

## Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Formulación del estudio propuesto .....	1
1.1.1	Exposición del problema.....	1
1.1.2	Fundamentación y discusión bibliográfica .....	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	Metodología .....	3
1.4.1	Metodología asociada a objetivos específicos.....	5
1.5	Ubicación y vías de acceso.....	5
2	MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO .....	7
2.1	Generalidades.....	7
2.2	Unidades morfotectónicas.....	7
2.3	Geología .....	8
2.3.1	Rocas estratificadas .....	8
2.3.1.1	Paleozoico.....	8
2.3.1.2	Mesozoico .....	10
2.3.1.2.1	Triásico .....	10
2.3.1.2.2	Jurásico .....	10
2.3.1.2.3	Cretácico.....	11
2.3.1.3	Cenozoico .....	11
2.3.2	Rocas intrusivas .....	11
2.3.2.1	Paleozoico.....	11
2.3.2.2	Mesozoico .....	12
2.3.2.2.1	Triásico .....	12
2.3.2.2.2	Jurásico .....	12
2.3.2.2.3	Cretácico.....	12
2.3.2.3	Cenozoico .....	13
2.3.2.3.1	Paleógeno.....	13
2.3.3	Depósitos no consolidados .....	13
2.3.3.1	Neógeno.....	13

2.3.3.2	Cuaternario .....	14
2.3.4	Geología estructural .....	14
2.4	Unidades hidrográficas .....	16
2.4.1	Cuenca del río Salado .....	17
2.4.2	Cuenca del salar de Pedernales .....	18
3	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	20
3.1	Geoquímica de aguas .....	20
3.1.1	Diagrama Piper.....	23
3.1.2	Parámetros fisicoquímicos.....	25
3.1.3	Elementos mayores .....	27
3.1.3.1	Cl <sup>-</sup> .....	27
3.1.3.2	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> .....	29
3.1.3.3	Br <sup>-</sup> .....	31
3.1.3.4	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	32
3.1.3.5	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	33
3.1.3.6	Na <sup>+</sup> y K <sup>+</sup> .....	35
3.1.3.7	Ca <sup>+2</sup> .....	39
3.1.3.8	Mg <sup>+2</sup> .....	41
3.1.3.9	SiO <sub>2</sub> .....	43
3.1.4	Elementos traza.....	45
3.1.4.1	B.....	45
3.1.4.2	Li .....	46
3.1.4.3	As.....	47
3.1.4.4	Mn .....	49
3.1.4.5	Cu .....	50
3.1.4.6	Ba.....	52
3.1.4.7	Mo .....	53
3.1.4.8	Se.....	54
3.1.4.9	V.....	56
3.1.4.10	Fe .....	57
3.1.4.11	Al .....	58
3.1.4.12	Co, Ni, Pb y Zn .....	59
3.1.5	Resumen .....	60
3.1.5.1	Agua marina y costera .....	60

3.1.5.2	Agua superficial y de salar .....	63
3.1.5.3	Agua subterránea.....	67
3.1.6	Otros análisis.....	67
3.1.6.1	Análisis multivariante.....	67
3.1.6.2	Movilidad iónica.....	68
3.1.7	Normativa chilena .....	69
3.1.7.1	Introducción.....	69
3.1.7.2	Valores límite para parámetros fisicoquímicos.....	70
3.1.7.3	Valores límite para en elementos mayores .....	72
3.1.7.4	Valores límite para elementos traza .....	75
3.1.8	Trabajo previo.....	77
3.2	Geoquímica de sedimentos .....	80
3.2.1	Sedimentos del aluvión.....	80
3.2.1.1	Elementos mayores .....	82
3.2.1.1.1	Si.....	83
3.2.1.1.2	Al.....	85
3.2.1.1.3	Fe.....	86
3.2.1.1.4	Ca .....	87
3.2.1.1.5	Mg.....	89
3.2.1.1.6	K .....	90
3.2.1.1.7	Cl .....	92
3.2.1.2	Elementos traza .....	93
3.2.1.2.1	S .....	94
3.2.1.2.2	Ti.....	96
3.2.1.2.3	Ba .....	97
3.2.1.2.4	Mn.....	98
3.2.1.2.5	Cu .....	100
3.2.1.2.6	Zr .....	101
3.2.1.2.7	Sr.....	103
3.2.1.2.8	Rb .....	105
3.2.1.2.9	Zn.....	106
3.2.1.2.10	Co, Mo, P, Y y As.....	107
3.2.1.3	Resumen.....	108
3.2.1.3.1	Sedimentos activos y de salar .....	108

