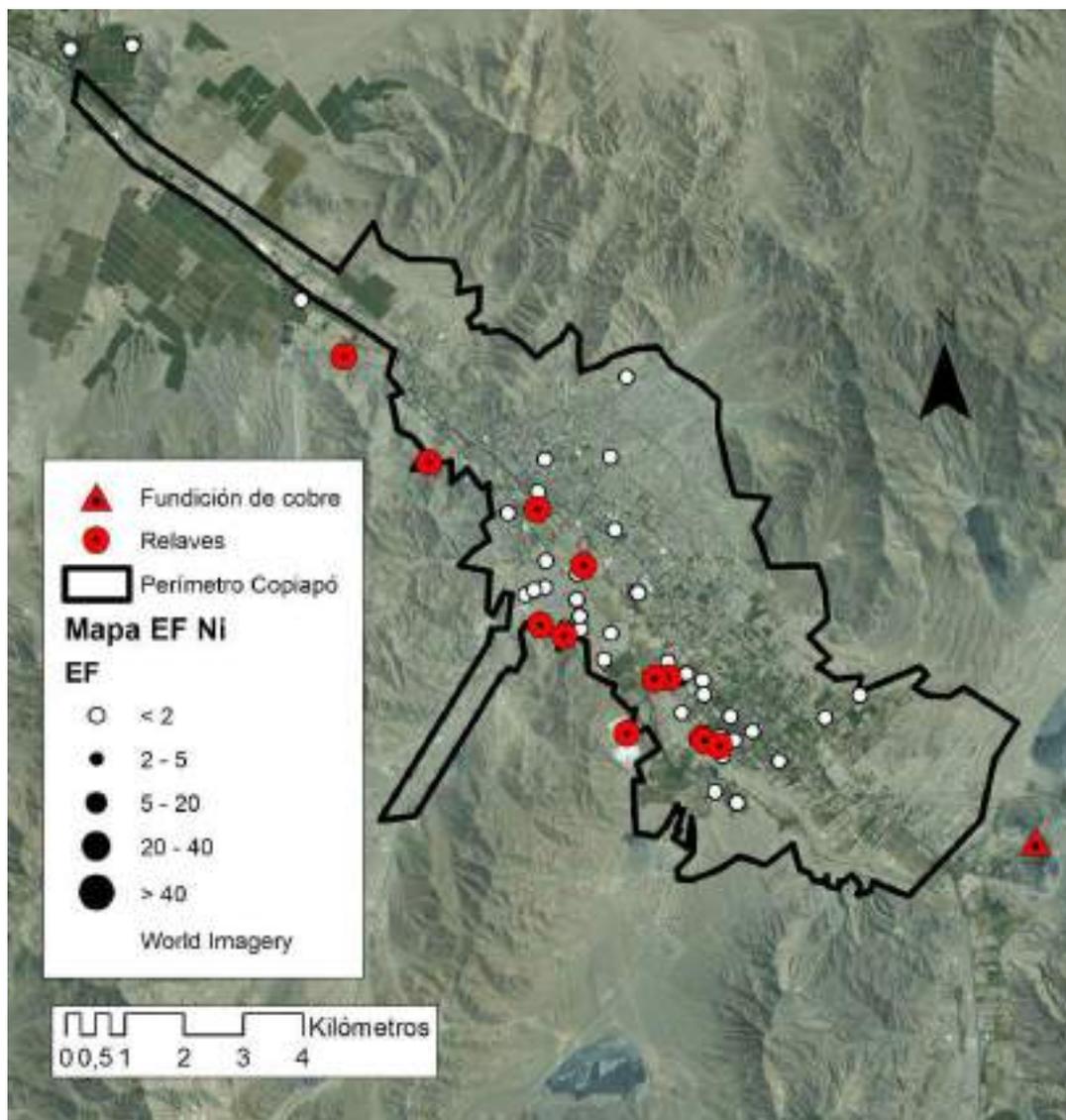


Figura V - 6: Mapa de Factores de enriquecimiento de Ni para muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia.

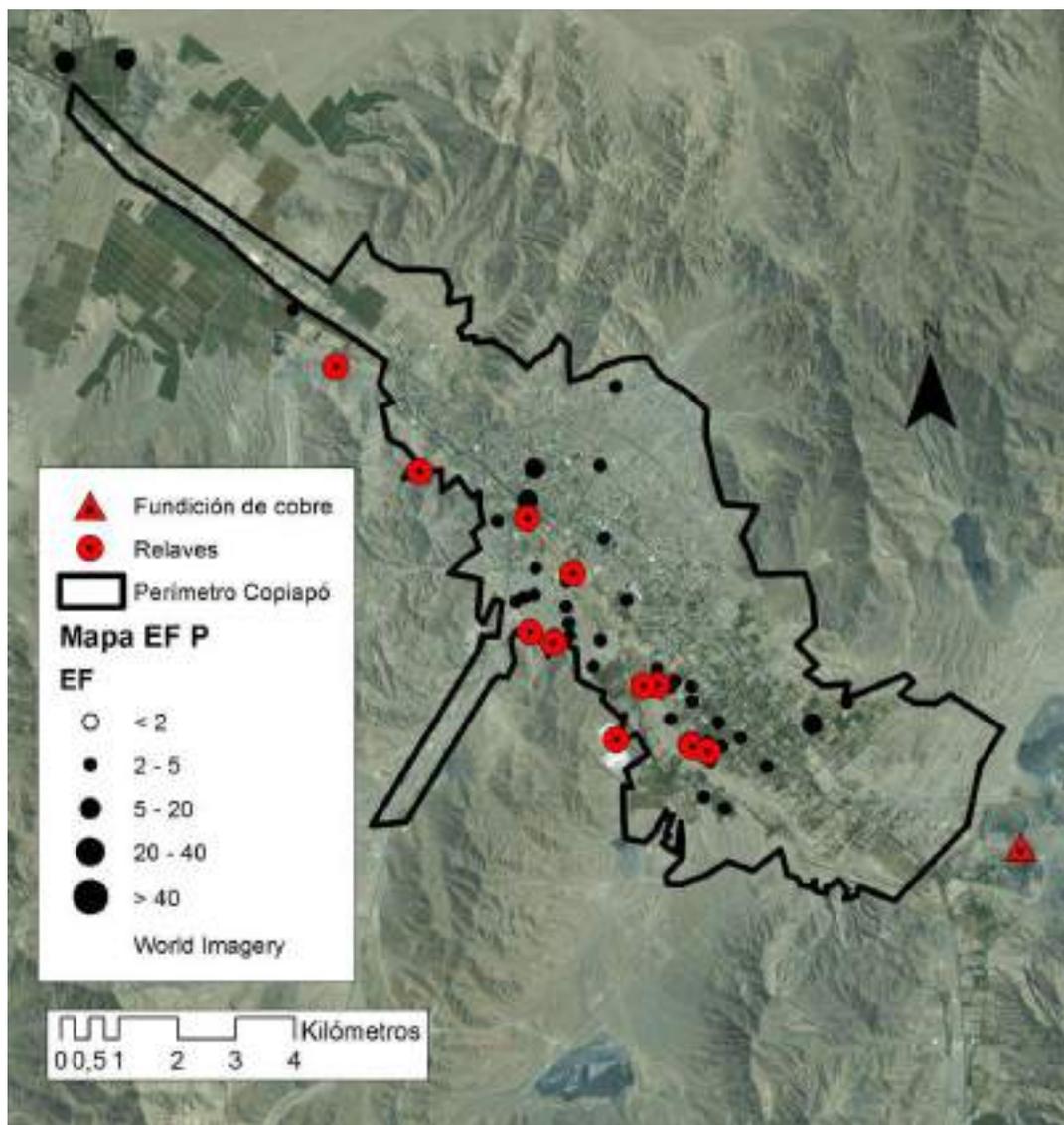


Figura V - 7: Mapa de Factores de enriquecimiento de P para muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia.

