

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1 Formulación del problema	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Hipótesis de trabajo	3
1.4 Ubicación y accesos	3
<b>2. ANTECEDENTES</b>	4
2.1 Marco legal e histórico	4
2.1.1 Guía metodológica para la gestión de SPPC	5
2.2 Marco conceptual	8
2.2.1 Suelos	8
2.2.2 Relaves	9
2.2.2.1 Definición y tipos de relaves	9
2.2.2.2 Relaves en Chile	10
2.4 Marco geológico	11
<b>3. METODOLOGÍA</b>	15
3.1 Grillado y muestreo	15
3.1.1 Suelos	15
3.1.2 Residuos mineros	17
3.2 Preparación de muestras para análisis	19
3.3 Control de calidad de datos	19
3.3.1 Límite de detección	20
3.3.2 Test de outliers	20
3.3.3 Validación de datos de terreno	21
3.4 Análisis de procedencia antropogénica	21
3.4.1 Factor de enriquecimiento	21
3.4.2 Correlación múltiple	22
3.4.3 Análisis multivariable	23
3.5 Análisis de procedencia por parte de relaves aledaños	23

3.5.1 Abundancias comparadas	23
3.5.2 Distribución espacial	24
3.5.3 Análisis mineralógico	24
<b>4. RESULTADOS</b>	26
4.1 Análisis de procedencia antropogénica	27
4.1.1 Factor de enriquecimiento	27
4.1.2 Correlación múltiple	28
4.1.3 Análisis Factorial	30
4.2 Análisis de procedencia por parte de relaves aledaños	31
4.2.1. Abundancias comparadas	31
4.2.2 Distribución espacial	32
4.2.3 Análisis mineralógico	33
4.2.2.1 Aproximación con lupa binocular	33
4.2.2.2 Resultados de XRD	35
4.2.2.3 Observaciones en microscopio óptico	36
4.2.2.4 Síntesis de información mineralógica	39
<b>5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	40
5.1 Procedencia antropogénica	40
5.1.1 Inferencias sobre factor de enriquecimiento	40
5.1.2 Correlaciones y análisis factorial	41
5.2 Rol de relaves aledaños	42
5.2.1 Relaciones geoquímicas y mineralógicas	42
5.2.2 Mecanismos de aporte de material	42
5.3 Fuente de enriquecimiento de Hg	47
5.4 Consideraciones para políticas públicas	48
5.5 Limitaciones de métodos utilizados	50
5.6 Recomendaciones técnicas finales	52
<b>6. CONCLUSIONES</b>	53
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b>	54
<b>ANEXOS</b>	59
A1. Fichas de descripción de terreno	59
A1.1 Muestreo de suelos	59

A1.2 Muestreo relaves	91
A2. Datos geoquímicos obtenidos con ICP-MS	95
A3. Mapas de interpolación	97
A4. Difractogramas	103

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de elementos químicos obtenidos mediante ICP-MS.....	20
Tabla 2. Categorización de proveniencia geogénica y/o antropogénica de muestras .....	22
Tabla 3. Estadísticas básicas para datos geoquímicos obtenidos .....	26
Tabla 4. Categorización de rangos de FE. Valores $FE > 10$ implican un origen antropogénico; valores $1 \leq FE \leq 10$ implican un origen que puede ser antropogénico o geogénico; valores $FE < 1$ implican un origen geogénico.....	27
Tabla 5. Pares de elementos químicos correlacionados .....	29
Tabla 6. Matriz de componentes rotada. Se destacan en gris variables con factores de carga $> 0,5$ . .....	30
Tabla 7. Resumen de minerales identificados mediante lupa binocular, imán y HCl. Se expresa (?) aquellos minerales ante los cuales no se tiene certeza de su identificación. A saber: Qz=cuarzo, Cc=calcita, Plg=plagioclasa, K-Fel= feldespato potásico, Py=pirita, Px=piroxeno, Cpy=calcopirita .....	35
Tabla 8. Resumen de minerales identificados mediante XRD. ....	36
Tabla 9. Resumen de minerales encontrados en microscopio óptico. ....	38
Tabla 10. Síntesis de minerales encontrados en muestras de relaves y suelos. Lit: líticos, Qz: cuarzo, Cc: calcita, Plg: plagioclasa, K-Fel: feldespato potásico, Mgt: magnetita, Py: pirita, Px: piroxeno, Cpy: calcopirita, Bt: biotita, verdes: minerales verdes de alteración. ....	39
Tabla 11. Muestra P101 .....	59
Tabla 12. Muestra P102.....	61
Tabla 13. Muestra P103.....	63
Tabla 14. Muestra P104.....	65
Tabla 15. Muestra P105.....	67
Tabla 16. Muestra P106.....	69
Tabla 17. Muestra P107.....	71
Tabla 18. Muestra P109.....	73