3.2.1.3.2	Sedimentos de aluvión.....	109
3.2.1.3.3	Relave.....	110
3.2.1.4	Otros análisis .....	110
3.2.1.4.1	Análisis multivariante .....	110
3.2.1.4.2	Movilidad iónica .....	111
3.2.1.5	Normativa internacional.....	112
3.2.1.5.1	Introducción .....	112
3.2.1.5.2	Comparación de estándares con resultados.....	114
3.2.2	Columna estratigráfica.....	117
3.2.2.1	Descripción de columna estratigráfica .....	117
3.2.2.2	Composición columna estratigráfica .....	119
3.2.2.3	Geoquímica de capa superior .....	124
3.2.2.4	Normativa internacional.....	127
3.2.2.4.1	Introducción .....	127
3.2.2.4.2	Comparación de estándares con resultados.....	127
4	CONCLUSIONES.....	131
5	BIBLIOGRAFÍA.....	134
6	ANEXOS.....	141

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Simbología, tipo de agua y color asociado a cada muestra. ....	20
Tabla 3.2 Concentración de elementos mayores en muestras de agua, en mg/l. ....	22
Tabla 3.3 Concentración de elementos traza en muestras de agua, en mg/l: Al, As, B, Ba, Co, Cu, Fe, Li. ....	22
Tabla 3.4 Concentración de elementos traza en muestras de agua, en mg/l: Mn, Mo, Ni, Pb, Se, V, Zn. ....	23
Tabla 3.5 Parámetros fisicoquímicos para cada muestra: conductividad eléctrica (C.E.), temperatura (T), pH y Eh. FDR: Fuera de rango; SD: Sin datos. ....	26
Tabla 3.6 Promedio de parámetros fisicoquímicos en muestras de agua de mar, de río, subterránea y de salar. Se detallan la conductividad eléctrica (C.E), temperatura (T), pH y Eh. FDR: Fuera de rango. SD: Sin dato. ....	27
Tabla 3.7 Matriz de correlación de la concentración de elementos en muestras de agua. Rojo: muy alta correlación. Amarillo: alta correlación. Verde: media correlación. ....	67
Tabla 3.8 Conductividad eléctrica (CE) en mS/cm de las muestras de agua marina, costera y de río. TDS de las muestras A01, A02 y A03 se calculó con $K=0,7$ , y con $K=0,75$ para el resto de las muestras. FDR: Fuera de rango. ....	71
Tabla 3.9 Valores típicos de conductividad eléctrica (CE) en aguas naturales y factor K de conversión a TDS. Modificado de Walton (1989). ....	71
Tabla 3.10 Concentración de sodio, potasio, calcio y magnesio en meq/l y sodio porcentual. ....	74
Tabla 3.11 Valores de referencia para elementos que no superan las normas chilenas. ....	77
Tabla 3.12 Simbología, tipo de sedimento y color asociado a cada muestra. ....	81
Tabla 3.13 Concentración de elementos mayores en muestras de sedimento, en % en peso. ....	83
Tabla 3.14 Concentración de elementos traza en muestras de sedimento. ....	94
Tabla 3.15 Matriz de correlación de la concentración de elementos en muestras de sedimento. Rojo: muy alta correlación. Amarillo: alta correlación. Verde: media correlación. ....	111
Tabla 3.16 Concentración de elementos químicos de acuerdo a valores de referencia entregados por la norma de Canadá y Brasil de calidad de suelo. ND: No determinado (CCME, 2007; CONAMA, 2009). ....	114
Tabla 3.17 Descripción sedimentológica de las capas pertenecientes a la columna estratigráfica estudiada, ordenadas de techo (C11) a base (C01). ....	118
Tabla 3.18 Resultados de concentración en porcentaje en peso de elementos mayores en sedimentos de la columna estratigráfica. ....	119
Tabla 3.19 Resultados de concentración de elementos traza en sedimentos de la columna estratigráfica. ....	119
Tabla 3.20 Tabla comparativa de resultados de nivel superior de la columna estratigráfica con muestras de sedimento de aluvión de la zona de la bahía de Chañaral. ....	126