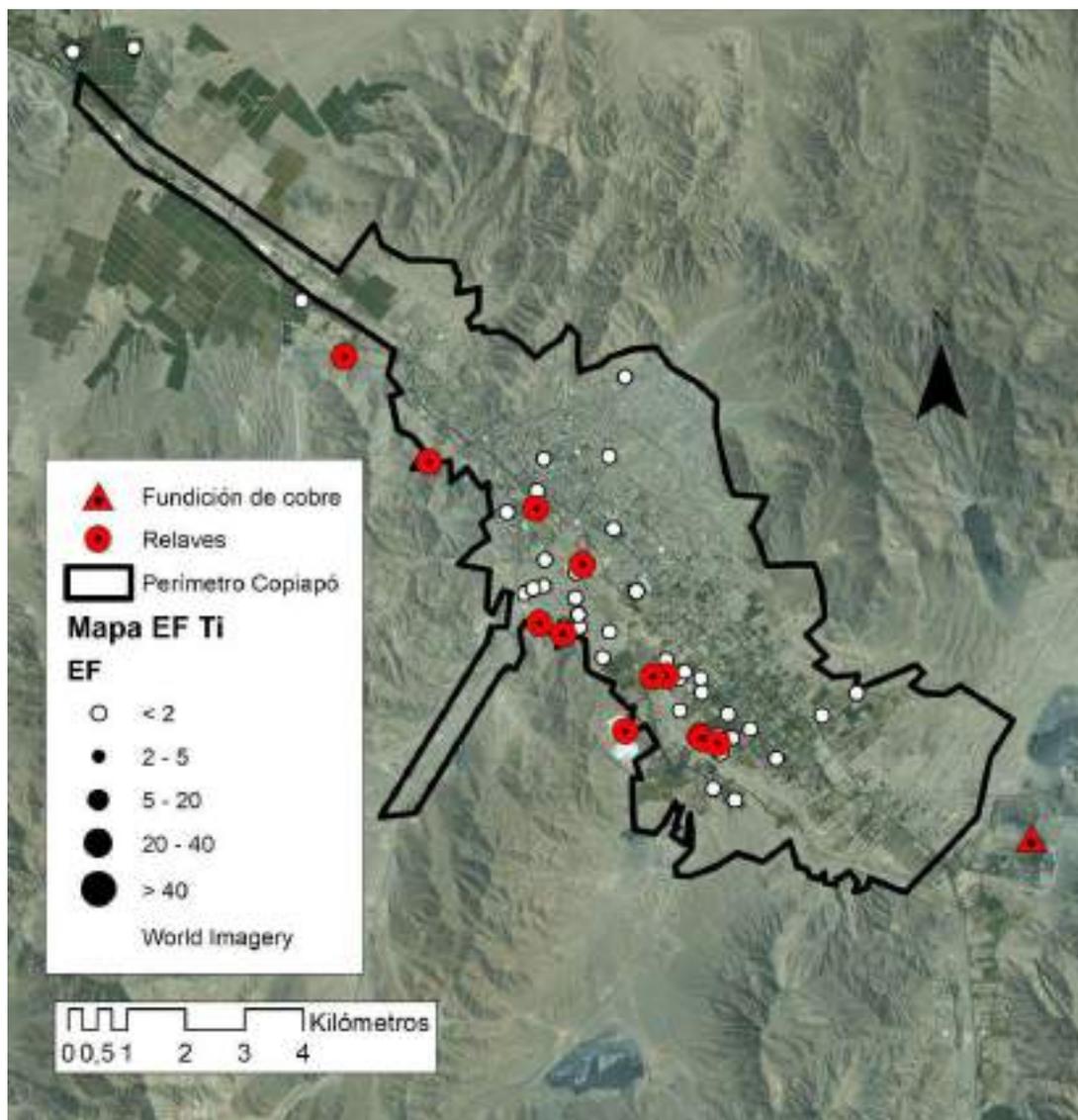


Figura V - 8: Mapa de Factores de enriquecimiento de Ti para muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia.

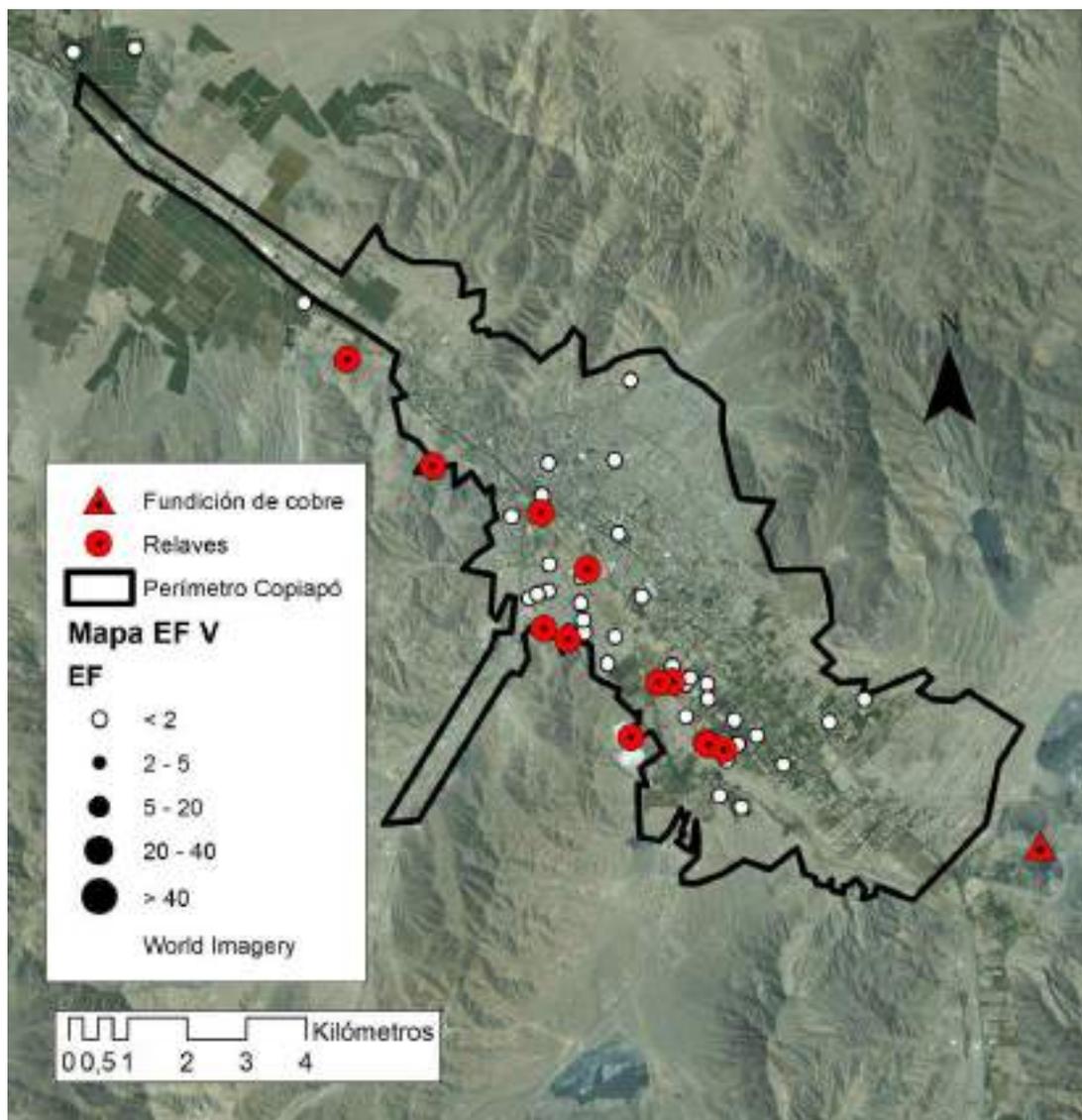


Figura V - 9: Mapa de Factores de enriquecimiento de V para muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia.