Tabla 19. Muestra P110.....	75
Tabla 20. Muestra P112.....	77
Tabla 21. Muestra P201.....	79
Tabla 22. Muestra P202.....	81
Tabla 23. Muestra P211.....	83
Tabla 24. Muestra P204.....	85
Tabla 25. Muestra P207.....	87
Tabla 26. Muestra P210.....	89
Tabla 27. Muestra R01.....	91
Tabla 28. Muestra R02.....	92
Tabla 29. Muestra R03.....	93
Tabla 30. Muestra R04.....	94
Tabla 31. Concentraciones químicas de 38 elementos de la tabla periódica en los suelos. ....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación y accesos a la zona de estudio (imagen extraída y modificada de Google Earth). ....	3
Figura 2. Etapas de Guía metodológica para gestión de SPPC.....	6
Figura 3. SPPC a cabo del año 2015 (MMA, 2016). ....	8
Figura 4. Relaves por regiones administrativas según datos del último catastro emitido por SERNAGEOMIN (elaboración propia) .....	10
Figura 5. Mapa litológico de la zona, escala 1:80.000. Basado en las cartas geológicas de Copiapó (Arévalo, 2005a) y Los Loros (Arévalo, 2005b). Sistema de proyección UTM WGS84. ....	11
Figura 6. Grillas de muestreo I y II superpuestas con puntos de muestreo centrados en celdas. Sistema de proyección UTM WGS84.....	16
Figura 7. Cuadrantes utilizados para muestreo. A la izquierda: esquema en planta del suelo; a la derecha: fotografía de un muestreo que utiliza esta metodología (según Demetriades & Birke, 2015).....	17
Figura 8. a) Cubierta de grava sobre uno de los relaves aledaños a predios agrícolas; b) observación de afloramiento buscando sitio para toma de muestras; c) aspecto del material encontrado en afloramientos: limo-arcilloso y con cristales pequeños de brillo metálico; d) fotografía de un punto de muestreo (muestra R02). ....	18

Figura 9. Lóbulo aluvial oscuro identificado dentro del Predio 1. Se remarcó gris en imagen para mejor visualización. ....	18
Figura 10. Muestreo realizado en predios agrícolas y relaves mineros. Sistema de proyección UTM WGS84. ....	19
Figura 11. Ponderación obtenida con la interpolación por inverso de la distancia (izquierda) e inverso del cuadrado de la distancia (derecha). Imagen tomada de Emery (2015b). ....	24
Figura 12. Correlación entre el FE obtenido utilizando el V como elemento de referencia y FE relativo al Ti. Se utilizaron valores promedio de FE para cada elemento. ....	27
Figura 13. Resultados de FE promedio por predio utilizando V como elemento de referencia. Barras de error corresponden a desviación muestral. ....	28
Figura 14. FE por punto de muestreo para cada uno de los elementos medidos. Líneas negras rectas indican los niveles FE=20 y FE=40. Cuando $20 \leq FE \leq 40$ se habla de un enriquecimiento muy alto del elemento y cuando $FE > 40$ se habla de un enriquecimiento extremadamente alto, de acuerdo a la categorización de Sutherland (2000). ....	28
Figura 15. Matriz de correlación de datos geoquímicos ....	29
Figura 16. Abundancias comparadas entre Predio 1 (color mostaza), Predio 2 (color turquesa) y muestras de relaves estudiadas (tonos de grises). Sobre las barras de muestras de suelo se sobrepuso una barra de error correspondiente a la desviación muestral de los datos considerados. ....	32
Figura 17. Mapas de interpolación para los elementos: Cu, Co y Hg (la totalidad de las interpolaciones se encuentra en Anexos) ....	33
Figura 18. Fotografías de muestras vistas a través de lupa binocular con aumento 40x. (A) Muestra de suelo P103; presenta un aspecto característico de todas las muestras de suelo (grano muy fino, abundancia relativa mayor de granos minerales félsicos); (B) muestra de relave R03, cristales de magnetita apartados del resto con la ayuda de un imán; (C) muestra de relave R01, se señalan algunos de los minerales identificados. ....	34
Figura 19. Ejemplos de difractogramas. a) P101 y b) R02 ....	36
Figura 20. Fotografías tomadas a las muestras en microscopio óptico. a) P105: vista general, b) P102: cristal de plagiocasa, c) P104: cristal de feldespato potásico, d) P104: cristales de cuarzo y calcita, e) P207: cristales cuarzo y calcita, f) P201: chert, g) P201: cristales de calcita y feldespato potásico, h) cristales de biotita y feldespato potásico, i) R02: vista general (abundancia de opacos), j) R03: cristal de pirita, k) R03: cristales de calcopirita y magnetita, m) P201: cristales de pirita, l) P201: cristal de pirita ....	38
Figura 21. Imágenes satelitales históricas que revelan aproximadamente cuando los relaves fueron cubierto por grava. ....	43
Figura 22. Imagen extraída de Google Earth; vista hacia el Este desde el borde suroriente del Predio 1. Muestra R03 señalada por flechas. ....	44

Figura 23. Imagen extraída de Google Earth; vista en planta al borde suroriente del Predio 1. Muestra R03 señalada por flechas negras. Flecha amarilla de imagen a la izquierda indica posible parte descubierta del lóbulo aluvial en 2004.....	45
Figura 24. Tubería que pasa por el borde sur del Predio 1 (fotografía tomada sobre relaves).....	46
Figura 25. Depósito de tierra oscura aledaña a la tubería que pasa por detrás (fotografía tomada dentro del Predio 1, borde sur) .....	46
Figura 26. Manguera de regadío en el borde sur de Predio 1. ....	47
Figura 27. Concentración de algunos elementos traza en fertilizantes (Rodríguez et al., 2014)..	48
Figura 28. Ingreso total de elementos traza al suelo ( $\text{mg/ha}^{-1}$ ) por cada 100 unidades de fertilizante aplicados en suelos agrícolas, según el nutriente a utilizar; ya sea N, P o K (Rodríguez et al., 2014).....	48
Figura 29. Distribución de concentración de Cu. ....	51
Figura 30. Mapas de interpolación .....	103
Figura 31. Difractogramas con peaks identificados.....	107

## ÍNDICE DE ECUACIONES

(1) Test de Grubbs.....	21
(2) Hipótesis nula de test de Grubbs.....	21
(3) Diferencia porcentual relativa (RPD).....	22
(4) Factor de enriquecimiento.....	23
(5) Coeficiente de correlación de Pearson.....	23