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Localidades a lo largo de la cuenca del río Salado con la ubicación de la extracción de muestras. ....	4
Figura 1.2 Vías de acceso a la zona de estudio. ....	6
Figura 2.1 Unidades morfotectónicas que forman la parte más occidental de la Cordillera Andina en el norte de Chile. La zona de estudio, transecta Chañaral-Pedernales, se encuentra inmediatamente sobre la línea horizontal segmentada (Nalpas et al., 2008). .	8
Figura 2.2 Mapa geológico simplificado de la Hoja El Salvador Occidental (Godoy y Lara, 2005). ....	9
Figura 2.3 Mapa de la región del Desierto de Atacama con las unidades morfotectónicas principales y la ubicación del AFS (Riquelme et al., 2003). ....	15
Figura 2.4 Canal artificial que conecta la cuenca del río Salado con la del salar de Pedernales. ....	17
Figura 2.5 Ubicación de cuencas, subcuencas y subsubcuencas en la zona de estudio. (A) Cuencas. (B) Subcuencas. (C) Subsubcuencas (Fuente: DGA). ....	19
Figura 3.1 Ubicación de los puntos de toma de muestras de agua. ....	21
Figura 3.2 Diagrama Piper de las muestras de agua. La simbología representa los tipos de agua. X: muestra de mar; O: muestra superficial; Δ: muestra de agua subterránea; y +: muestra de salar. G1: Grupo 1; G2: Grupo 2. ....	25
Figura 3.3 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de $\text{Cl}^-$ . ....	28
Figura 3.4 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de $\text{SO}_4^{-2}$ . Se destaca en un cuadrado rojo la diferencia de concentración entre muestras costeras y marinas. ....	30
Figura 3.5 Relación entre la concentración de $\text{SO}_4^{-2}$ y $\text{Cl}^-$ , en mg/l. ....	30
Figura 3.6 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de $\text{Br}^-$ . ....	32
Figura 3.7 Relación entre la concentración de $\text{Br}^-$ y $\text{Cl}^-$ , en mg/l. ....	32
Figura 3.8 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de $\text{NO}_3^-$ . ....	33
Figura 3.9 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de $\text{HCO}_3^-$ . ....	35
Figura 3.10 Relación entre la concentración de $\text{HCO}_3^-$ y $\text{Cl}^-$ , en mg/l. ....	35
Figura 3.11 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de $\text{Na}^+$ . ....	38
Figura 3.12 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de $\text{K}^+$ . ....	38
Figura 3.13 Relación entre la concentración de $\text{Na}^+$ y $\text{Cl}^-$ , en mg/l. ....	39
Figura 3.14 Relación entre la concentración de $\text{K}^+$ y $\text{Cl}^-$ , en mg/l. ....	39
Figura 3.15 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de $\text{Ca}^{+2}$ . ....	40
Figura 3.16 Relación entre la concentración de $\text{Ca}^{+2}$ y $\text{Cl}^-$ , en mg/l. ....	41
Figura 3.17 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de $\text{Mg}^{+2}$ . ....	42
Figura 3.18 Relación entre la concentración de $\text{Mg}^{+2}$ y $\text{Cl}^-$ , en mg/l. ....	43
Figura 3.19 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de $\text{SiO}_2$ . ....	44

Figura 3.20 Relación entre la concentración de SiO <sub>2</sub> y Cl <sup>-</sup> , en mg/l.....	44
Figura 3.21 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de B en mg/l. ....	46
Figura 3.22 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Li en mg/l. Se destaca en un cuadrado rojo la diferencia de concentración entre muestras costeras y marinas.....	47
Figura 3.23 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de As en ppb. Se destaca en un cuadrado rojo la diferencia de concentración entre muestras costeras y marinas.....	49
Figura 3.24 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Mn en ppb. Se destaca en un cuadrado rojo la diferencia de concentración entre muestras costeras y marinas.....	50
Figura 3.25 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Cu en ppb. Se destaca en un cuadrado rojo la diferencia de concentración entre muestras costeras y marinas.....	52
Figura 3.26 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Ba en ppb. Se destaca en un cuadrado rojo la diferencia de concentración entre muestras costeras y marinas.....	53
Figura 3.27 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Mo en ppb. Se destaca en un cuadrado rojo la diferencia de concentración entre muestras costeras y marinas.....	54
Figura 3.28 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Se en ppb. ....	55
Figura 3.29 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de V en ppb. ....	56
Figura 3.30 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Fe en ppb. ....	58
Figura 3.31 Distribución espacial de las muestras con su concentración gráfica relativa de Al en ppb. ....	59
Figura 3.32 Gráficos de dispersión de la concentración de elementos mayores en relación a su ubicación espacial este-oeste en las muestras de agua marina y costera. (A) Elementos con concentraciones menores a 3000 mg/l. (B) Elementos con concentraciones entre 10.000 y 30.000 mg/l.....	61
Figura 3.33 Gráficos de dispersión de la concentración de elementos traza en relación a su ubicación espacial este-oeste en las muestras de agua marina y costera. (A) Elementos con concentraciones menores a 0,25 mg/l. (B) Elementos con concentraciones entre 20 mg/l. ....	62
Figura 3.34 Gráficos de dispersión de la concentración de elementos mayores en relación a su ubicación espacial este-oeste en las muestras de río y salar. (A) Elementos con concentraciones menores a 5.000 mg/l. (B) Elementos con concentraciones menores a 30 mg/l. (C) Elementos con concentraciones menores a 200.000 mg/l. ....	64
Figura 3.35 Gráficos de dispersión de la concentración de elementos traza en relación a su ubicación espacial este-oeste en las muestras de río y salar. (A) Elementos con concentraciones menores a 0,7 mg/l. (B) Elementos con concentraciones entre 100 y 600 mg/l. (C) Elementos con concentraciones menores a 10 mg/l. ....	66
Figura 3.36 Clasificación de elementos de acuerdo a su potencial iónico (IP). Extraído de Buggle et al. (2011). ....	69