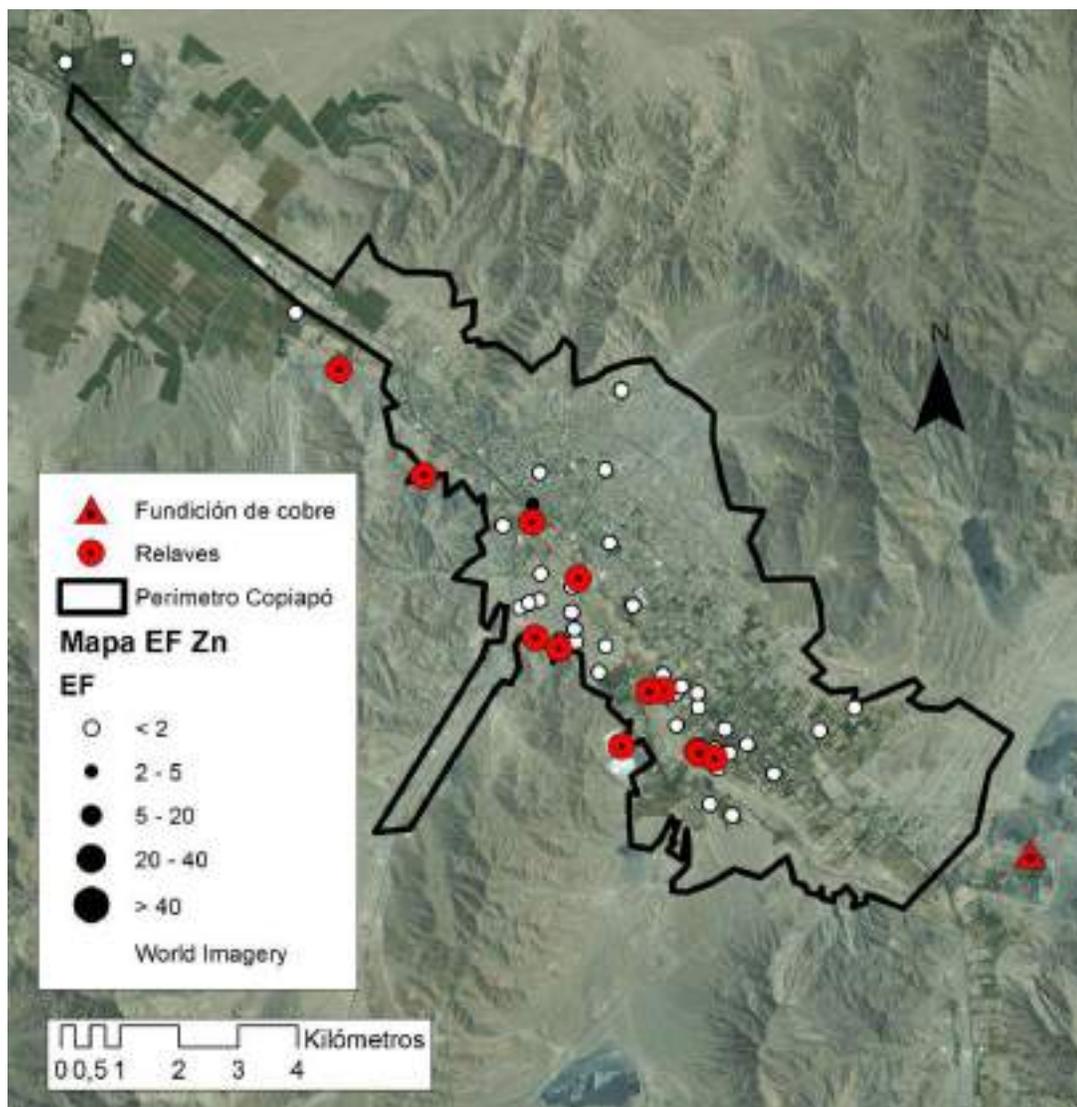


Figura V - 10: Mapa de Factores de enriquecimiento de Zn para muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia.

Polvo de Calles

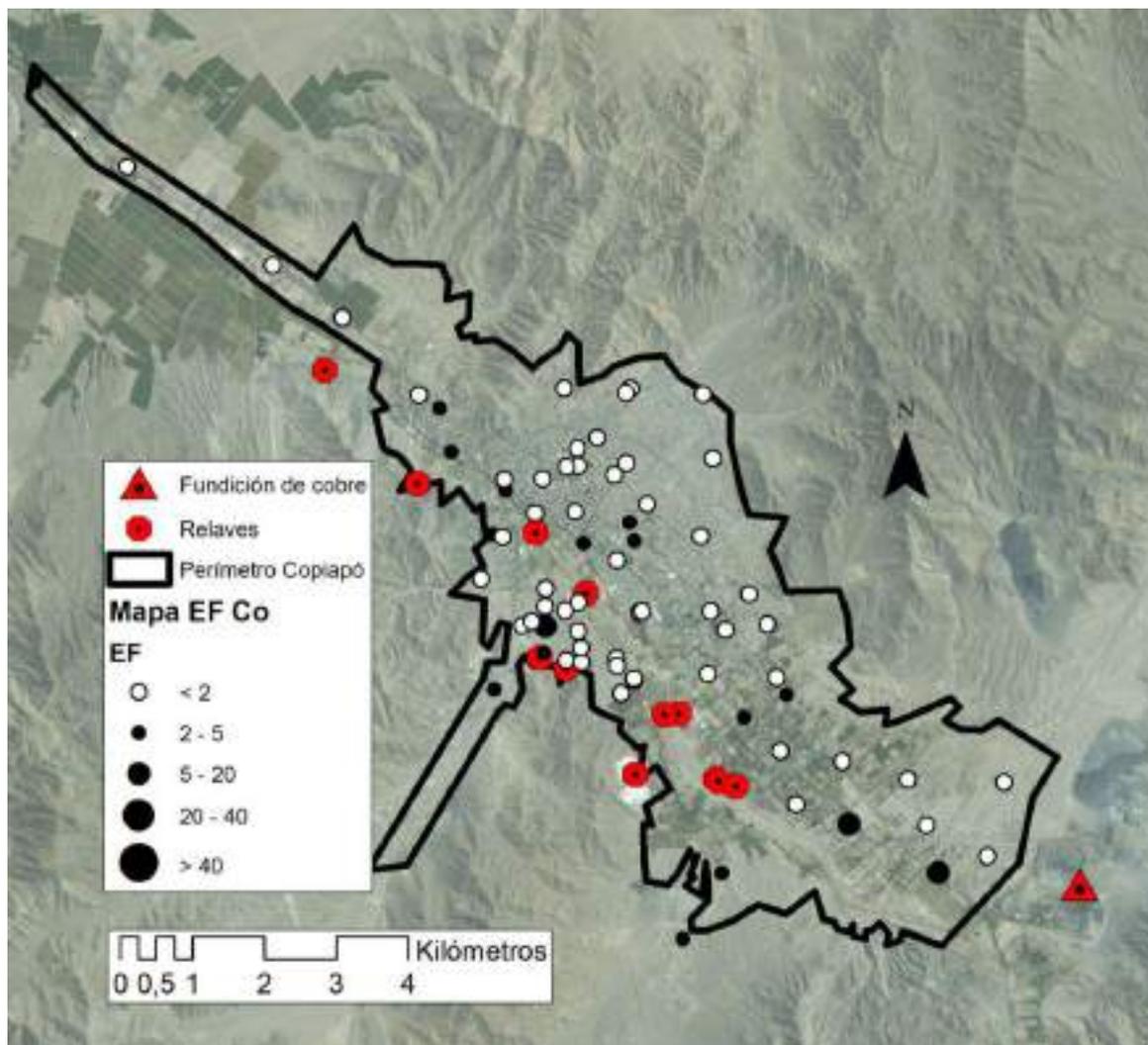


Figura V - 11: Mapa de Factores de enriquecimiento de Co para muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia.

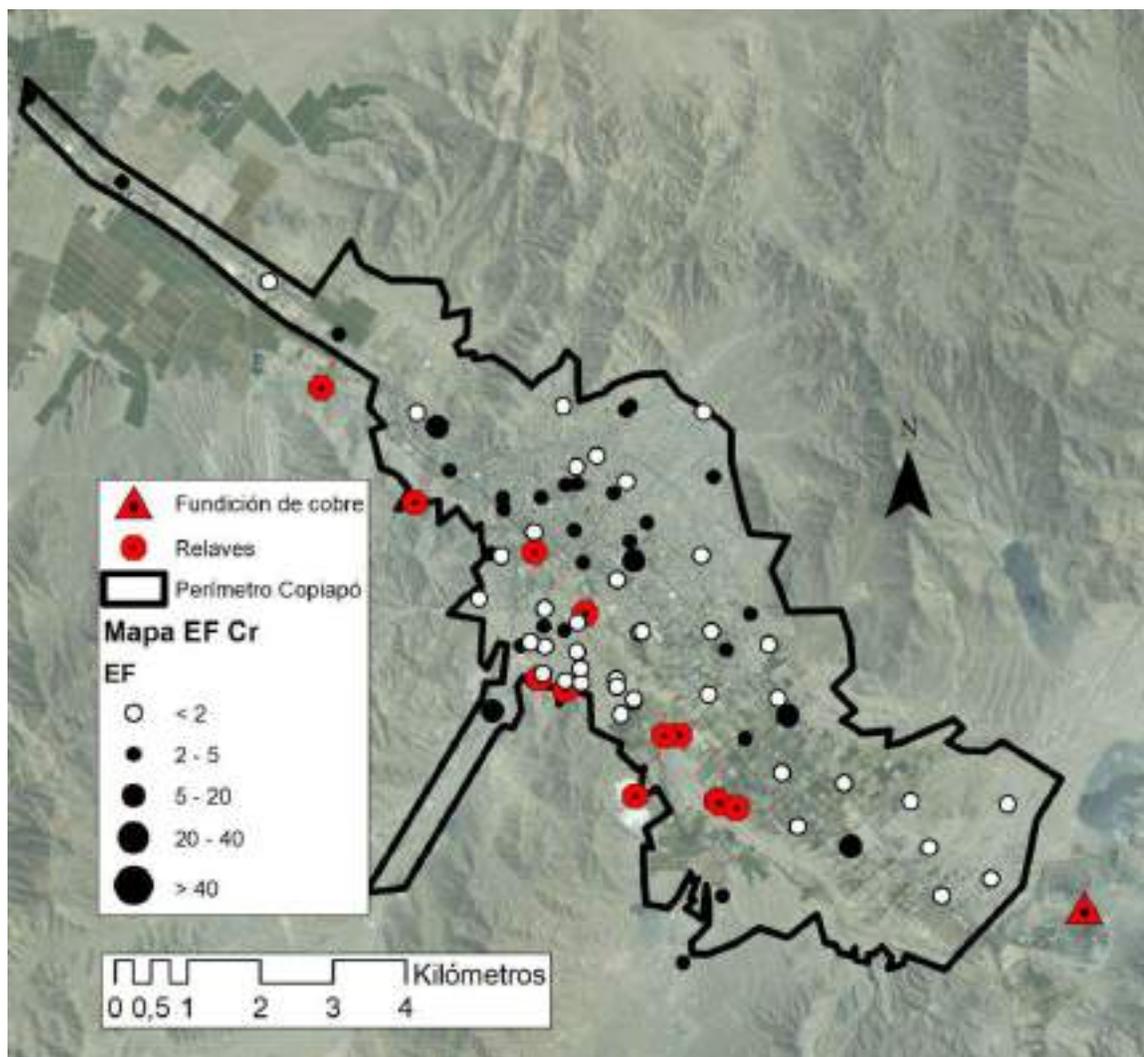


Figura V - 12: Mapa de Factores de enriquecimiento de Cr para muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia.

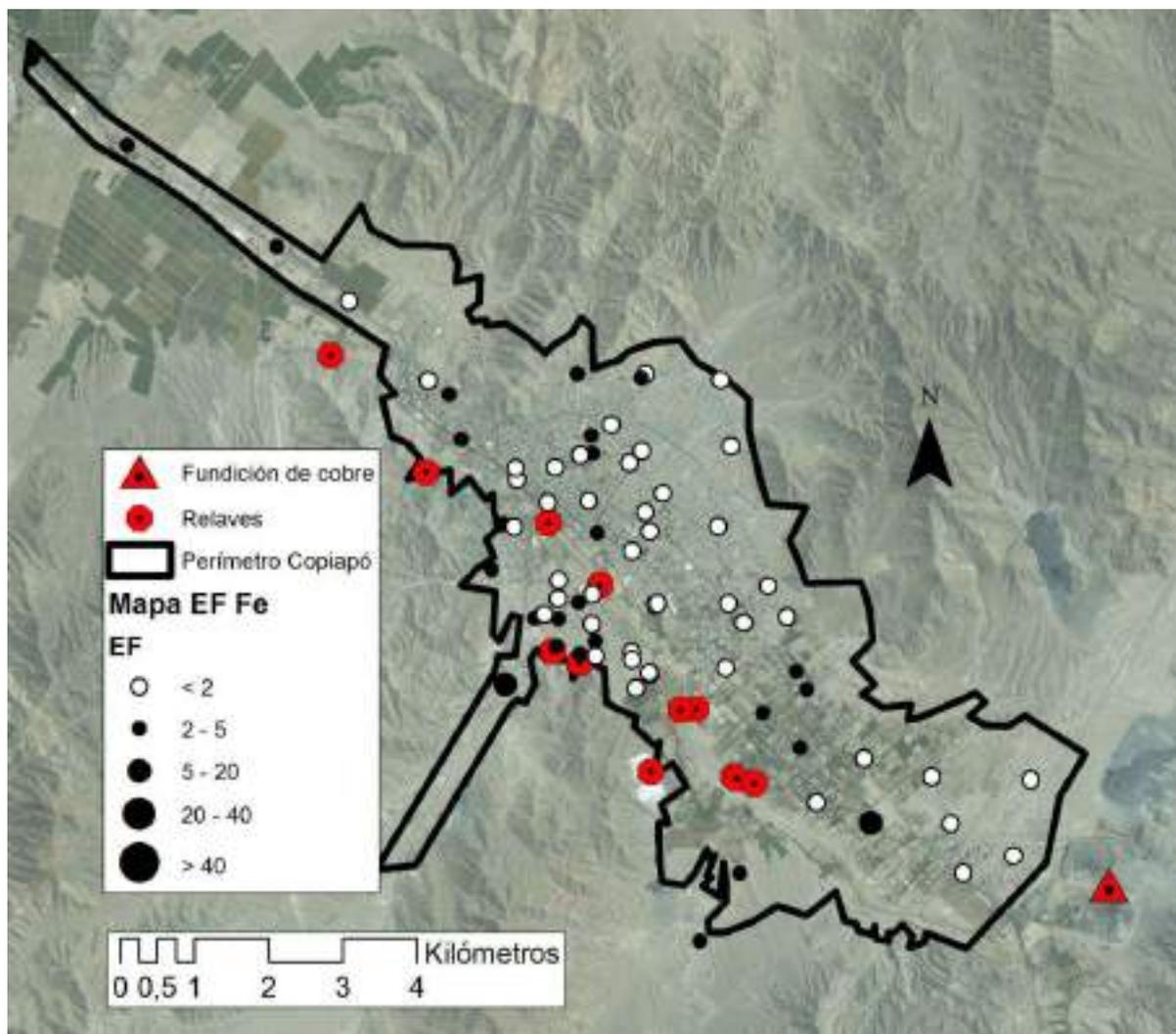


Figura V - 13: Mapa de Factores de enriquecimiento de Fe para muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia.