Figura 3.37 Valores de pH de las muestras de agua con los valores de referencia de las normas nacionales. ....	70
Figura 3.38 Valores de TDS en las muestras de agua con los valores de referencia de la norma nacional para agua potable. ....	72
Figura 3.39 Concentración en mg/l de (A) $\text{Cl}^-$ , (B) $\text{SO}_4^{2-}$ , (C) $\text{NO}_3^-$ y (D) $\text{Mg}^{+2}$ en las muestras de agua con los valores de referencia de las normas nacionales. ....	73
Figura 3.40 Valor de Na% en las muestras de agua con el valor de referencia de la norma nacional para agua de riego (NCh1333). ....	74
Figura 3.41 Concentración en mg/l de (A) As, (B) B, (C) Cu y (D) Li en las muestras de agua con los valores de referencia de las normas nacionales. ....	76
Figura 3.42 Concentración en mg/l de (A) Mn, (B) Mo y (C) Se en las muestras de agua con los valores de referencia de las normas nacionales. ....	77
Figura 3.43 (A) Fajas metalogénicas y ubicación de zona de estudio. (B) Lugares de muestras y locaciones importante: 1 Bahía de Chañaral; 2 Diego de Almagro; 3 Inca de Oro; 4 El Salvador; 5 Salar de Pedernales; 6 Aguas termales Río Negro; 7 Salar de Maricunga; 8 Salar y aguas termales Laguna Verde; 10 Pampa Austral; 11 Parque Nacional Pan de Azúcar; 12 Parque Nacional Nevado Tres Cruces. Tomado de Tapia y Verdejo (2015). ....	78
Figura 3.44 Gráficos comparativos de concentración de (A) As, (B) Cu, (C) Li y (D) Pb en relación a su ubicación espacial este-oeste. En celeste, datos de muestras de agua después del aluvión, y en amarillo, datos previos al evento, extraídos de Tapia y Verdejo (2015). ....	79
Figura 3.45 Gráficos comparativos de concentración de (A) Cd, (B) Sb, (C) U y (D) Zn en relación a su ubicación espacial este-oeste. En celeste, datos de muestras de agua después del aluvión, y, en amarillo, datos previos al evento, extraídos de Tapia y Verdejo (2015). ....	80
Figura 3.46 Ubicación de los puntos de toma de muestras de sedimento. ....	82
Figura 3.47 Concentración gráfica relativa de Si con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. ....	84
Figura 3.48 Concentración gráfica relativa de Al con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. Se destaca en un círculo amarillo la alta concentración en la muestra de relave (S14). ....	86
Figura 3.49 Concentración gráfica relativa de Fe con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. Se destaca en un círculo amarillo la alta concentración en la muestra de relave (S14). ....	87
Figura 3.50 Concentración gráfica relativa de Ca con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. ....	89
Figura 3.51 Concentración gráfica relativa de Mg con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. ....	90
Figura 3.52 Concentración gráfica relativa de K con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. ....	92
Figura 3.53 Concentración gráfica relativa de Cl con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. ....	93
Figura 3.54 Concentración gráfica relativa de S, en % en peso, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. Se destaca en un círculo amarillo la alta concentración en la muestra de relave (S14). ....	96
Figura 3.55 Concentración gráfica relativa de Ti, en % en peso, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. ....	97