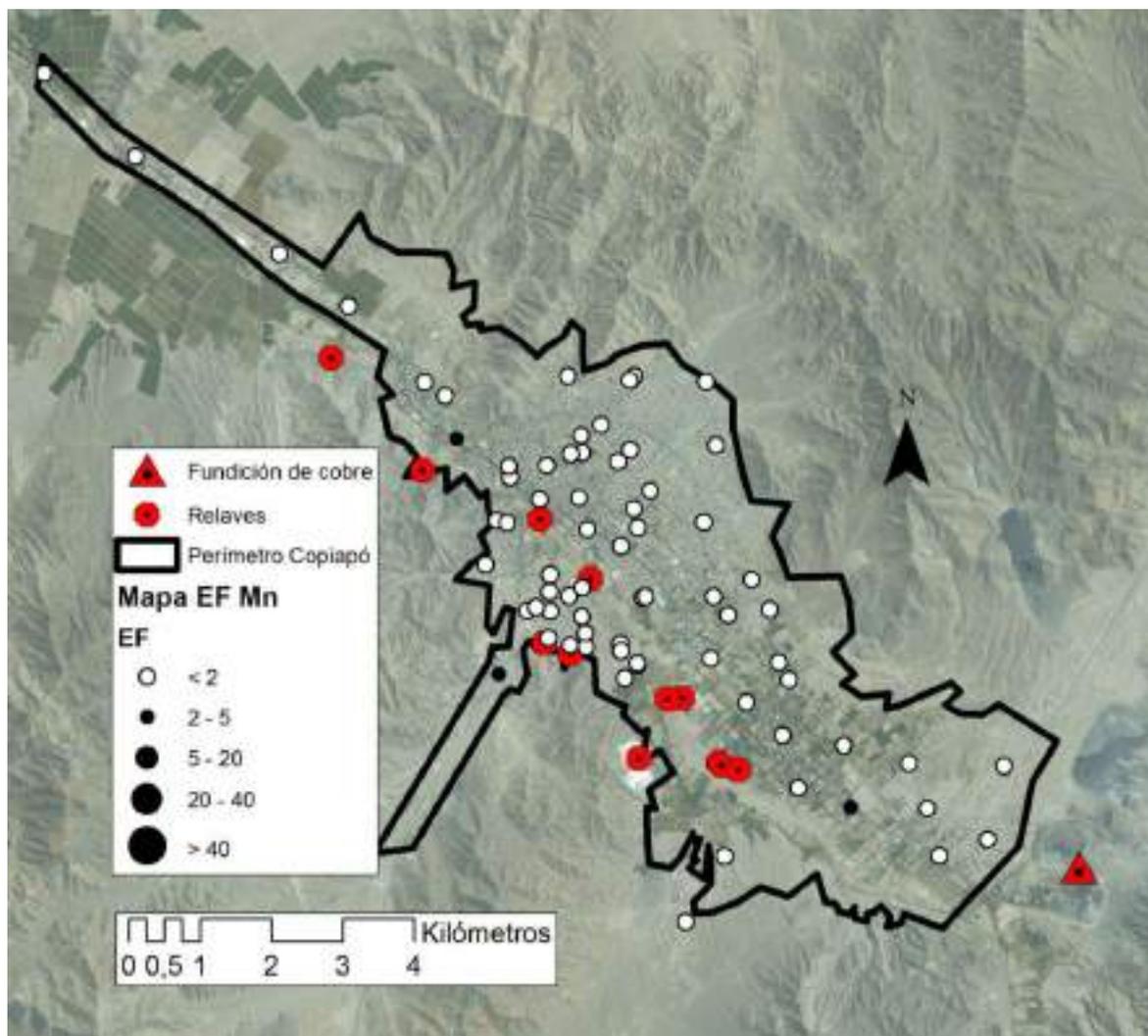


Figura V - 14: Mapa de Factores de enriquecimiento de Mn para muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia.

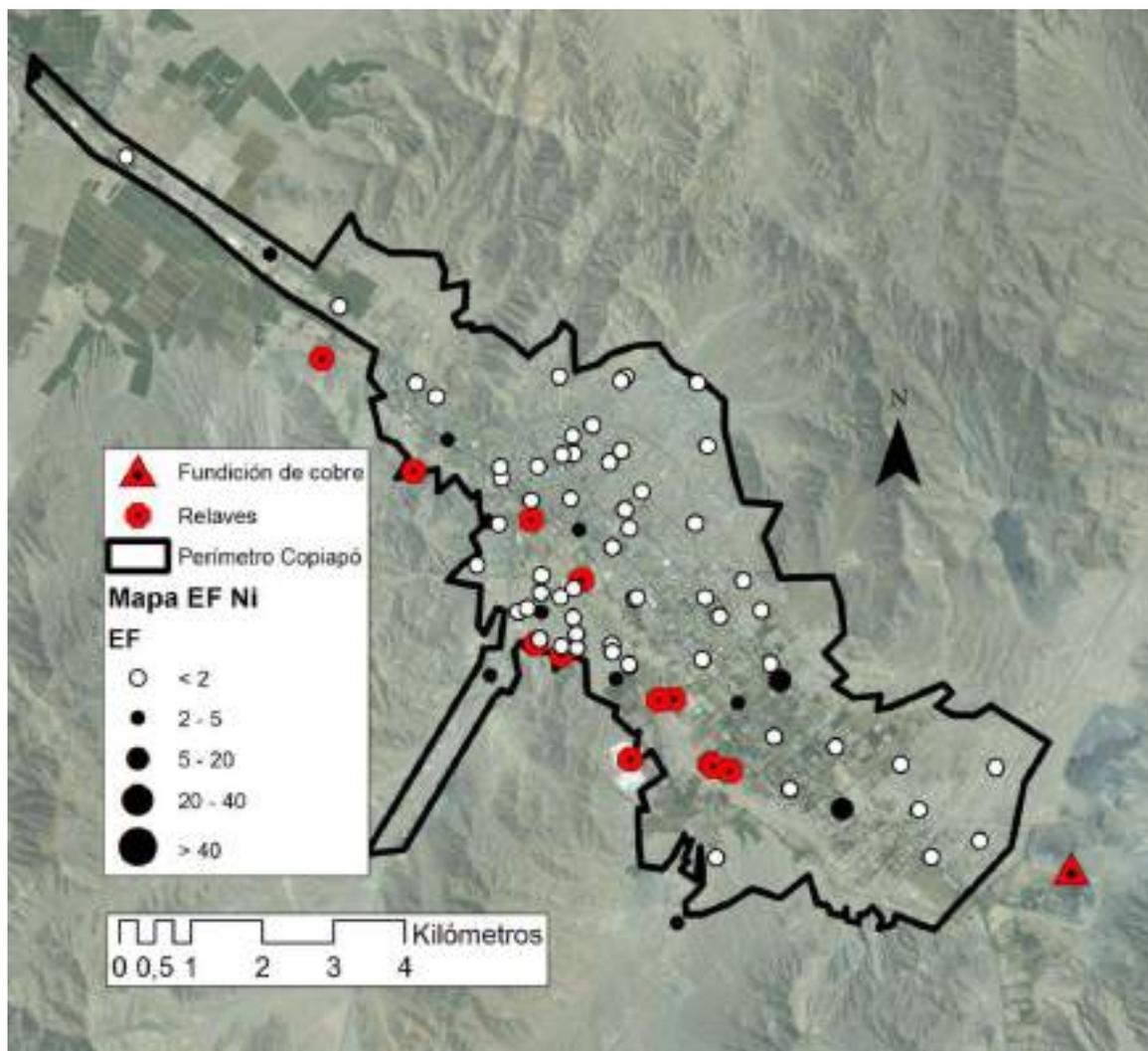


Figura V - 15: Mapa de Factores de enriquecimiento de Ni para muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia.