Figura 3.56 Concentración gráfica relativa de Ba, en % en peso, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. ....	98
Figura 3.57 Concentración gráfica relativa de Mn, en % en peso, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. ....	100
Figura 3.58 Concentración gráfica relativa de Cu, en % en peso, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. Se destaca en un círculo amarillo la alta concentración en la muestra de relave (S14). ....	101
Figura 3.59 Concentración gráfica relativa de Zr, en ppm, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. ....	103
Figura 3.60 Concentración gráfica relativa de Sr, en ppm, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. Se destaca en un círculo amarillo la alta concentración en la muestra de relave (S14). ....	104
Figura 3.61 Concentración gráfica relativa de Rb, en ppm, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. ....	106
Figura 3.62 Concentración gráfica relativa de Zn, en ppm, con la distribución espacial de los distintos tipos de sedimento de las muestras. ....	107
Figura 3.63 Gráficos de dispersión de la concentración de elementos mayores en relación a su ubicación espacial este-oeste en las muestras de sedimento activo y de salar. ..	108
Figura 3.64 Gráficos de dispersión de la concentración de elementos traza en relación a su ubicación espacial este-oeste en las muestras de sedimento activo y de salar. (A) Elementos traza con concentraciones menores a 2,5% en peso. (B) Elementos traza con concentraciones menores a 0,12% en peso. ....	109
Figura 3.65 Variación (mínimo y máximo) de valores de referencia para suelos industriales de ocho elementos en diez países (Provoost et al., 2006). ....	112
Figura 3.66 Concentración en ppm de (A) Ba, (B) Cu, (C) S y (D) Zn en las muestras de sedimento de aluvión con los valores de referencia de Canadá y Brasil. CA: Canadá, suelo agrícola; CR: Canadá, suelo residencial; CC: Canadá, suelo comercial; CI: Canadá, suelo industrial; BA: Brasil, suelo agrícola; BR: Brasil, suelo residencial; BI: Brasil, suelo industrial. ....	116
Figura 3.67 Concentración en ppm de (A) As, (B) Co y (C) Mo en las muestras de sedimento de relave (S14) y de arena (S02) con los valores de referencia de Canadá y Brasil. CA: Canadá, suelo agrícola; CR: Canadá, suelo residencial; CC: Canadá, suelo comercial; CI: Canadá, suelo industrial; BA: Brasil, suelo agrícola; BR: Brasil, suelo residencial; BI: Brasil, suelo industrial. ....	117
Figura 3.68 A la izquierda, fotografía real de la columna estratigráfica. A la derecha, representación de la columna estratigráfica. ....	118
Figura 3.69 Gráficos de dispersión de elementos con tendencia a aumentar su concentración en peso de techo a base. (A) Si. (B) K. (C) Cu. (D) Rb. ....	120
Figura 3.70 Gráficos de dispersión de elementos con tendencia a disminuir su concentración en peso de techo a base. (A) Al. (B) Fe. (C) Ca. (D) Cl. (E) S. (F) Ba. (G) Zn. ....	122
Figura 3.71 Gráficos de dispersión de elementos sin un patrón específico en su concentración en peso con respecto a la profundidad. (A) Mg. (B) Ti. (C) Mn. (D) Sr. (E) Zr. (F) Mo. ....	123
Figura 3.72 Gráficos de dispersión de elementos cuya concentración se detecta en un solo nivel de la columna estratigráfica. (A) Ge. (B) Os. (C) Y. (D) As. ....	124

Figura 3.73 Ubicación de las muestras de sedimento de aluvión y de la columna estratigráfica en la zona de la bahía de Chañaral. Imagen satelital obtenida de Google Earth, año 2016..... 125

Figura 3.74 Concentración en ppm de (A) Ba, (B) Cu, (C) Mo, (D) S y (E) Zn en las muestras de sedimento de la columna estratigráfica con los valores de referencia de Canadá y Brasil. CA: Canadá, suelo agrícola; CR: Canadá, suelo residencial; CC: Canadá, suelo comercial; CI: Canadá, suelo industrial; C: Canadá, todos los tipos de suelo; BA: Brasil, suelo agrícola; BR: Brasil, suelo residencial; BI: Brasil, suelo industrial. .... 128