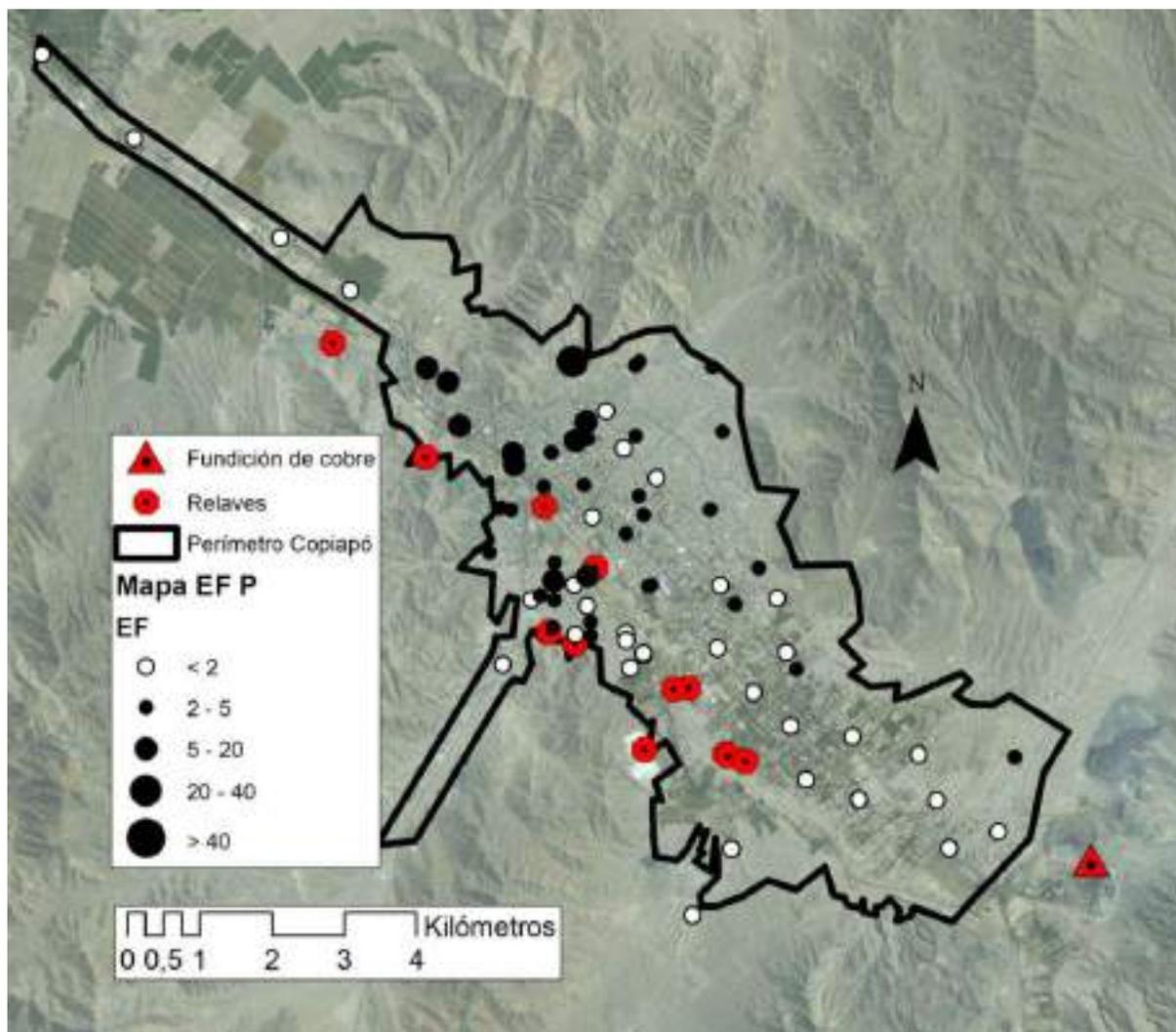


Figura V - 16: Mapa de Factores de enriquecimiento de P para muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia.

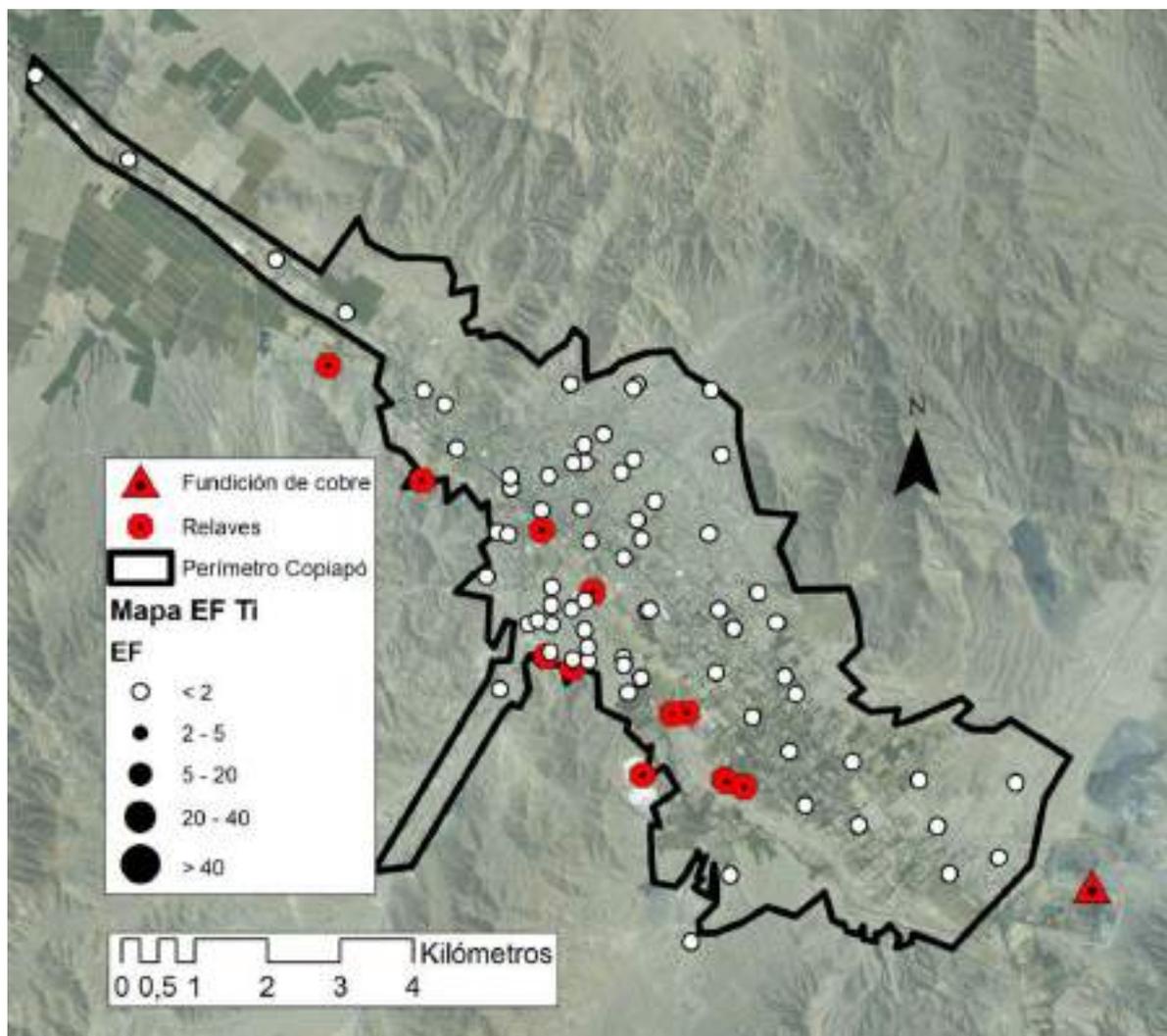


Figura V - 17: Mapa de Factores de enriquecimiento de Ti para muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia.

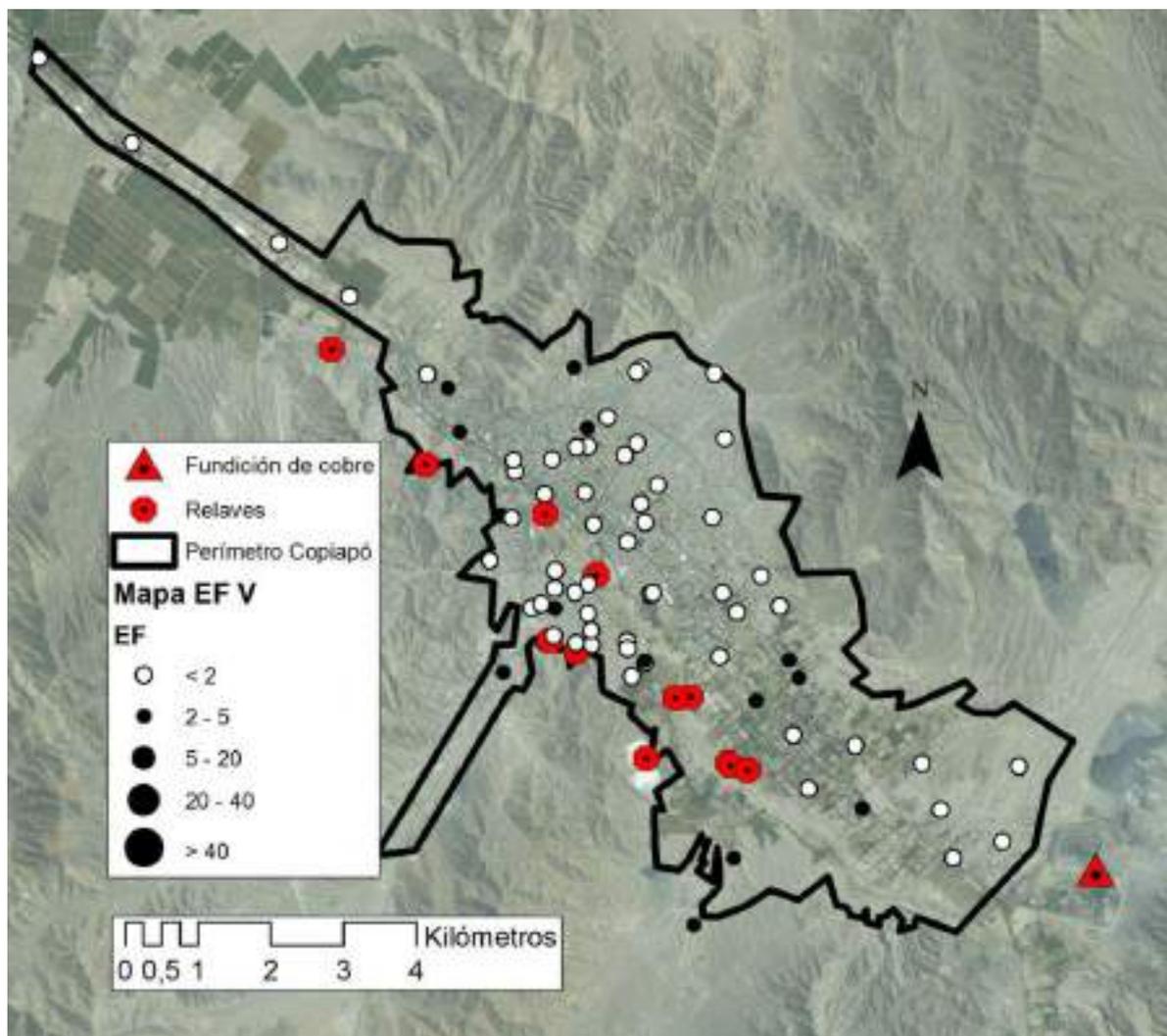


Figura V – 18: Mapa de Factores de enriquecimiento de V para muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia.

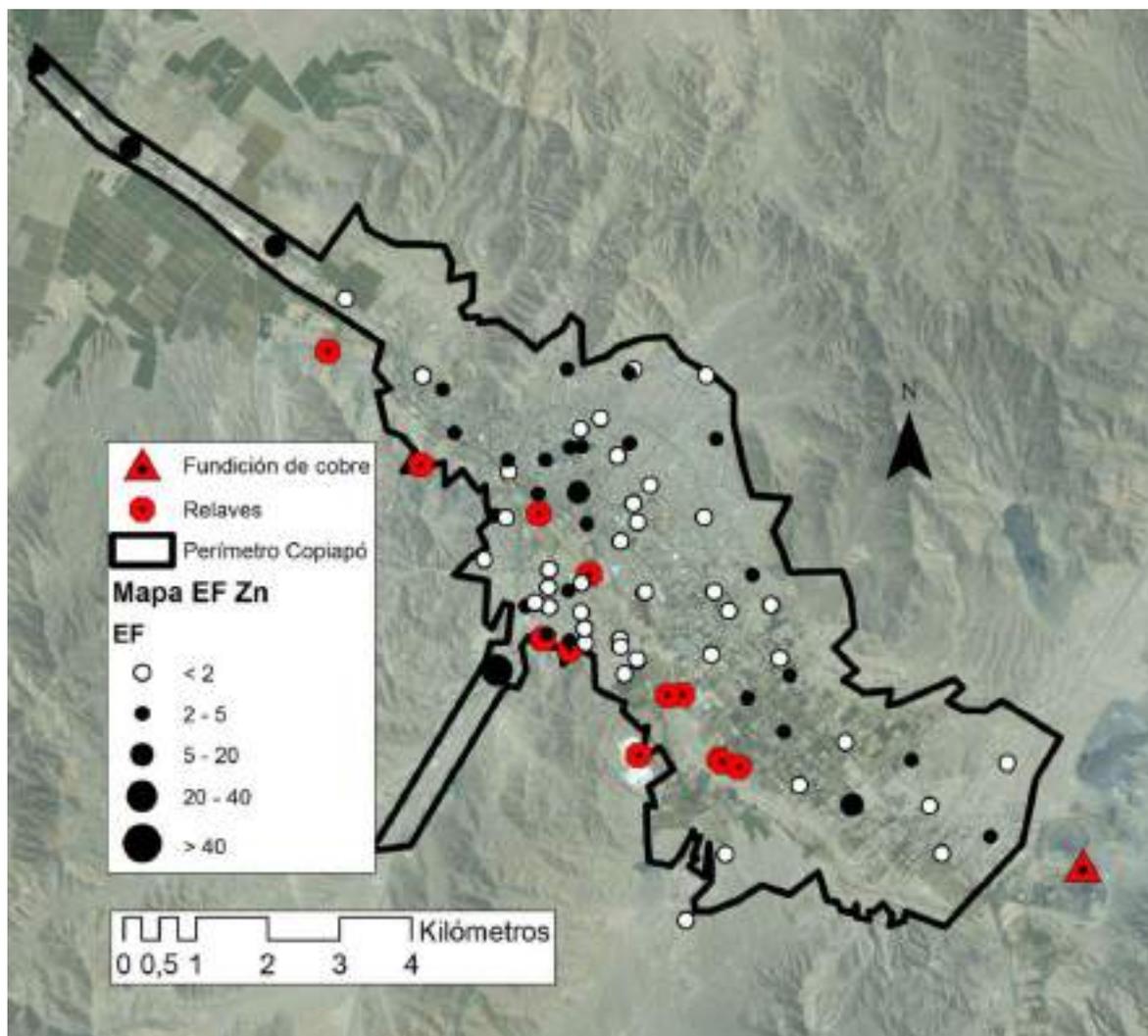


Figura V - 19: Mapa de Factores de enriquecimiento de Zn para muestras de polvo de calles. Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO W : IMÁGENES SEM DE PARTÍCULAS ESFÉRICAS EN
MUESTRAS**

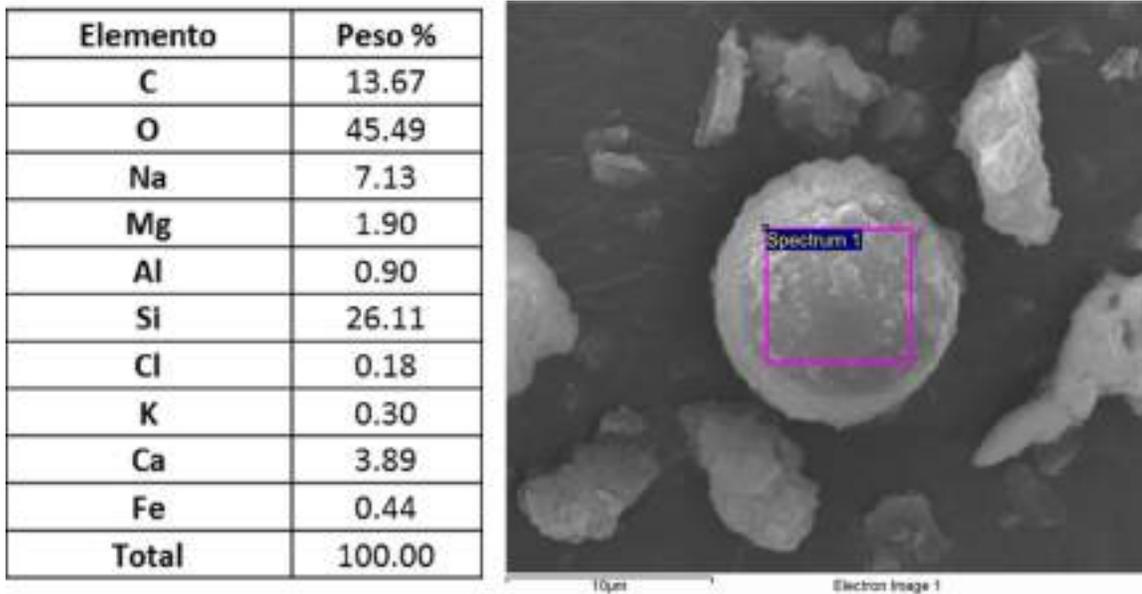


Figura W-1: Imagen SEM de primera partícula esférica y su composición elemental, encontrada en muestra de polvo P845, ubicada a 10.8 km de la fundición.

Elemento	Peso %
O	69.56
Na	4.86
Mg	1.36
Al	4.37
Si	7.50
Cl	5.36
K	1.17
Ca	3.44
Fe	2.37
Total	100.00

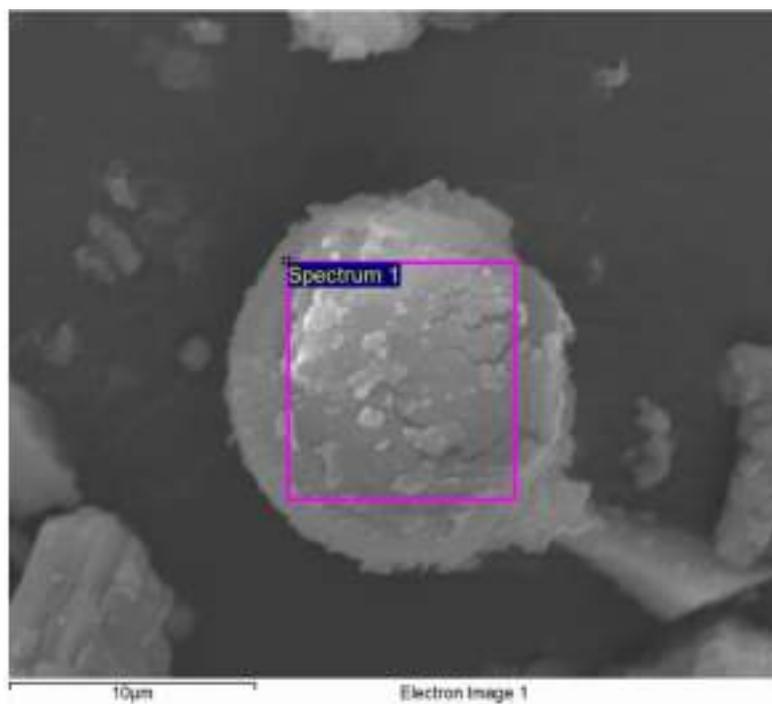


Figura W-2: Imagen SEM de segunda partícula esférica y su composición elemental, encontrada en muestra de polvo P845, ubicada a 10.8 km de la fundición.

**ANEXO X : CONCENTRACIONES ELEMENTALES EN FILTROS DE
PM10**

Tabla X-1: Concentración elemental en filtros de PM10 para Noviembre del 2014

Lugar	Copiapó 2014										
	CESFAM	Hotel	Centro Cultural	CESFAM	Centro Cultural	Hotel	Centro Cultural	Hotel	CESFAM	Centro Cultural	Hotel
Fecha	18-03-2014	18-03-2014	18-03-2014	19-03-2014	19-03-2014	19-03-2014	20-03-2014	20-03-2014	20-03-2014	21-03-2014	21-03-2014
Al	0,8525	0,4619	0,5537	0,5352	0,2509	0,3519	0,4825	0,4333	0,6567	0,3564	0,2873
As	0,0069	0,0043	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,0055	0,0081	< LQ	< LQ	< LQ
Ca	1,6821	0,9174	0,9666	1,0693	0,6101	0,7633	1,1031	0,9447	1,4558	0,8436	0,6715
Cd	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Cl	0,5091	0,4019	0,4382	0,7499	0,6565	0,8712	1,8059	1,7672	2,5909	2,4374	2,2227
Co	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Cr	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Cu	0,0375	0,0179	0,0214	0,0203	0,0075	0,0100	0,0552	0,0637	0,0435	0,0241	0,0248
Fe	1,0249	0,5868	0,7265	0,6021	0,3443	0,4136	0,7617	0,7018	0,8745	0,5198	0,4303
Hg	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,0018	< LQ	< LQ	< LQ
K	0,3793	0,2570	0,2433	0,2447	0,1427	0,2060	0,2905	0,2842	0,3765	0,2512	0,2153
Mn	0,0273	0,0109	0,0112	0,0146	0,0050	0,0049	0,0139	0,0125	0,0157	0,0075	0,0090
Mo	0,0063	< LQ	< LQ	< LQ	0,0053	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Na	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,5261	0,7286	0,8133	1,2499	1,2031	1,3286
Ni	< LQ	0,0029	< LQ	< LQ	< LQ	0,0021	< LQ	0,0017	< LQ	< LQ	< LQ
P	0,0018	0,0037	0,0024	< LQ	< LQ	< LQ	0,0081	0,0028	0,0091	0,0058	0,0017
Pb	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,0211	0,0101	0,0103	< LQ	< LQ	< LQ
S	1,7633	1,5139	1,5635	1,1609	1,0178	1,1423	1,9529	1,9411	1,9290	1,7124	1,6921
Sb	0,0140	< LQ	< LQ	< LQ	0,0055	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Si	2,3120	1,2595	1,3578	1,4903	0,7611	0,9527	1,4726	1,2609	1,8740	1,0199	0,7960
Sr	0,0064	0,0029	0,0031	0,0028	0,0015	0,0022	0,0057	0,0054	0,0068	0,0028	0,0008
Ti	0,0629	0,0364	0,0382	0,0355	0,0210	0,0279	0,0425	0,0375	0,0539	0,0297	0,0244
V	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,0023	< LQ	< LQ	< LQ
Zn	0,0250	0,0233	0,0180	0,0133	0,0066	0,0093	0,0780	0,1049	0,0488	0,0487	0,0487

*<LQ: Valor bajo el límite de cuantificación del equipo.

Fuente: Elaboración propia en base a CEDEUS (2015)

Tabla X-2: Concentración elemental en filtros de PM10 para Abril del 2015

Campana	Copiapó 2015								
	Lugar	Municipalidad	Carabineros Paipote	Casale	Municipalidad	Casa Particular Sector Hospital	Casale	Carabineros Paipote	CESFAM El Palomar
Fecha	08-04-2015	08-04-2015	08-04-2015	09-04-2015	09-04-2015	09-04-2015	09-04-2015	09-04-2015	09-04-2015
Al	2,6399	2,5603	4,7085	1,3368	0,8975	4,7489	2,4332	1,8847	
As	0,0015	0,0101	0,0048	< LQ	< LQ	0,0046	0,0037	0,0015	
Ca	2,5468	2,3560	4,0435	1,4108	0,8228	4,0596	2,1088	2,0052	
Cd	0,0005	0,0057	0,0005	0,0041	0,0036	0,0005	0,0005	0,0006	
Cl	0,8382	0,5682	0,7639	0,6411	0,5621	0,7615	0,5961	0,9078	
Co	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	
Cr	0,0022	0,0054	0,0063	0,0022	0,0022	0,0022	0,0022	0,0022	
Cu	0,0170	0,1309	0,0257	0,0135	0,0067	0,0222	0,0176	0,0228	
Fe	2,3239	2,6651	4,1607	1,1360	0,7888	4,2319	1,9880	1,6645	
Hg	0,0026	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,0017	< LQ	< LQ	
K	0,9662	0,9748	1,6635	0,4949	0,3352	1,6979	0,8666	0,6761	
Mn	0,0623	0,0707	0,1197	0,0291	0,0191	0,1217	0,0525	0,0411	
Mo	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	
Na	0,7907	0,8394	0,9985	0,7522	0,5793	1,1220	0,7710	0,8033	
Ni	0,0017	< LQ	0,0025	< LQ	< LQ	0,0017	0,0022	< LQ	
P	0,0729	0,0626	0,0752	0,0409	0,0262	0,0654	0,0512	0,0578	
Pb	0,0060	0,0035	0,0057	0,0021	< LQ	0,0055	0,0076	0,0018	
S	1,3890	1,3076	1,2956	0,9560	0,8838	0,9365	0,9398	1,0827	
Sb	0,0124	0,0128	0,0126	0,0124	0,0128	0,0126	0,0127	0,0128	
Si	6,3142	5,9150	11,0021	3,1812	2,0120	10,8153	5,5470	4,4237	
Sr	0,0157	0,0143	0,0258	0,0100	0,0022	0,0272	0,0116	0,0111	
Ti	0,1992	0,1929	0,3842	0,1035	0,0637	0,3966	0,1816	0,1481	
V	0,0063	0,0092	0,0079	0,0049	0,0027	0,0070	0,0039	0,0023	
Zn	0,0162	0,0247	0,0237	0,0111	0,0060	0,0232	0,0167	0,0134	

*<LQ: Valor bajo el límite de cuantificación del equipo.

Fuente: Elaboración propia en base a CEDEUS (2015)